



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit

Modellierung eines Pyrolyseprozesses zur
optimalen Aufbereitung von
Sekundärrohstoffen unter Nutzung von
verfügbaren Abwärmepotentialen

Alexander Cont, BSc

Februar 2024



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 12.02.2024

Unterschrift Verfasser/in
Alexander Cont

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger für die Möglichkeit, meine Masterarbeit am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik abzuwickeln und in ein innovatives Projekt mit eingebunden zu werden.

Ebenso gilt ein aufrichtiger Dank meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr. mont. Julia Vopava-Wrienz und Dipl.-Ing. Thomas Kurz für die konstruktiven Kommentare und für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Weiters möchte ich, stellvertretend für die gesamte Open-Science-Gemeinschaft, den zahlreichen Forschenden, Wissenschaftlern und Unterstützern danken, die zur Erstellung der OEMOF-Bibliothek, der Programmiersprache Python und der Entwicklungsumgebung Spyder beigetragen haben. Ohne die Bereitschaft, wissenschaftliche Erkenntnisse und Fortschritte für die Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen, würde es die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht geben.

Meine größter Dank gilt meinen Eltern, die mich auf jegliche Art unterstützt und mir dieses Studium bedingungslos ermöglicht haben. Danke!

KURZFASSUNG

Die europäischen CO₂-Reduktionsziele können nur mit signifikanten Verbesserungen von privaten und industriellen Anwendungen und Prozessen erreicht werden. Der industrielle Wärmesektor spielt bei der Erreichung dieser Klimaziele eine wesentliche Rolle, da der Großteil der Wärmeerzeugung in Europa aus fossilen Energiequellen stammt (ca. 75 %). Eine Dekarbonisierung kann bspw. durch die Steigerung der Prozesseffizienz, dem Einsatz von erneuerbaren Energien oder der Nutzung von Abwärme (in der Europäischen Union fallen ca. 3.000 TWh pro Jahr an) vorangetrieben werden. Auch die Kreislaufwirtschaft von Rohstoffen stellt eine Möglichkeit dar, um den Primärenergieeinsatz, und somit die entstehenden Emissionen, zu verringern.

An diesen Punkten setzt das Unternehmen Seccon GmbH an und hat ein Patent entwickelt, um bestehende Abwärmepotentiale für die Aufbereitung von verschiedenen Abfallfraktionen zu nutzen. Dabei wird ein heißes Abgas einer thermischen Produktionsanlage verwendet, um Abfälle in einem Drehrohrofen zu pyrolysieren und eine Abtrennung der darin enthaltenen Wertstoffe zu erzielen. Durch den Einsatz von Abwärme, die anderenfalls ungenutzt bleibt, können, im Vergleich zu herkömmlichen Aufbereitungstechniken, sowohl Kosten-, als auch Energieeinsparungen erreicht werden. Außerdem wirkt sich die Nachnutzung des Abgases positiv auf die CO₂-Bilanz des industriellen Prozesses aus.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Energieflüsse der bereits bestehenden Pilotanlage und einer geplanten Großanlage zu modellieren und zu analysieren. Im ersten Teil wird auf den theoretischen Hintergrund des Prozesses eingegangen. Das Patent von Seccon wird beleuchtet und ein Überblick über die verwendete Python-Bibliothek gegeben.

Im praktischen Teil dieser Arbeit wird unter Verwendung der OEMOF-Bibliothek ein Python-Modell entwickelt, um den Aufbereitungsprozess darzustellen und den Energieeinsatz zu optimieren. Das OEMOF-Modell wird um Nebenbedingungen erweitert, damit die Temperaturabhängigkeit der Pyrolyse in die Modellierung mit einfließt. Um die Optimierungspotentiale zu analysieren, werden vier beispielhafte Szenarien berechnet und bewertet. Eines davon betrachtet die Pilotanlage, die anderen drei stellen den Prozess der zukünftigen Großanlage zu verschiedenen Betrachtungszeiträumen und mit unterschiedlichen Prozessbedingungen dar. Die Randbedingungen und Eingabeparameter der Optimierungen werden vom Projektpartner Seccon vorgegeben, sofern sie mittels Pilotanlage bereits bestimmt und für die Großanlage hochskaliert wurden. Die fehlenden erforderlichen Parameter werden anhand von Literaturwerten ergänzt.

Die Zielfunktion der Optimierung ist die Minimierung der Gesamtkosten, nicht die Minimierung der eingesetzten Energiemenge. Deshalb sind bei den Berechnungen nur geringe Einsparungen der Energiemenge zu beobachten (kleiner als 1 %). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abfallmenge eine vorgegebene, nicht veränderbare, Energiemenge benötigt, damit sie vollständig pyrolysiert werden kann. Die Optimierung wählt deshalb den zeitlichen Abfalleinsatz anhand der Energiepreise so aus, dass die Kosten für den Aufbereitungsprozess minimiert werden.

Durch die Optimierung der Pilotanlage ergibt sich eine spezifische Gewinnerhöhung von ca. 0,025 €/kg. Bei der Großanlage kann eine Gewinnsteigerung von ca. 0,002 €/kg erreicht werden, wenn ein heißes Abgas aus einer nebenstehenden Anlage zur Verfügung steht. Wenn die gesamte Prozessenergie für die Pyrolyse in der Großanlage zugekauft werden muss, ergibt sich eine Gewinnsteigerung von ca. 0,04 €/kg. Die Ergebnisse zeigen, dass die Optimierung vor allem in Zeiträumen, wo keine Abwärme zur Verfügung steht, hohe Gewinnsteigerungen ermöglicht. Zusätzlich bestimmt der Optimierer die Abfallfraktionen, deren Verarbeitung sich nur bei verfügbarer Abwärme positiv auf das Betriebsergebnis auswirkt.

ABSTRACT

The European CO₂ reduction goals can only be achieved with significant improvements in both private and industrial applications and processes. The industrial heat sector plays a substantial role in reaching these climate goals due to the fact that the major part of heat production in Europe comes from fossil energy sources (approx. 75 %). Decarbonization can be boosted, for example, by utilizing renewable energy sources, increasing process efficiency, or utilizing waste heat (approx. 3,000 TWh per year in the European Union). Additionally, the circular economy of valuable resources guarantees a reduction of both primary energy sources and emissions.

The company Seccon GmbH focuses on these points and has developed a patent for using exhaust heat from thermal facilities to process waste materials. The described process uses a hot gas from an industrial production site to pyrolyze the waste in a rotary kiln. The process leads to a separation of the recyclable and valuable materials from unwanted waste fractions. The strategic use of waste heat, which would otherwise be released into the atmosphere, guarantees a positive impact on the CO₂ footprint of the industrial plant and a material treatment that is both cost and energy efficient.

The goal of this thesis is to model and analyze the energy flows of an already-constructed pilot plant and of a large-scale rotary kiln, which will be constructed in the next years. In the first part of this thesis the theoretical background of the process is described, the patent of Seccon is summarized, and an overview of the utilized Python libraries is provided.

For the empirical part a Python model (utilizing the OEMOF library) is developed to describe the processing facility and to optimize its energy usage. Multiple constraints are added to take the temperature dependency of the pyrolysis process into consideration. Four scenarios are elaborated to analyze the optimization potential. One of these scenarios depicts the pilot plant, the other three describe the large-scale plant at different time periods and with different process parameters. These input parameters are provided by Seccon, if already verified, and based on literature values.

The objective function of the optimization is the minimization of the total costs, not the minimization of the needed energy amount. Therefore, the energy savings of the optimizations are relatively low (less than 1 %), due to the fact that the energy amount for the pyrolysis is a fixed value that cannot be altered for a given waste mass. Therefore, the optimizer chooses the time dependent material throughflow in such way that the process costs are reduced to a possible minimum. This leads to an increase of the profit in the observed scenarios.

The optimization of the pilot plant leads to an increase in specific profit of approx. 0.025 €/kg. For the large-scale facility, the profit can be increased by approx. 0.002 €/kg if an exhaust gas of a nearby plant is available, and approx. 0.04 €/kg if the entire process energy has to be purchased. These results show that especially for time periods where no hot gas is available, the optimization has a high impact on the generated profits. In addition, the optimizer determines the types of materials, which would lead to economic losses when processed with purchased energy only.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung.....	1
1.3	Methodische Vorgehensweise	2
1.4	Aufbau der Arbeit.....	2
1.5	Die Seccon GmbH	3
2	Patent und Verfahren von Seccon	4
2.1	Technische Bedeutung	4
2.2	Drehrohröfen	5
2.3	Ausführungsbeispiel 1.....	6
2.4	Ausführungsbeispiel 2.....	8
3	Modellierung mit OEMOF	10
3.1	Allgemeine Modellierung und Einleitung in OEMOF.....	10
3.2	Optimierung in OEMOF.....	11
3.3	Aufbau und Nutzen von OEMOF	12
3.4	Verwendete OEMOF-Komponenten, -Klassen und -Constraints.....	14
4	Modellerstellung	16
4.1	Verwendete Python-Bibliotheken und technische Eckdaten	16
4.2	Allgemeine Modellbeschreibung	16
4.3	Emissionsbegrenzung	18
4.4	Temperaturabhängigkeit	20
4.4.1	Modellaufbau.....	21
4.4.2	Berechnung.....	23
4.4.3	Test der temperaturabhängigen Optimierung	26
4.4.4	Abhängigkeit von Drehrohröfen-Austrittstemperatur	29
4.5	Gesamtmodell	32
4.6	Eingabeparameter und -daten	34
5	Optimierungs-Szenarien	39
5.1	Rechendauer und Ergebnisgüte der Optimierung	39
5.2	Modellkonfiguration und Methodik der Simulation und Auswertung der Szenarien	40
5.3	Szenario 1: SSD	45
5.4	Szenario 2: LSD – Sommer	52

5.5 Szenario 3: LSD – Winter	58
5.6 Szenario 4: LSD – Wartung	63
5.7 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse	68
5.8 Durchschnittliche Energiepreise und Nachnutzung der Drehrohren-Abgase	69
5.9 Herausforderungen des Optimierungskonzeptes	72
6 Zusammenfassung und Ausblick	74
7 Literaturverzeichnis	76
8 Anhang	78

NOMENKLATUR

Abkürzungen

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DI	Diplomingenieur
e.U.	eingetragener Unternehmer
engl.	Englisch
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Ing.	Ingenieur
LP	Linear Programming
LSD	Large Scale Demonstrator
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
OEMOF	Open Energy Modelling Framework
OPT	Optimierung
PP	Prozessplan
SO ₂	Schwefeldioxid
SSD	Small Scale Demonstrator
UML	Unified Modeling Language

Indizes

c_p	spezifische Wärmekapazität [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
c_v	kalorischer Wert des Pyrolysegases [kWh/kg]
L	Emissionslimit [mg]
m	Masse [kg]
P	Leistung [kW]
p	relativer Anteil [-]
Q	Energiemenge [kWh]
Q_s	spezifische Pyrolyseenergie [kWh/kg]
R_A	Aufheizrate Drehrohrofen [$^{\circ}\text{C/h}$]
T	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
w	spezifischer Emissionswert [mg/kWh]
Δp	Druckgradient [Pa]
ΔT	Temperaturgradient [K]
η	Wirkungsgrad [-]
ρ	Dichte [kg/m ³]
τ	Zeit [h]

Formelzeichen

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
g	Gramm
h	Stunde
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
m ³	Kubikmeter
mg	Milligramm
min	Minute
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
Pa	Pascal
s	Sekunde
t	Tonne
TWh	Terawattstunde

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Skizzierte Stoffbewegung im Drehrohrofen [3].....	5
Abbildung 2-2: Längsschnitt eines direkt beheizten Drehrohres [3]	6
Abbildung 2-3: Patent Seccon – Anlagenskizze zum Ausführungsbeispiel 1 [2]	7
Abbildung 2-4: Patent Seccon – Anlagenskizze zum Ausführungsbeispiel 2 [2]	8
Abbildung 3-1: UML-Diagramm von OEMOF; eigene Darstellung nach [4]	13
Abbildung 3-2: OEMOF-Modellbeispiel mit Basiskomponenten; eigene Darstellung nach [5].....	13
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des untersuchten Energiesystems	17
Abbildung 4-2: OEMOF Basis-Modell	18
Abbildung 4-3: OEMOF-Modell für Emissionsbeschränkung	19
Abbildung 4-4: Optimierungsergebnis ohne Emissionsbegrenzung: Zeitliche Darstellung der Emissionsverläufe (links) und Gesamtenergiebedarf (rechts).....	20
Abbildung 4-5: Optimierungsergebnis mit Emissionsbegrenzung: Zeitliche Darstellung der Emissionsverläufe (links) und Gesamtenergiebedarf (rechts).....	20
Abbildung 4-6: OEMOF-Modell für temperaturabhängige Optimierung im Bezug auf Umgebungstemperatur.....	22
Abbildung 4-7: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur höher als die Eintrittstemperatur ist	24
Abbildung 4-8: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur geringer als die Eintrittstemperatur ist.....	25
Abbildung 4-9: Temperaturabhängige Optimierung ohne Constraints – Temperaturverläufe	27
Abbildung 4-10: Temperaturabhängige Optimierung ohne Constraints – Energielastgang.....	27
Abbildung 4-11: Temperaturabhängige Optimierung mit Constraints – Temperaturverläufe	28
Abbildung 4-12: Temperaturabhängige Optimierung mit Constraints – Energielastgang.....	28
Abbildung 4-13: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur höher als die Eintrittstemperatur ist und die Drehrohrofen-Austrittstemperatur berücksichtigt wird	29
Abbildung 4-14: OEMOF-Modell Temperaturabhängigkeit bezogen auf Austrittstemperatur	30
Abbildung 4-15: Optimierung in Abhängigkeit von Austrittstemperatur – Temperaturverläufe	31
Abbildung 4-16: Optimierung in Abhängigkeit von Austrittstemperatur – Energielastgang	31
Abbildung 4-17: Finales OEMOF-Gesamtmodell	32
Abbildung 5-1: Zusammenhang von MIPGap zu Optimierungsergebnis im Balkendiagramm dargestellt	39
Abbildung 5-2: Zusammenhang von MIPGap und Rechendauer	40
Abbildung 5-3: SSD: Energiekosten.....	46
Abbildung 5-4: SSD: Temperaturverläufe Prozessplan	47
Abbildung 5-5: SSD: Temperaturverläufe Optimierung	47
Abbildung 5-6: SSD: Materialdurchsatz Prozessplan	48
Abbildung 5-7: SSD: Materialdurchsatz Optimierung	48
Abbildung 5-8: SSD: Energielastgang Prozessplan	49
Abbildung 5-9: SSD: Energielastgang Optimierung	49
Abbildung 5-10: SSD: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts).....	51

Abbildung 5-11: SSD: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts).....	52
Abbildung 5-12: LSD – Sommer: Energiekosten.....	53
Abbildung 5-13: LSD – Sommer: Temperaturverläufe Prozessplan	54
Abbildung 5-14: LSD – Sommer: Temperaturverläufe Optimierung	54
Abbildung 5-15: LSD – Sommer: Materialdurchsatz Prozessplan	55
Abbildung 5-16: LSD – Sommer: Materialdurchsatz Optimierung	55
Abbildung 5-17: LSD – Sommer: Energielastgang Prozessplan	56
Abbildung 5-18: LSD – Sommer: Energielastgang Optimierung	56
Abbildung 5-19: LSD – Sommer: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts).....	57
Abbildung 5-20: LSD – Sommer: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)	58
Abbildung 5-21: LSD – Winter: Energiekosten	59
Abbildung 5-22: LSD – Winter: Temperaturverläufe Prozessplan	59
Abbildung 5-23: LSD – Winter: Temperaturverläufe Optimierung	60
Abbildung 5-24: LSD – Winter: Materialdurchsatz Prozessplan	60
Abbildung 5-25: LSD – Winter: Materialdurchsatz Optimierung	61
Abbildung 5-26: LSD – Winter: Energielastgang Prozessplan	61
Abbildung 5-27: LSD – Winter: Energielastgang Optimierung	62
Abbildung 5-28: LSD – Winter: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts).....	62
Abbildung 5-29: LSD – Winter: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)	63
Abbildung 5-30: LSD – Wartung: Temperaturverläufe Prozessplan	64
Abbildung 5-31: LSD – Wartung: Temperaturverläufe Optimierung	64
Abbildung 5-32: LSD – Wartung: Materialdurchsatz Prozessplan	65
Abbildung 5-33: LSD – Wartung: Materialdurchsatz Optimierung	65
Abbildung 5-34: LSD – Wartung: Energielastgang Prozessplan	66
Abbildung 5-35: LSD – Wartung: Energielastgang Optimierung	66
Abbildung 5-36: LSD – Wartung: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts).....	67
Abbildung 5-37: LSD – Wartung: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)	68

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4-1: Verwendete Python-Bibliotheken.....	16
Tabelle 4-2: Bezeichnung und Beschreibung der allgemeinen Eingabewerte für die Optimierung des OEMOF-Modells	35
Tabelle 4-3: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Materialspezifikationen des OEMOF-Modells	35
Tabelle 4-4: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Eingabe-Verlaufsprofile des OEMOF-Modells	36
Tabelle 4-5: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Drehrohrofenspezifikationen des OEMOF-Modells	36
Tabelle 4-6: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Spezifikationen der OEMOF-Komponenten	37
Tabelle 5-1: Materialparameter für die Szenarien mit Quellenangabe	41
Tabelle 5-2: Wichtigste Parameter-Einstellungen der Szenarien	42
Tabelle 5-3: Wichtigste Input- und Outputparameter bei vorgegebenem Prozessplan und Optimierung ..	44
Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Szenarien	69
Tabelle 5-5: Durchschnittliche elektrische Stromkosten der berechneten Szenarien	70
Tabelle 5-6: Ausnutzungsgrad des Drehrohrofens-Abgases in Abhängigkeit zur Temperaturanforderung	71
Tabelle 8-1: Parameter-Werte für Szenarien.....	78
Tabelle 8-2: Quellenangabe und Zusatzinformationen zu Parameter-Werten	80

1 EINLEITUNG

Im folgenden Kapitel wird auf die aktuelle Situation der energieintensiven Wertstoffaufbereitung eingegangen und die dort auftretenden Herausforderungen beleuchtet. Aus diesen wird folgend ein Projektziel für die Arbeit definiert und die Vorgehensweise für das Erreichen dieses Zieles festgelegt. Abschließend wird der Aufbau der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein kurzer Einblick in das Unternehmen Seccon GmbH gegeben.

1.1 Ausgangssituation

Die europäischen CO₂-Reduktionsziele können nur mit signifikanten Verbesserungen von privaten und industriellen Anwendungen und Prozessen erreicht werden. Der industrielle Wärmesektor spielt bei der Erreichung dieser Klimaziele eine wesentliche Rolle, da der Großteil der Wärmeerzeugung in Europa aus fossilen Energiequellen stammt (ca. 75 %). Eine Dekarbonisierung kann bspw. durch die Steigerung der Prozesseffizienz, dem Einsatz von erneuerbaren Energien oder der Nutzung von Abwärme (in der Europäischen Union fallen ca. 3.000 TWh pro Jahr an) vorangetrieben werden. [1]

Auch die Kreislaufwirtschaft von Rohstoffen stellt eine Möglichkeit dar, um den Primärenergieeinsatz, und somit die entstehenden Emissionen, zu verringern. Das Recycling von Wertstoffen aus Abfallprodukten gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. In vielen Fällen können durch die Verarbeitung von Abfall wertvolle Sekundärrohstoffe gewonnen werden, was einen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteil erwirkt. Das gilt vor allem für Wertstoffe, deren Herstellung aufwendig ist, bzw. bei denen Ressourcenknappheit besteht. [2]

Die Aufbereitung der Wertstoffe erfolgt über mechanische, chemische oder thermische Verfahren. Erstere liefern meist Produkte mit einem schlechten Reinheitsgrad, wohingegen letztere energieintensiv sind, wodurch die Prozesskosten ansteigen. An diesem Punkt setzt die Seccon GmbH (im folgenden Seccon bezeichnet) an und entwickelt ein Verfahren, das den gängigen Aufbereitungsprozessen in den Bereichen der Energie- und Emissionseffizienz überlegen ist, ohne dabei an Produktqualität zu verlieren. [2]

Das von Seccon eingereichte Patent für ein „Verfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Recycling-Objekten“ stellt einen Prozess dar, bei dem Abfall thermisch aufbereitet wird. Die dafür benötigte Wärme wird aus einer nebenstehenden thermischen Produktionsanlage bezogen, bei der Abwärme anfällt. Dies garantiert eine kosten- und emissionseffiziente Aufbereitung von Wertstoffen durch Abgas, welches sonst nicht genutzt würde. [2]

Seit Sommer 2023 betreibt Seccon eine Pilotanlage auf dem Firmengelände in Pettenbach, Oberösterreich, mit dem das patentierte Verfahren getestet und für die praktische Anwendung weiterentwickelt wird. Parallel dazu soll eine Energieflussoptimierung für die vorhandene und zukünftige Anlagen durchgeführt werden, mit der ein energie- und materialeffizienter Betrieb sichergestellt wird.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines generischen Energiemodells, mit dem der zeitlich aufgelöste Energieverbrauch des Verfahrens abgebildet, untersucht und optimiert werden kann. Damit können mögliche Optimierung-Potentiale errechnet werden und dem Unternehmen dabei helfen, die bestehende Anlage effizienter zu betreiben, bzw. zukünftige Anlagen energie- und kostenoptimiert auszulegen. Ein weiterer Teil dieser Arbeit ist die Aufarbeitung der theoretischen Hintergrundinformationen und die Beschreibung des Patentes von Seccon.

Da die bestehende Pilotanlage beim Abschluss dieser Arbeit noch getestet und konfiguriert wird (Stand Winter 2023/2024), werden im realen Betrieb ausschließlich Kaffeekapseln pyrolysiert. Für zukünftige Verfahren plant Seccon verschiedene Materialien aufzubereiten und an den bestehenden Marktbedarf anzupassen. Es soll daher ein Python-Tool entwickelt werden, mit dem der zeitlich aufgelöste Betrieb einer solchen Anlage energetisch dargestellt werden kann. Dies hilft bei der Erstellung eines Prozessplanes und einer Energie- und somit Kostenreduktion. Das Modell soll generisch erstellt werden, damit im Laufe des Projektes (und für zukünftige Projekte) das Grundgerüst gesetzt ist, die spezifischen Daten eingesetzt werden können und die Berechnung durchgeführt werden kann.

Die Untersuchung der möglichen direkten Nachnutzung der Prozess-Produkte würde den Rahmen der Arbeit überschreiten und stellt deshalb keines der Ziele dar. Parallel zur vorliegenden Arbeit laufen weitere Projekte, um den chemischen und verfahrenstechnischen Prozess in Aspen PLUS darzustellen und mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes anlagenspezifische Kennlinien zu generieren. Auch diese Untersuchungen werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Zu Beginn der Arbeit wird eine Literaturrecherche zur thermischen Abfallaufbereitung, Drehrohröfen und ähnlichen Anlagenkonzepten durchgeführt. Die Dokumentation von OEMOF wird beleuchtet, um den grundsätzlichen Aufbau und die Vorteile des Paketes zu erklären. Ein Lokalaugenschein der realen Anlage wird durchgeführt, um den Ablauf des Prozesses und den Aufbau der Anlage zu verstehen und darauf aufbauend ein Modell zu entwickeln.

Im zweiten Schritt wird ein generisches Modell erstellt, welches die Hauptelemente des patentierten Verfahrens enthält. Zu diesem Modell werden in den folgenden Schritten Nebenbedingungen und zusätzliche OEMOF-Komponenten hinzugefügt, um den untersuchten Prozess möglichst realistisch darzustellen. Eine erste Energieoptimierung wird durchlaufen und dem Unternehmen präsentiert.

Nach Absprache mit Seccon und dem Projektteam werden Ergebnisse festgelegt, die das finale Modell erreichen soll. Es werden Emissionsbegrenzungen implementiert und Nebenbedingungen entwickelt, damit ein material- und temperaturabhängiger Betrieb des Drehrohröfens ermöglicht wird.

Um realistische Auswertungen zu erzielen, werden die benötigten Eingabedaten und -parameter in Absprache mit Seccon beschafft. Da die Anlage zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht im regulären Betrieb läuft, können nicht alle benötigten Daten für das Energiemodell zur Verfügung gestellt werden. In diesen Fällen werden Werte aus Fachliteratur und dem Lehrstuhl zugänglichen Datenbanken herangezogen. Die Quellen dieser Werte werden durch Zitate gekennzeichnet.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit wird in sechs Kapiteln unterteilt. Im ersten wird die Ausgangssituation und die Problemstellung erläutert, die Projektziele werden gesetzt und die methodische Vorgehensweise wird beschrieben. Außerdem wird die Firma Seccon vorgestellt.

Die theoretischen Hintergründe zum Patent und dem Verfahren von Seccon werden beschrieben. Dafür wird auf die technische Bedeutung des neu entwickelten Verfahrens eingegangen und ein Überblick über Drehrohröfen gegeben. Auf diesen Informationen aufbauend folgen zwei Ausführungsbeispiele des Patentes. Im zweiten Theorieteil wird die OEMOF-Bibliothek vorgestellt, welche für die Modellierung verwendet wird. Dabei wird eine Einleitung zur allgemeinen computergestützten Modellierung gegeben, der Aufbau und

Nutzen von OEMOF wird erläutert und die darin enthaltenen Komponenten, Klassen und Constraints werden beschrieben.

Im ersten praktischen Teil wird die Modellerstellung behandelt. Die verwendeten Python-Bibliotheken und die technischen Eckdaten der Programmierung und Berechnung werden aufgeführt. Das Energiesystem wird auf Basis des Patentes von Seccon allgemein beschrieben und ein erstes Modell wird erstellt. Um die Emissionen der betrachteten Anlage zu begrenzen, werden Randbedingungen entwickelt und im Programm implementiert. Weiters werden Nebenbedingungen hinzugefügt, um die Temperaturabhängigkeit der Anlage in der Optimierung zu berücksichtigen. Die entwickelten Constraints werden dem Python-Code hinzugefügt und ein finales Gesamtmodell wird erstellt. Es wird ein Überblick über die benötigten Eingabeparameter und -daten gegeben.

Im empirischen Teil werden vier Szenarien optimiert und analysiert. Vor dieser Berechnung wird die Rechendauer der Optimierung, in Abhängigkeit zur Ergebnisgüte, untersucht. Das erste Szenario betrachtet die bestehende Pilotanlage, die anderen drei eine geplante Großanlage. Dabei wird für jedes Beispiel jeweils eine Berechnung mit vorgegebenem Prozessplan durchgeführt und ein Prozessplan vom Optimierer berechnet. Diese beiden Ergebnisse werden analysiert und miteinander verglichen. Für jedes Szenario wird die Betrachtung der Energiekosten, der Temperaturverläufe, des Materialdurchsatzes, des Energielastgangs, der verbrauchten Gesamtenergiemenge und des Gewinnsteigerungspotentials durchgeführt. Die Simulationsergebnisse der Szenarien werden miteinander verglichen und abschließend wird für jedes Beispiel ein durchschnittlicher Energiepreis und der Ausnutzungsgrad des Drehrohrofens errechnet.

Am Ende der vorliegenden Arbeit wird auf die Probleme und Herausforderungen der betrachteten Modellierung eingegangen, die Ergebnisse werden zusammengefasst und ein Ausblick für zukünftige Anwendungen des Modells wird gegeben.

1.5 Die Seccon GmbH

Die Seccon GmbH (im Patent seccon e.U.) ist ein oberösterreichisches Startup-Unternehmen, das von DI Jürgen Secklehner und DI Anton Secklehner gegründet wurde. Das Ziel des Unternehmens ist die Entwicklung einer Anlage zur Aufbereitung von Wertstoffen, basierend auf dem firmeneigenen Patent.

Auf dem Betriebsgelände in Pettenbach wurde eine Pilotanlage errichtet und in Betrieb gesetzt. Das Ziel von Seccon ist die Nutzung von überschüssiger Abwärme aus thermischen Verfahren für die Pyrolyse von Abfallstoffen. Dies garantiert eine ökonomische und annähernd CO₂-neutrale Aufbereitung von Wertstoffen und stellt somit einen wichtigen Schritt dar, um eine klimaneutrale Abfallwirtschaft für die Zukunft zu etablieren.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit werden die letzten Tests an der Pilotanlage durchgeführt. In den weiteren Projektschritten ist ein kontinuierlicher Betrieb dieser kleinen Anlage vorgesehen, um wertvolle Abfälle (v. a. Kaffeekapseln) aus der Region zu verarbeiten. Parallel dazu werden Verhandlungen mit nationalen und internationalen Betrieben geführt, um Großanlagen an anderen Standorten zu errichten und in Zusammenarbeit mit diesen Partnern zu betreiben. Durch die Vorarbeit an der Pilotanlage und die Erstellung der vorliegenden Arbeit können die Herausforderungen solcher „Scale-Up-Prozesse“ eingeschätzt und bewältigt werden.

2 PATENT UND VERFAHREN VON SECCON

Dieser Arbeit liegt eine Patentanmeldung aus dem Jahr 2017 zu Grunde. Ein neues „Verfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Recycling-Objekten“ wurde von Ing. Jürgen Secklehner erfunden und durch sein Unternehmen seccon e.U. patentiert. Veröffentlicht wurde das Patent am 15.02.2019 unter der Patentnummer AT 520225 A2 2019-02-15. In den folgenden Kapiteln wird die technische Bedeutung der Erfindung erläutert, ein kurzer Einblick in die verwendete Anlagenart gegeben und anhand zweier Skizzen werden Möglichkeiten für den Aufbau eines solchen Verfahrens beschrieben. [2]

2.1 Technische Bedeutung

Da Abfallprodukte meist aus mehreren unterschiedlichen Materialien bestehen – formschlüssig oder materialschlüssig miteinander verbunden – ist deren Aufbereitung nur erschwert möglich. Vor dem eigentlichen Aufbereitungsschritt muss eine grobe Trennung des Abfalls durchlaufen werden. Dabei kommen bspw. mechanische oder magnetische Trennverfahren zum Einsatz. Zerkleinerungsvorgänge, wie das Schreddern, werden zusätzlich eingesetzt, um große Abfallfraktionen aufzubereiten. [2]

Diese groben Aufbereitungsmaßnahmen entfernen jedoch keine Verunreinigungen der Wertstoffe. Diese bestehen meist aus organischen Bestandteilen, wie Beschichtungen oder Lackierungen, Kunststoff- oder Gummi, oder auch biologischen Verunreinigungen. Um die Wertstoffe erlösbringend verkaufen zu können, muss ein hoher Reinheitsgrad des Endproduktes erzielt werden. Zur Entfernung der Verunreinigungen können mechanische Reinigungsverfahren, wie Bürsten oder Abschmiegeln, oder auch mechanische bzw. chemische Trennverfahren, wie Sieben oder Sedimentieren, zum Einsatz kommen. Eine weitere Methode – die in dieser Arbeit behandelt wird – nutzt das Abschwelen und Abbrennen der organischen Bestandteile. [2]

Die obengenannten Verfahren sind jedoch mit einem erheblichen Arbeits- und/oder Energieaufwand verbunden und ein Teil des Wertstoffes geht verloren, was auf Abrieb oder unvollständige Abtrennung von Verunreinigungen zurückzuführen ist. An diesem Punkt setzt das Patent von Seccon und die vorliegende Arbeit an. Ein innovatives Verfahren wird entwickelt, das eine kosten- und energieeffiziente Aufbereitung der Abfallprodukte ermöglicht, indem es anfallende Abwärme aus einem parallel laufenden Prozess für die Aufbereitung nutzt. [2]

Zum Einsatz kommen Abfallprodukte, die organische Verunreinigungen aufweisen. Diese werden einer thermischen Aufbereitung unterzogen, wobei die Energie dafür aus dem Abgas einer nebenstehenden thermischen Produktionsanlage entnommen wird. Die organischen Bestandteile können entweder pyrolysiert (unter Sauerstoffausschluss) oder verbrannt (mit Sauerstoff im Heißgas) werden. Diese flexible Fahrweise garantiert eine kosten- und energieeffiziente Möglichkeit, Wertstoffe mit hohem Reinheitsgrad zu erhalten. [2]

Ein zusätzlicher Vorteil der Verwendung des Abgases aus einer nebenstehenden Anlage ist die (teilweise) Vermeidung der Entsorgung desselben. Möglich ist auch eine Rückleitung des Pyrolysegases in einen nebenstehenden thermischen Prozess, um den kalorischen Energiegehalt der Produktgase zu nutzen. Außerdem kann überschüssiges Abgas durch die Abgasreinigungsanlage des nebenstehenden Betriebs geleitet werden, wodurch weitere Kosten eingespart werden. [2]

Die Aufbereitungsanlage kann in einem Temperaturbereich zwischen 200 °C und 900 °C gefahren werden. Die Betriebstemperatur hängt vom zu verarbeitenden Abfallprodukt ab. Der Sauerstoffgehalt des nutzbaren Abgases der nebenstehenden Anlage kann ebenfalls auf den zu verarbeitenden Wertstoff angepasst werden. Bei nicht brennbaren Stoffen, wie Kohlenstofffasern oder Edelmetallen, kann ein hoher Sauerstoffgehalt von Vorteil sein, bei dem die organischen Verunreinigungen verbrannt werden. Bei brennbaren oder unedlen

Wertstoffen ist die Zersetzung der Verunreinigungen unter Sauerstoffausschluss anzuwenden. Bei letzterem muss darauf geachtet werden, dass der Sauerstoffanteil des Abgases aus der nebenstehenden Anlage möglichst gering ist. [2]

Die nebenstehende Anlage kann einen beliebigen thermischen Prozess fahren, bei dem Abwärme entsteht. Beispiele dafür sind Müllverbrennungsanlagen, metallverarbeitende Betriebe oder chemische Prozessanlagen. Zur Aufbereitung der Wertstoffe kann jedwede Vorrichtung eingesetzt werden, welche für Pyrolyse und/oder Verbrennung konzipiert ist. Bevorzugt – und in dieser Arbeit behandelt – wird ein direkt oder indirekt beheizter Drehrohrofen, der für die Pyrolyse konzipiert ist. [2]

2.2 Drehrohrofen

Drehrohrofen kommen bei der thermischen Aufbereitung von granularem oder stückigem Material zum Einsatz. Es können Korngrößen von einigen Mikrometern bis hin zu einem Meter verarbeitet werden. Ein Drehrohrofen besteht aus einem sich drehenden, leicht geneigten Rohr, in dem die eingegebenen Materialien kontinuierlich aufbereitet werden. Drehrohrofen sind für die Aufbereitung verschiedenster Materialien einsetzbar, laufen im kontinuierlichen Betrieb und können je nach Bauart Temperaturen von 50 °C bis 1.500 °C annehmen. Durch diese Flexibilität können verschiedene thermische Prozesse, wie u. a. Trocknung, Pyrolyse oder Kalzination durchlaufen werden. [3]

Eine schematische Darstellung eines Drehrohrofens und der Materialbewegung in der Anlage wird in Abbildung 2-1 gezeigt. Durch die Drehung des Rohres wird das Material in Drehrichtung auf einer Seite angehoben, wie die linke Skizze zeigt. Beim Erreichen des sog. oberen Schüttwinkels rutscht das Material in einer schmalen Schicht wieder abwärts, wo es auch eine axiale Bewegung durchläuft. Analog zu Flüssigkeiten, fällt die Betthöhe in Abhängigkeit der axialen Position im Ofen ab, wie in der rechten Skizze dargestellt. [3]

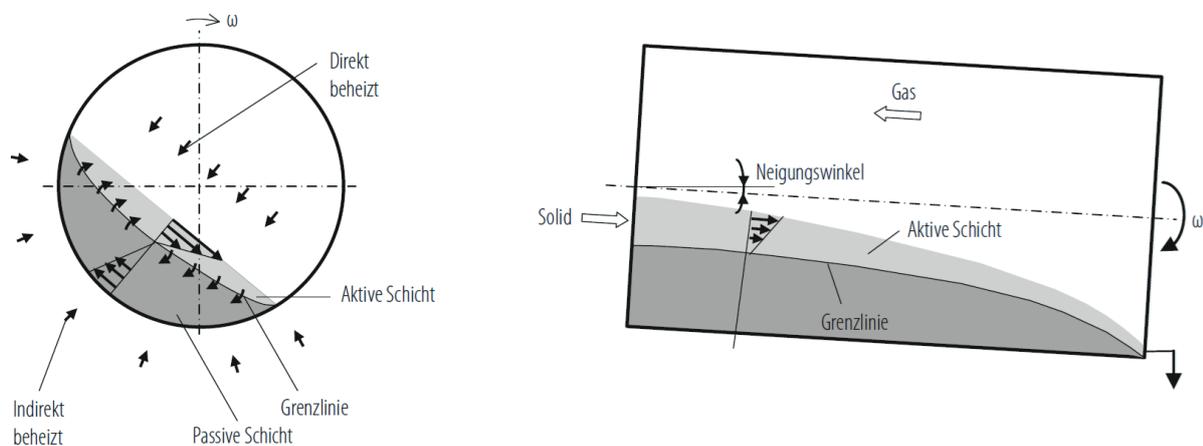


Abbildung 2-1: Skizzierte Stoffbewegung im Drehrohrofen [3]

Der konvektive Wärmeübergang durch das Prozessgas im Drehrohrofen ist relativ gering, da nur die obere Materialschicht davon betroffen ist. Bei Hochtemperaturprozessen läuft der Wärmeübergang deshalb zum großen Teil durch Strahlung ab. Die Wärme kann dem Ofen entweder durch direkte (Prozessgas im Ofen) oder durch indirekte Beheizung (Wärmeübertrager am Ofenmantel bzw. durch Rohre im Ofen) zugeführt werden. In Abbildung 2-2 ist die direkte Beheizung des Drehrohrofens durch einen Brenner dargestellt. [3]

Der allgemeine Aufbau eines Drehrohrofens kann anhand von Abbildung 2-2 erklärt werden. Die Dosiervorrichtung am Ofeneingang sorgt für eine kontinuierliche Eingabe des Materiales. Durch die

Längsbewegung wird das Material durch das beheizte Rohr bis an den sog. Ofenkopf transportiert und in dieser Zeit aufbereitet. Der Ofenkopf dichtet das Drehrohr-Innere von der Atmosphäre ab, damit ein unerwünschter Lufteinlass verhindert wird. Die Beheizung erfolgt entweder im Gegenstrom (wie dargestellt) oder im Gleichstrom, also in Materialflussrichtung. [3]

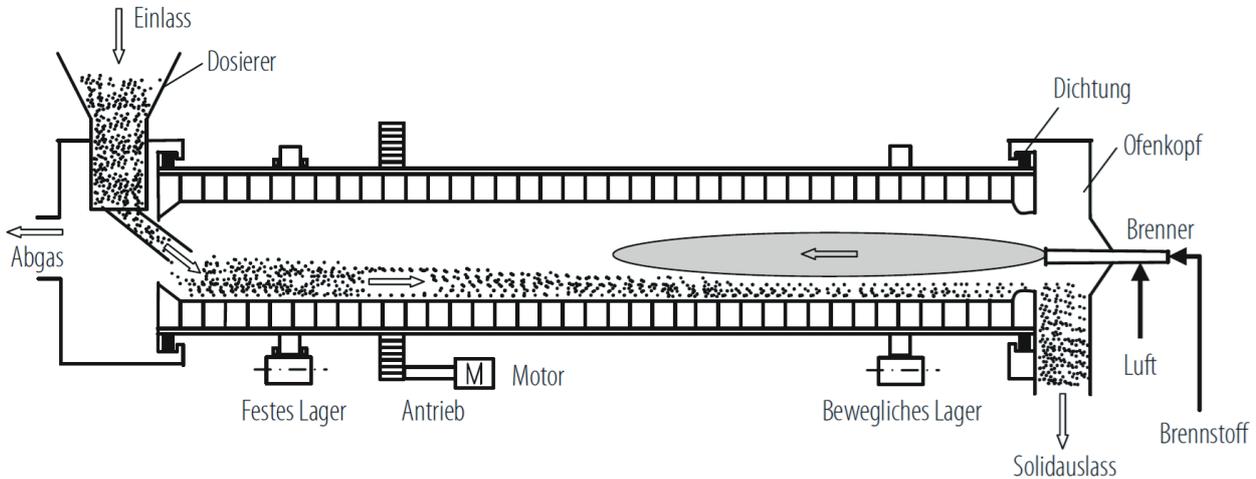


Abbildung 2-2: Längsschnitt eines direkt beheizten Drehrohres [3]

Die Wärmezufuhr erfolgt durch Verbrennung von Erdgas, Öl oder festen Brennstoffen im Ofenraum oder durch indirekte Wärmezufuhr von elektrischen Heizelementen, Sattedampf oder Verbrennungsgas. In dieser Arbeit wird eine neue Beheizungs-methode behandelt, bei der Abwärme eines nebenstehenden thermischen Prozesses für die Wärmezufuhr genutzt wird. [3]

Industrielle Drehrohröfen können Durchmesser bis zu sechs Meter, Längen bis zu 150 Meter und einen maximalen Materialdurchsatz von 12.000 Tonnen pro Tag annehmen. Die vergleichsweise kleine Pilotanlage von Seccon besitzt einen Durchmesser von einem Meter, eine Länge von fünf Metern und bei kontinuierlicher Fahrweise einen Materialdurchsatz von zwölf Tonnen pro Tag. [3]

2.3 Ausführungsbeispiel 1

Die folgenden beiden Kapitel beschreiben Verfahrensbeispiele zum Patent von Seccon. Für eine detaillierte Beschreibung der Beispiele ist die originale Patentschrift [2] heranzuziehen. Da die juristischen Hintergründe des Patents, sowie die Patentansprüche, im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigt werden, sind diese ebenfalls dem Originaldokument zu entnehmen.

In Abbildung 2-3 ist ein beispielhafter Verfahrensaufbau, wie in der Patentschrift beschrieben, dargestellt. Die Abbildung ist aus dem Patent entnommen. Die Komponenten und Energieflüsse werden in der Abbildung durch Identifikationsnummern gekennzeichnet und in den folgenden Abschnitten entsprechend in Klammern angegeben. Die Skizze zeigt eine thermische Aufbereitungsvorrichtung (1, 4), welche Abfallprodukte (3) behandelt und daraus Wertstoffe (2) gewinnt. Der Abfall wird kontinuierlich vom Beschickungsbereich (5) zum Austragungsbereich (6) gefördert. [2]

Zur Aufbereitung der Abfallprodukte wird mindestens ein heißes Abgas einer nebenstehenden Anlage (7, 8, 10, 11) verwendet, um den Reaktionsraum (9) zu beheizen. In Abbildung 2-3 ist diese Anlage als Drehrohröfen dargestellt, in dem ein Prozess zur Herstellung von Zementklinker gefahren wird. Die Beheizung eines solchen Prozesses erfolgt bspw. durch Brennstoff aus Silos (12). Weitere Prozessvorrichtungen (bspw. Mahl-, Heiz- oder Kühlvorrichtungen) sind aus Übersichtlichkeitsgründen nicht dargestellt. [2]

Das heiße Abgas kann in zwei Durchführungsrichtungen (13) durch die Abfallaufbereitungsanlage geleitet werden. Die Einspeisung des Gases im Gegenstrom zur Abfallrichtung ist durch eine schematische Gasleitung (14) mit Richtung (15) dargestellt. Im Falle einer Gleichstromdurchführung wird das Gas durch Leitung (16) in Richtung (17) in den Drehrohrofen eingeleitet. [2]

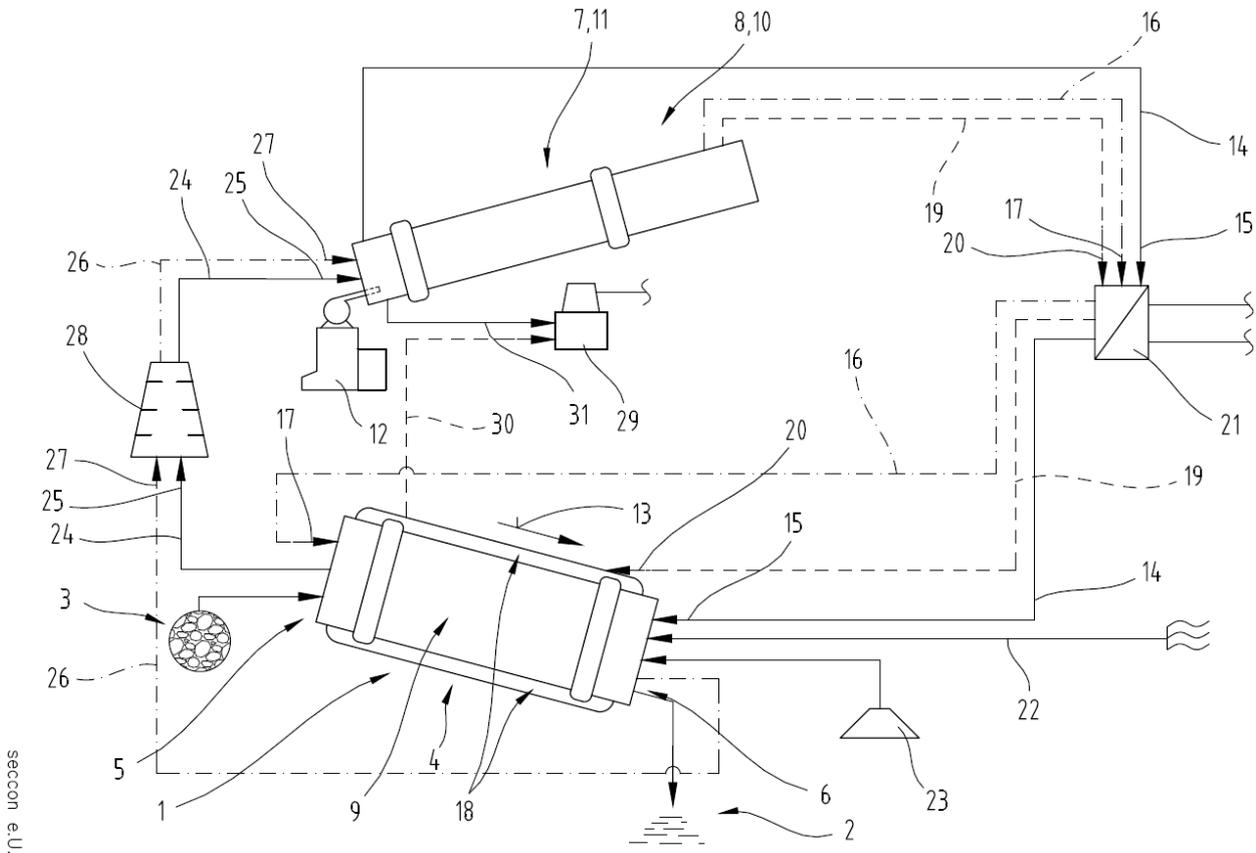


Abbildung 2-3: Patent Seccon – Anlagenskizze zum Ausführungsbeispiel 1 [2]

Alternativ kann auch eine indirekte Beheizung (18) vorgesehen sein, die bspw. als Heizmantel um das Drehrohr ausgeführt ist. Dabei ist die Gaszufuhr durch die Gasleitung (19) dargestellt, wodurch das Prozessgas in Gegenstromrichtung (20) in die Anlage eingeleitet wird. Aus Übersichtsgründen ist die Einleitung in Gleichstromrichtung nicht skizziert, jedoch analog zur direkten Beheizung möglich. [2]

Bei einer direkten Beheizung kann die Temperatur des Heißgases auch über einen Wärmeübertrager (21) nach Bedarf gesenkt werden. Beispiele dafür sind Kühltürme oder Kühlwasser-Wärmeübertrager. Zur thermischen Aufbereitung kann dem heißen Abgas auch Frischluft direkt im Reaktionsraum beigemischt werden, was durch die Frischluftleitung (22) in beide Flussrichtungen möglich ist. Dies wird v. a. bei Verbrennung der Störstoffe angewandt, da durch die Frischluft auch Sauerstoff in den Drehrohrofen gelangt. Insbesondere beim Starten der Anlage, wo große Wärmemengen benötigt werden, kann eine separate Brennervorrichtung (23) zum Einsatz kommen. [2]

Das im Drehrohrofen entstehende Abgas kann zur nebenstehenden Anlage rückgeführt werden, um dessen kalorischen Inhalt zu nutzen. Die Entnahme des Abgases im Gegenstrom erfolgt über Gasleitung (24) in Richtung (25), bei Gleichstrom über die Gasleitung (26) in Richtung (27). Bei Bedarf kann das Abgas vor der Rückführung über eine Filtervorrichtung (28) geführt werden, wodurch flüssige oder feste Rückstände entfernt werden. Bei indirekter Beheizung des Reaktionsraumes kann das Abgas durch die Gasleitung (30) in eine bestehende Abgasabfuhrvorrichtung (29) geleitet werden, falls es nicht in einem anderen Prozess

wiederverwendet werden kann. Die Abgasabführungsvorrichtung kann außerdem bei Abgasüberschuss aus der nebenstehenden Anlage verwendet werden. [2]

2.4 Ausführungsbeispiel 2

In Abbildung 2-4 ist ein weiteres Beispiel eines Verfahrens nach dem Patent dargestellt. Der Prozessaufbau ist ähnlich dem in Kapitel 2.3. Um Wiederholungen zu vermeiden, werden gleiche Komponenten entsprechend nummeriert und es wird auf die Beschreibung im Text verzichtet.

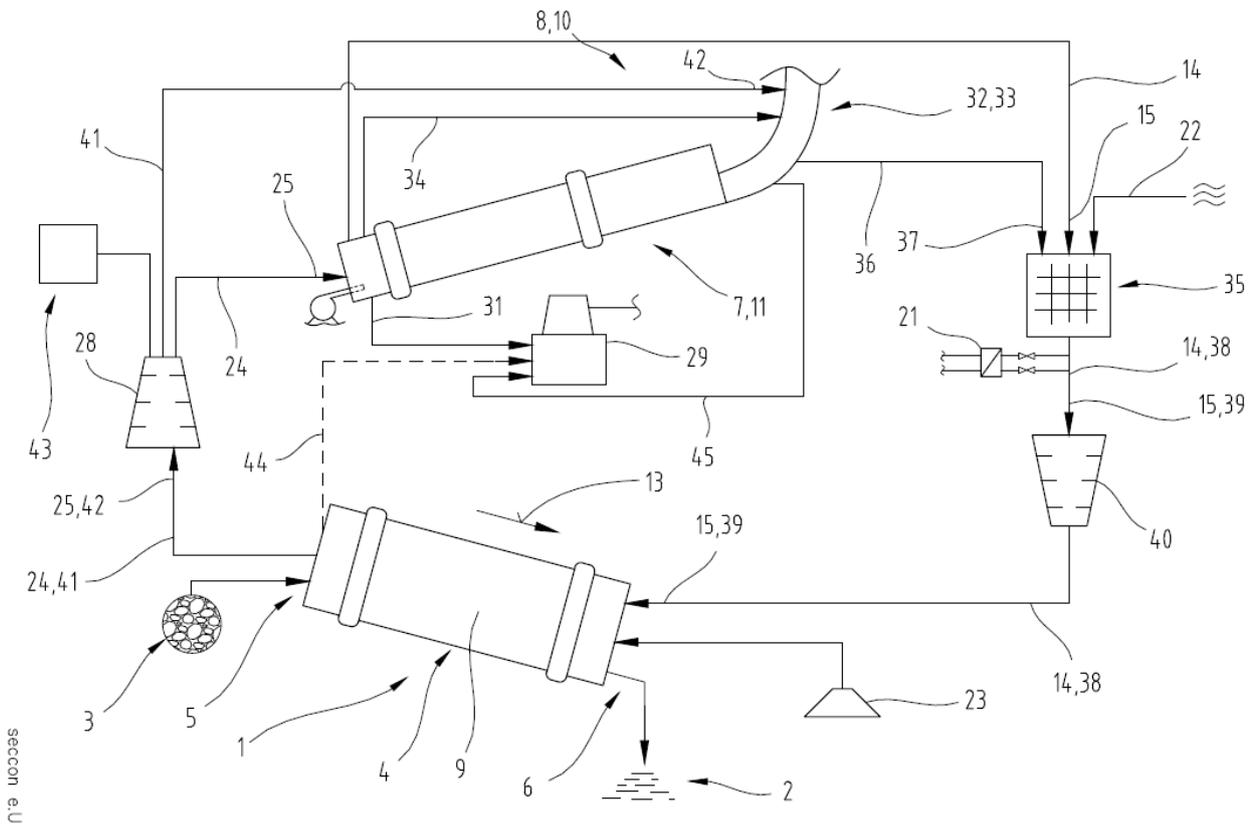


Abbildung 2-4: Patent Seccon – Anlagenskizze zum Ausführungsbeispiel 2 [2]

Ein Zusatz zum ersten Ausführungsbeispiel ist, dass ein heißes Abgas aus einer weiteren nebenstehenden Anlage oder einem Prozess (32, 33) verwendet wird, um die Abfallprodukte aufzubereiten. Je nach Bedarf des Aufbereitungsprozesses kann dabei das Gas von einer der beiden Anlagen verwendet werden, oder eine Mischung aus den beiden Abgasen. Somit kann die Temperatur des Prozessgases geregelt werden. Die Zuführung eines heißen Abgases aus dem Drehrohrofenprozess der nebenstehenden Anlage in die zweite nebenstehende Anlage ist durch die Gasleitung (34) dargestellt. [2]

Vor der Weiterleitung der heißen Abgase in die Anlage zur Abfallaufbereitung, werden sie in einer Gasmischvorrichtung (35) durchmischt. Das Gas aus dem zweiten thermischen Produktionsprozess wird über eine Gasleitung (36) in Richtung (37) in den Mischer geleitet. Anschließend kann das Gas über eine gemeinsame Leitung (38) in Richtung (39) durch eine Filtervorrichtung (40) geleitet werden, bevor es in der Abfallaufbereitungsanlage genutzt wird. Dabei kann die Temperatur des Prozessgases äquivalent zum ersten Ausführungsbeispiel durch einen Wärmeübertrager gesenkt werden. In der Gasmischvorrichtung kann außerdem die Beimengung von Frischluft über eine Frischluftleitung (22) erfolgen. [2]

Nach der Pyrolyse der Abfallprodukte kann das Pyrolysegas in einen nebenstehenden Prozess rückgeführt werden, wie im ersten Ausführungsbeispiel beschrieben, oder in einen weiteren nebenstehenden Prozess

über eine Gasleitung (41) in Richtung (42) geleitet werden. Abhängig vom jeweiligen Bedarf kann das Gas in einer beliebigen nebenstehenden Anlage (43) genutzt werden. Wenn kein Bedarf für das Abgas der Aufbereitungsanlage besteht, kann dieses über eine Gasleitung (44) in eine Abgasabführungsvorrichtung geleitet werden. Äquivalent dazu kann auch das Abgas der weiteren nebenstehenden Anlagen in die Abgasabführungsvorrichtung geleitet werden, wie durch die Gasleitung (45) dargestellt ist. [2]

3 MODELLIERUNG MIT OEMOF

Die folgenden Kapitel basieren zu großen Teilen auf den Vorlesungsnotizen von Nagel [4]. Wenn detailliertere Informationen zu OEMOF benötigt werden, wird diese Quelle empfohlen.

Die Wichtigkeit von effizienten Systemen jeglicher Art ist in den vergangenen Jahren deutlich gewachsen. Dabei sollen hohe Ressourcen-, Energie-, Emissions- und v. a. Kosteneinsparungen erreicht werden, was einerseits dem jeweiligen Betreiber zum Vorteil kommt und andererseits der Umwelt. Dafür können Computer-Modelle erstellt werden, um die bestmögliche Betriebsweise des Prozesses zu finden und Systeme unterschiedlicher Art effizienter zu führen. In den folgenden Kapiteln wird die Wichtigkeit dieser Modellierungssysteme aufgezeigt und eine Übersicht zum – in dieser Arbeit verwendeten – Tool „OEMOF“ gegeben. [5]

3.1 Allgemeine Modellierung und Einleitung in OEMOF

Auch im Bereich der Energiesystemtechnik werden seit Jahrzehnten Modelle entwickelt, die verschiedene Energieträger miteinander verknüpfen und die besten Betriebsweisen finden. So gelingt es bspw. die stark variierende Marktsituation (ausgelöst durch den Ausbau Erneuerbarer Energien) auch international so zu handhaben, dass das Energiesystem stabil bleibt und der Markt optimiert wird. Auch im kleineren Maßstab, so z. B. für ein österreichisches Bundesland oder nur für einen privaten Betrieb – wie in dieser Arbeit behandelt – lassen sich Energiesysteme modellieren und optimieren. [4, 5]

Das Ziel solcher Modelle ist nicht eine maßgeschneiderte Lösung zu finden, die in die Praxis umgesetzt werden kann. Es wird viel eher versucht ein generisches Konstrukt zu erschaffen, das die optimale Lösung in Abhängigkeit zu den Eingangsgrößen variabel berechnen kann. Außerdem sollen dabei verschiedene Parameter eingehalten werden, wie z. B. Emissionsgrenzwerte. Nagel [4] gibt dabei folgende Schlüsselfaktoren an, nach denen Energiesysteme optimiert werden sollen:

- Eine ausreichende Energieversorgung muss garantiert werden, um die Verbräuche zu decken.
- Der Einsatz und die Verteilung der Energiequellen soll so geregelt sein, dass die monetären Kosten minimiert werden.
- Der Energieeinsatz muss nachhaltig sein und einen verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen einhalten.
- Die Energieversorgung soll so wenig Einfluss auf die Gesundheit der betroffenen Bewohner haben, wie möglich.
- Alle Ressourcen sollen so effizient wie mögliche genutzt werden, um zukünftigen Generationen ein lebenswertes Dasein zu sichern.

Diese Faktoren stehen jedoch im Konflikt zueinander, deshalb sind bei der Entwicklung des Modells alle betroffenen Interessensgruppen (Politiker, Lieferanten, Verbraucher, Partner-Institutionen, ...) einzubinden, um die Wichtigkeit der Faktoren gemeinsam festzulegen. Das mathematische Modell soll optimale Lösungen für Energieverbraucher, Energieproduzenten, Energiespeicher, Markt, Bepreisung und Umwelteinflüsse liefern. Um dies zu erreichen können verschiedene Tools verwendet werden, einige Beispiele dafür sind „Calliope“ (open source), „EnergyPLAN“ (kostenloser Download) und „TIMES/MARKAL“ (kommerziell). [4, 5]

Die ersten kommerziellen Produkte zur Modellierung gewährten keine Einsicht in den Hintergrund der Berechnung, also den Aufbau des Computer-Codes. Damit konnte die Richtigkeit der Ergebnisse nicht überprüft und das Prinzip der wissenschaftlichen Reproduzierbarkeit nicht erfüllt werden. Deshalb entwickelte

sich – wie in allen wissenschaftlichen Disziplinen zu beobachten – der „open science“-Trend auch im Bereich der Modellierung und erste open-source-Modellierungspakete entstanden. Unter ihnen auch das „Open Energy Modelling Framework“ (kurz: OEMOF), das durch das „Zentrum für Nachhaltige Energiesysteme“, die „Otto von Guericke Universität“ und das „Reiner Lemoine Institut“ entwickelt wurde und geführt wird. Seit der Entstehung von OEMOF im Jahr 2014 haben zusätzlich zahllose externe Wissenschaftler und Programmierer das Paket weiterentwickelt, was durch die open-science-Mentalität ermöglicht wird. Der Quellcode kann auf der Internetseite von „GitHub“ frei eingesehen und verändert werden. [4, 5]

Das OEMOF-Paket ist in der Programmiersprache Python geschrieben und umfasst verschiedene Bibliotheken. Es kann dafür verwendet werden, um Energieerzeuger-Zeitreihen und Lastprofile zu generieren, oder um gesamte Energiesysteme zu modellieren. Im Unterschied zu anderer open-source-Software, wie „Calliope“ oder „OseMOSYS“, können durch OEMOF nicht nur spezifische vorgefertigte Energiesysteme modelliert werden, sondern es steht dem Nutzer ein generischer „Baukasten“ zur Verfügung, aus dem Elemente beliebig zusammengeschlossen werden können. Somit kann ein Energiesystem aufgebaut werden, das dem Modellierungsproblem genau entspricht. [4, 5]

Die zentrale Bibliothek des Paketes – die auch in dieser Arbeit verwendet wird – ist `oemof.solph`, welche die mathematischen Formulierungen enthält, um Energiemodelle aufzubauen und zu berechnen. OEMOF ermöglicht Modell-Optimierungen, d. h. die Lösungen geben immer Minimalwerte (bzw. Maximalwerte, wenn nötig), so z. B. die kleinst-möglichen Kosten oder Emissionswerte, für ein Problem an. [4]

3.2 Optimierung in OEMOF

Optimierungsmodelle werden in OEMOF linear oder gemischt-ganzzahlig programmiert. Die englischen Bezeichnungen dafür sind „linear programming“ (LP) und „mixed-integer linear programming“ (MILP). Die besondere Eigenschaft einer linearen Formulierung ist, dass sie meist nur ein globales Optimum besitzt, wohingegen nicht-lineare Gleichungen zusätzlich mehrere lokale Minima/Maxima besitzen können. Bei einer Betrachtung von nicht-linearen Problemen muss versucht werden, das Modell als lineares Gleichungssystem zu definieren und es durch spezifische Nebenbedingungen an den untersuchten Fall anzunähern. [4]

LP-Modelle enthalten detaillierte Informationen über die eingesetzten Technologien, Lastprofile und Kosten. Aus diesem Grund werden sie auch als „bottom-up“-Modelle bezeichnet. Ein LP-Modell besteht aus linearen Gleichungssystemen, aus denen eine konvexe Zielfunktion formuliert werden kann. Diese kann durch eine mathematische Optimierung gelöst werden, um einen minimalen oder maximalen Wert als Lösung zu erhalten. Die Zielfunktion kann durch Nebenbedingungen (engl. „constraints“) beeinflusst werden, damit die berechneten Lösungen im erwünschten Zielbereich liegen. Beispiele dafür sind Emissionsbegrenzungen oder ein Minimum der Volllaststunden. [4]

Die gemischt-ganzzahlige Programmierung (MILP) ist ein Sonderfall der linearen Optimierung. Dabei sind einige der Variablen im System sog. „integers“, nehmen also Werte aus der Menge der Ganzen Zahlen an. Ein besonderer Fall davon sind binäre Variablen, die nur die Werte 0 oder 1 annehmen können. Diese dienen bspw. als Zustandsvariable eines Kraftwerkes (0 heißt ausgeschaltet, 1 heißt in Betrieb) oder als Entscheidungsvariable für eine Investition. [4]

In der Praxis bestehen Optimierungsprobleme aus vielen verschiedenen Variablen. Um das Optimum zu berechnen müssen dafür Computer-Algorithmen verwendet werden. Der meistverbreitete Algorithmus zur Lösung dieser Probleme ist der Simplex-Algorithmus. Auch „Gurobi“, der Solver, der in dieser Arbeit verwendet wird, nutzt u. a. das Simplex-Verfahren. Der Algorithmus wird in dieser Arbeit nicht näher behandelt. Für detailliertere Informationen ist passende Fachliteratur zu konsultieren. [4]

Optimierungsprobleme können sowohl konvexe, als auch nicht-konvexe Gleichungssysteme beschreiben. Bei konvexen Lösungsmengen gibt es in der Regel genau ein globales Optimum. Durch die technischen Entwicklungen der letzten Jahre (sowohl Hardware, als auch Anwendungsbereiche wie z. B. neuronale Netzwerke), können auch nicht-konvexe Optimierungsprobleme berechnet werden. Die Lösungsfunktionen solcher Probleme heben sich von konvexen Funktionen dadurch ab, dass es nicht nur ein globales Optimum gibt, sondern zusätzlich mehrere lokale Optima. Auch in OEMOF können nicht-konvexe Funktionen in der Optimierung eingesetzt werden, wie in Kapitel 3.4 beschrieben wird. [4]

3.3 Aufbau und Nutzen von OEMOF

Die oemof.solph-Bibliothek kann alle gängigen Energieformen (Wärme, „Kälte“, Elektrizität etc.) und die dazugehörigen Erzeuger, Verbraucher, Speicher und Transportmittel modellieren. Außerdem kann das Modell in unterschiedliche geografische Regionen eingeteilt werden und die Zeitschritte der Berechnung können variabel angepasst werden. [4]

Jede Komponente des Modells wird durch ein mathematisches Gleichungssystem (linear oder gemischt-ganzzahlig) beschrieben. Dabei sind die Komponenten generisch programmiert, d. h. sie werden allgemein beschrieben, um dann erst vom Benutzer im Detail definiert zu werden. Das garantiert eine hohe Flexibilität bei der Erstellung des Modells. [4]

Die vier Hauptklassen der generischen Modellierung in OEMOF sind: [4, 6]

- Bus: Energieträger oder -form (Erdgas, Wärme, ...),
- Source: Energiequelle (Wasserkraftwerk, Gasbrenner, ...),
- Sink: Energiesenke (elektrischer Motor, Fernwärme-Einspeisung, ...),
- Transformer¹: Energieumwandler (elektrischer Transformator, Wärmepumpe, ...).

Die Bezeichnungen werden aus der Dokumentation von OEMOF entnommen und in den folgenden Kapiteln in englischer Sprache angeführt. Diese Basiselemente können erweitert werden, um spezifischere Komponenten zu erstellen. [4, 6]

Im Hintergrund wird das Modell durch Knoten („Nodes“), Kanten („Edges“) und das Energiesystem („Energy System“) beschrieben. Dabei stellen Knoten jegliche Art von Komponenten dar, so z. B. Sinks, Transformers oder Busse. Kanten stellen die Energieflüsse („Flows“) zwischen diesen Komponenten dar. Im einfachsten Fall enthalten letztere eine Startkomponente, eine Zielkomponente und einen Wert für den Energiefluss. Das Energiesystem dient als Behälter für die Knoten und enthält zusätzliche Nebenbedingungen für das Modell. So können Optimierungsparameter gesetzt werden und es wird eine Oberfläche zur Speicherung des Modells und zur Verarbeitung der Lösung geboten. [4, 5]

In Abbildung 3-1 sind diese Beziehungen in einem UML-Diagramm („Unified Modeling Language“) dargestellt. Dabei geben die Pfeile jeweils die Vererbung an. Es lässt sich erkennen, dass die Komponenten Sink, Source und Transformer Unterklassen der Klasse Component sind. Diese wiederum ist, zusammen mit den Bussen, eine Unterklasse der Klasse Node. Mehrere Nodes definieren ein Energiesystem, was die Aggregation (als Raute dargestellt) zeigt.

¹ Ab oemof.solph v0.5.1 wird die Komponente „Transformer“ in „Converter“ umbenannt. Da in der vorliegenden Arbeit noch mit oemof.solph v0.5.0 gearbeitet wird, wird die Komponente weiterhin als „Transformer“ bezeichnet. Nachzulesen im Changelog von v0.5.1 in der oemof.solph-Dokumentation [6].

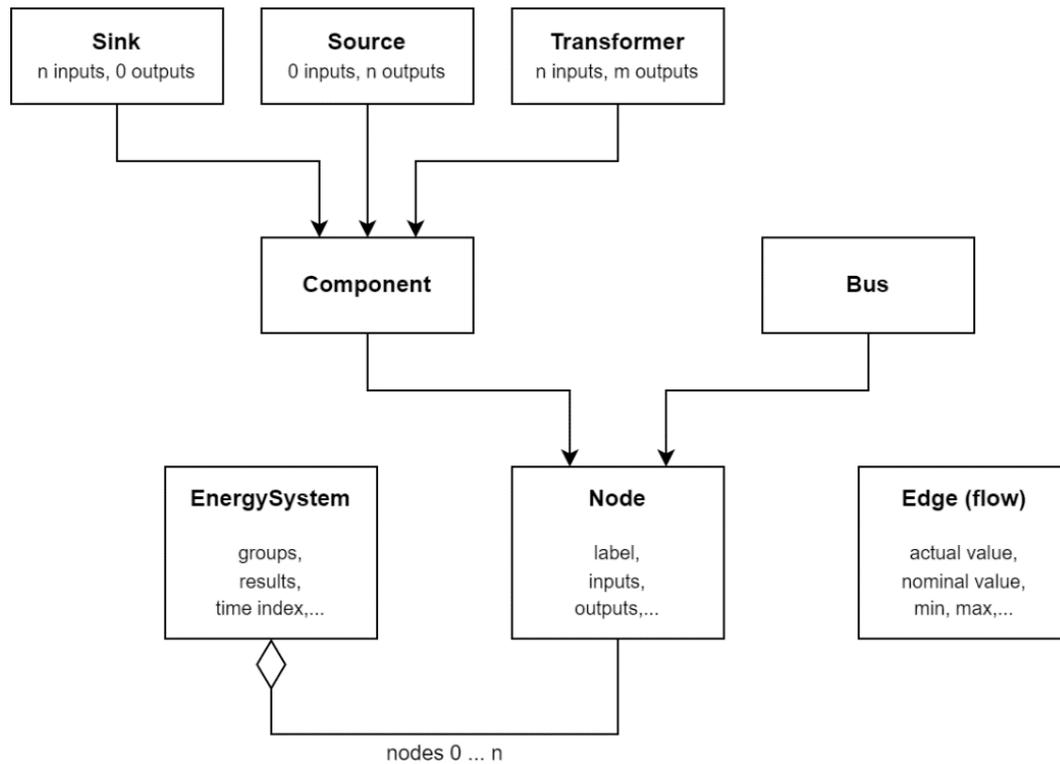


Abbildung 3-1: UML-Diagramm von OEMOF; eigene Darstellung nach [4]

Ein beispielhaftes Modell, das aus den Basiskomponenten aufgebaut ist, wird in Abbildung 3-2 dargestellt. Das Energiesystem enthält alle generischen Komponenten, in der Legende in englischer Sprache beschrieben. Die dunkelroten Ellipsen stellen die Busse dar, welche als Verbindungsglied zwischen den Basiskomponenten fungieren. Das grüne Trapez ist eine Energiesenke. Die orangen, nach unten gerichteten, Trapeze stellen die Energiequellen dar (sowohl Ressourcen, als auch „reine“ Energie) und die grauen Rechtecke sind die Energiewandler, bspw. ein Kraftwerk oder eine Pipeline. Die Komponenten sind durch die Energieflüsse, eingezeichnet als schwarze Pfeile, verbunden. Eingebettet sind alle Komponenten und Energieflüsse in ein Energiesystem, dargestellt durch das abgerundete gelbe Rechteck. [5]

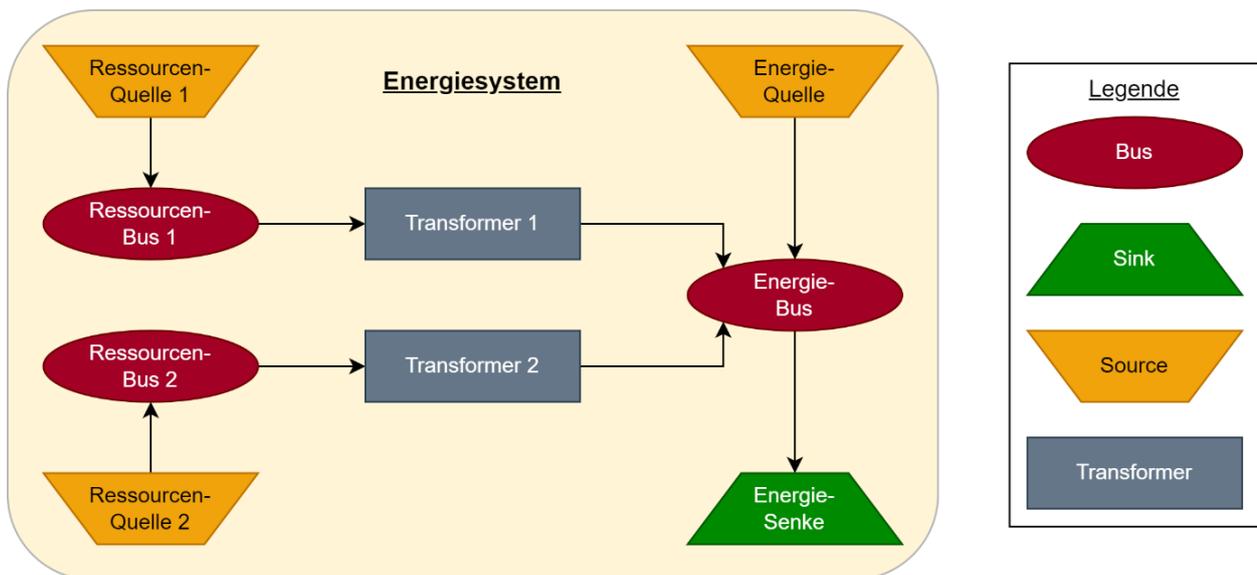


Abbildung 3-2: OEMOF-Modellbeispiel mit Basiskomponenten; eigene Darstellung nach [5]

Nach der Erstellung des Modells und der Eingabe der benötigten Parameter kann dieses einem Solver zur Lösungsfindung übergeben werden. OEMOF unterstützt Solver wie „CBC“, „GLPK“ oder der in dieser Arbeit verwendete Solver „Gurobi“. [6]

3.4 Verwendete OEMOF-Komponenten, -Klassen und -Constraints

In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Komponenten, Klassen und Randbedingungen beschrieben, mit denen das Modell aufgebaut wird. Außerdem werden die wichtigsten Attribute der Klassen beleuchtet. Im OEMOF-Paket sind vorgefertigte Randbedingungen, sog. Constraints, enthalten, die durch einfache Aufrufe in ein Modell implementiert werden können. Auch die Constraints, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend beschrieben. Für detailliertere Informationen zu den beschriebenen Klassen ist die Dokumentation von OEMOF [6] heranzuziehen. Grundlegende Kenntnisse in Python werden vorausgesetzt.

Komponente – Bus

Klasse: *oemof.solph.buses._bus.Bus*

Der Bus dient als Energieträger oder -form und stellt die Verknüpfung zwischen anderen Komponenten dar. Die Verbindung von zwei Komponenten muss immer durch Busse erfolgen. Ein Bus ist ein virtuelles Element, das als Knotenpunkt wirkt und die Summe aller Eingangsströme gleich der Summe aller Ausgangsströme setzt. In der vorliegenden Arbeit wird bei den Bussen nur das Attribut *label*, also die Identifikations-Bezeichnung der Komponente, gesetzt. [4, 6]

Komponente – Sink

Klasse: *oemof.solph.components._sink.Sink*

Ein Sink stellt eine Energiesenke/-verbraucher dar, die einen Eingangs-Fluss besitzt. Dieser ist durch das Attribut *inputs* definiert. [4, 6]

Komponente – Source

Klasse: *oemof.solph.components._source.Source*

Eine Source stellt eine Energiequelle dar, die einen Ausgangs-Fluss besitzt. Dieser ist durch das Attribut *outputs* definiert. [4, 6]

Komponente – Transformer

Klasse: *oemof.solph.components._transformer.Transformer*

Ein Transformer stellt einen Energiewandler dar. Die Energieeffizienz der Komponente kann in den *conversion_factors* angegeben werden. Bei mehreren Eingangs- oder Ausgangs-Flüssen kann dort auch der relative Anteil der Energiemengen definiert werden. [4, 6]

Klasse – Flow

Klasse: *oemof.solph.flows._flow.Flow*

Ein Flow stellt einen Energiefluss dar und verbindet zwei Komponenten miteinander. Es können Parameter wie der Nominalwert (*nominal_value*) und die variablen Energiekosten (*variable_costs*) gesetzt werden. In den *custom_attributes* können bspw. Emissionsparameter gesetzt werden. Außerdem kann die Änderung des Energieflusses in zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten begrenzt werden (*positive_gradient_limit* und

negative_gradient_limit). Bei nicht-konvexen Optimierungsproblemen kann der Flow als NonConvex-Flow definiert werden. [4, 6]

Klasse – NonConvex

Klasse: *oemof.solph._options.NonConvex*

Die NonConvex-Klasse ist keine eigenständige Komponente des Energiesystems. Sie dient als Erweiterung der Flow-Klasse, um zusätzliche Nebenbedingungen für die Optimierung zu setzen. Die wichtigsten davon sind Bedingungen für das Ein- und Ausschalten des Energieflusses (bspw. *minimum_uptime* oder *maximum_startups*) und die jeweiligen Kosten dafür (bspw. *startup_costs* oder *activity_costs*). Außerdem können Parameter für das Starten und Herunterfahren eines Energieflusses festgelegt werden. [4, 6]

Constraint – Active flow count limit

Klasse: *oemof.solph.constraints.limit_active_flow_count*

Mit dieser Randbedingung können festgelegte nicht-konvexe Energieflüsse auf eine Mindest- und Höchstanzahl von aktiven Flüssen pro Zeitschritt begrenzt werden. [6]

Constraint – Generic integral limit

Klasse: *oemof.solph.constraints.generic_integral_limit*

Mit dieser Randbedingung kann ein Maximum festgelegt werden, das für ein *keyword* gilt. Dabei soll die Summe aller angegebenen Flüsse und über alle Zeitschritte, gewichtet nach dem angegebenen *keyword*, das definierte Limit nicht überschreiten. Die *keywords* werden in den *custom_attributes* eines Energieflusses definiert. [6]

4 MODELLERSTELLUNG

In diesem ersten praktischen Teil wird die Modellerstellung behandelt. Die verwendeten Python-Bibliotheken und die technischen Eckdaten der Programmierung und Berechnung werden aufgeführt. Das Energiesystem wird auf Basis des Patentes von Seccon allgemein beschrieben und ein erstes Modell wird erstellt. Um die Emissionen der betrachteten Anlage zu begrenzen, werden Randbedingungen entwickelt und im Programm implementiert. Weiters werden Nebenbedingungen hinzugefügt, dass die Temperaturabhängigkeit der Anlage in der Optimierung berücksichtigt wird. Die entwickelten Constraints werden dem Python-Code hinzugefügt und ein finales Gesamtmodell wird erstellt. Abschließend wird ein Überblick über die benötigten Eingabeparameter und -daten gegeben.

4.1 Verwendete Python-Bibliotheken und technische Eckdaten

Das Modell der vorliegenden Arbeit wird in der Entwicklungsumgebung „Spyder“ programmiert. Dies ist eine kostenfreie, nach dem open-source-Prinzip erstellte, Programmierumgebung, die vor allem für Wissenschaftler und Ingenieure entwickelt wurde. Spyder wird mit Hilfe von „Anaconda“ installiert, welches eine grafische Benutzeroberfläche darstellt, mit der die verschiedenen Entwicklungsumgebungen verwaltet und angepasst werden können. [4]

Eine solche Entwicklungsumgebung kann für jedes Projekt individuell erstellt und bei Bedarf auch im Nachhinein wieder reproduziert werden. In der vorliegenden Arbeit wird dafür die Python-Version 3.11.3 verwendet. Die zusätzlich installierten und verwendeten Bibliotheken sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Verwendete Python-Bibliotheken

Bezeichnung	Version	Kurzbeschreibung
dill	0.3.6	Variablenspeicherung
matplotlib	3.7.1	Grafische Datendarstellung
numpy	1.24.3	Array-Bearbeitung
oemof.solph	0.5.0	Modellieren von Energiesystemen
pandas	2.1.3	Datenanalyse und -bearbeitung
pyomo	6.6.1	Formulieren von Optimierungsproblemen

Die Berechnungen werden alle auf einem „Dell G15“-Laptop durchgeführt. Das Gerät besitzt einen Arbeitsspeicher von 16 Gigabyte und einen „Intel Core i7“-Prozessor der elften Generation.

4.2 Allgemeine Modellbeschreibung

Bevor ein OEMOF-Modell erstellt werden kann, muss das zu untersuchende Energiesystem definiert werden. Im folgenden Kapitel wird der vereinfachte Aufbau des Energiesystems behandelt und erklärt. In Abbildung 4-1 sind die Stoff- und Energieflüsse des Systems dargestellt.

Das Hauptelement des Energiesystems ist der Drehrohrofen, in dem die Aufbereitung erfolgt. Der aufzubereitende Abfall wird in das System hineingegeben und erfordert je nach Beschaffenheit und

chemischen Eigenschaften unterschiedliche Fahrweisen der Anlage. Einstellende Parameter sind bspw. die Temperatur, die Durchflussrate oder die benötigte Energiemenge pro Materialdurchsatz.

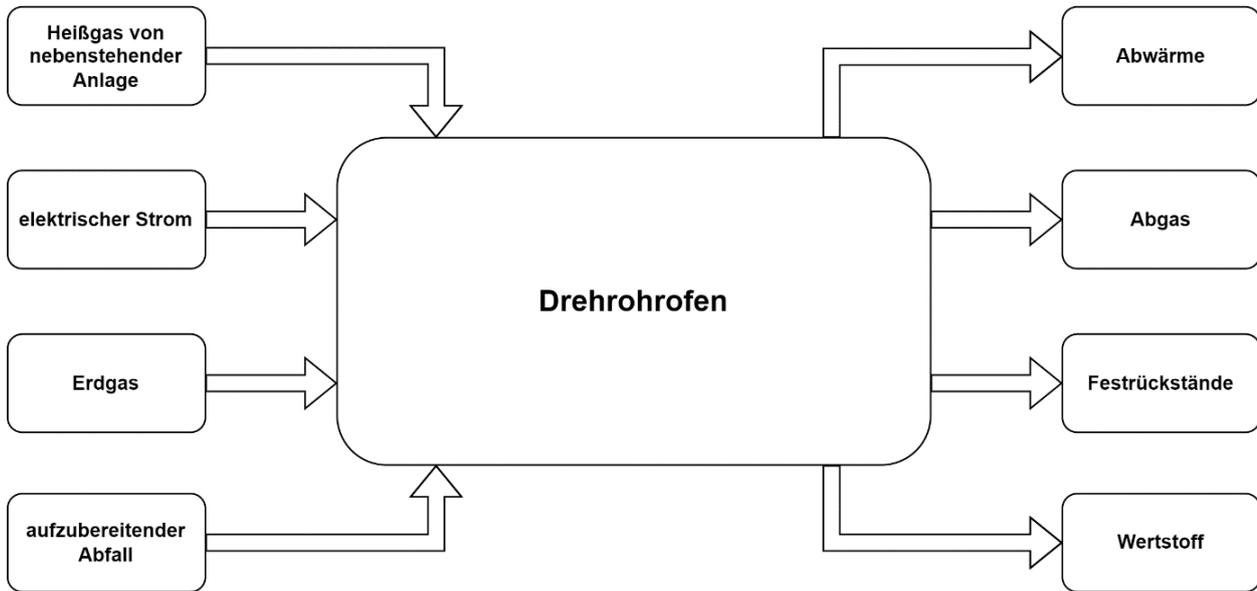


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des untersuchten Energiesystems

Die zweite wichtige Inputgröße ist die Energie. Um die Materialien aufzubereiten, wird Wärme benötigt. Diese kann konventionell von Elektroheizungen oder Gasbrennern bereitgestellt werden oder, wie von Seccon beschrieben, durch Abwärme einer nebenstehenden thermischen Anlage. Durch die Firmenpolitik von Seccon und deren Null-Emissions-Ziel wird keine Wärme aus der Verbrennung von Erdgas bereitgestellt. Ausschließlich bei Startvorgängen des Drehrohrofens dürfen Gasbrenner zum Einsatz kommen. In der Praxis soll der Großteil der Wärmemenge von der nebenstehenden Anlage bezogen werden. Für Temperaturerhöhungen kann eine Elektroheizung bzw. entstehendes Pyrolysegas genutzt werden.

Nach der Aufbereitung der Abfallmenge verlassen die Wertstoffe den Drehrohrofen als reine Sekundärrohstoffe zusammen mit festen Rückständen, welche abgetrennt werden. Das Abgas, welches zur Aufbereitung genutzt wurde, verlässt ebenfalls das System, zusammen mit den gasförmigen Anteilen aus der Verbrennung bzw. Pyrolyse. In diesem Abgas ist auch nicht genutzte Abwärme enthalten, die das System verlässt.

Aufbauend auf dem vereinfachten Flussdiagramm in Abbildung 4-1 kann ein erstes OEMOF-Modell entwickelt werden, auf dessen Basis weitere Ergänzungen hinzugefügt werden können. Dabei zu beachten ist, dass OEMOF nur Energieflüsse und keine Materialflüsse darstellen und modellieren kann. In Abbildung 4-2 ist eine Skizze zum Modell dargestellt. Die Darstellung der Komponenten erfolgt wie in Kapitel 3.3.

Die drei Energieflüsse, die in das System einfließen, sind im oberen Teil von Abbildung 4-2 eingezeichnet. Das Heißgas der nebenstehenden thermischen Anlage kann (abhängig von den benötigten Prozessbedingungen) in einem Wärmeübertrager gekühlt werden, wodurch ein Teil der Wärme an die Umgebung abgeführt wird. Das Erdgas wird in einem Gasbrenner verbrannt und der elektrische Strom kann über eine Elektroheizung in Wärme umgewandelt werden.

Die zugeführte Wärmemenge kann dafür verwendet werden, um den Drehrohrofen zu beheizen und um die Materialien aufzubereiten. Abhängig von der Anlagen-Effizienz verlässt ein Teil der zugeführten Wärme das System, ohne für den Prozess genutzt zu werden. Außerdem wird abhängig vom Material- und

Heißgasdurchsatz elektrische Energie benötigt und in mechanische Energie umgewandelt, bspw. um den Ofen zu rotieren oder das Heißgas zu transportieren.

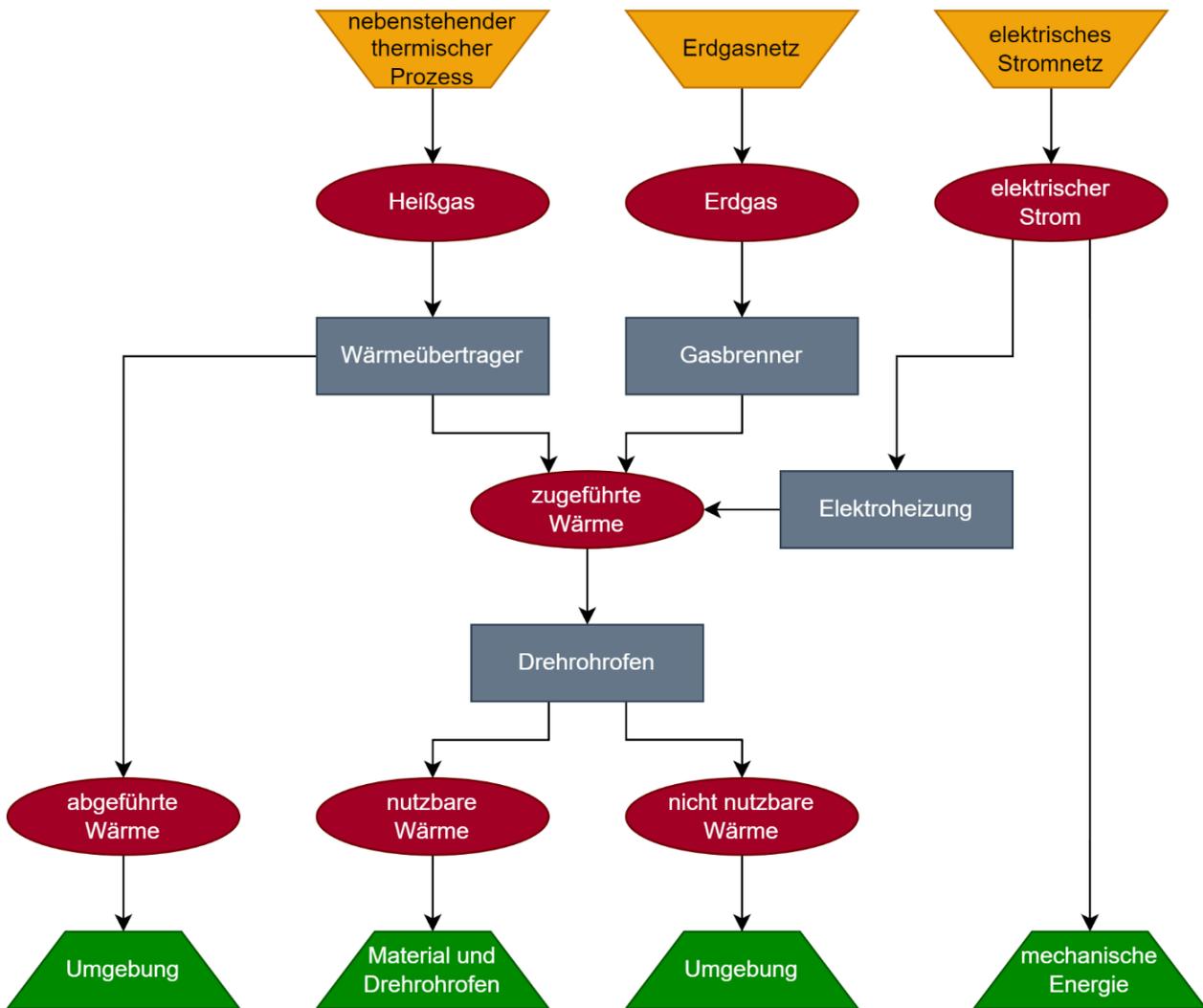


Abbildung 4-2: OEMOF Basis-Modell

Dem Modell werden u. a. die Kosten für die drei Energiequellen, Nominalwerte der Energieflüsse, Effizienzen und Verluste der Komponenten für jeden Zeitschritt übergeben. Die Optimierung gibt dann als Lösung den zeitlich besten Einsatz der drei Energiequellen an, bei dem die Kosten ein Minimum annehmen.

4.3 Emissionsbegrenzung

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, enthält OEMOF eine Möglichkeit, um Nebenbedingungen für Emissionen zu setzen. Dabei muss in den *custom_attributes* ein spezifischer Emissionswert (bspw. mg/kWh) für jeden Energiefluss gesetzt werden. Die Randbedingung legt einen Grenzwert für verschiedene Emissionsparameter fest, der nicht überschritten werden darf. Die Summe der absoluten Emissionswerte pro Zeitschritt darf dieses Limit nicht überschreiten, wie in Gleichung (4-1) beschrieben wird. Dabei ist F die Menge der betrachteten Energieflüsse, Z die Menge der Zeitschritte, P die Leistung des Energieflusses, w der spezifische Emissionswert, τ die Länge eines Zeitschritts und L das definierte Emissionslimit [6].

$$\sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} P_f(z) * w_f(z) * \tau(z) \leq L \tag{4-1}$$

Die Emissionen in einzelnen Zeitschritten können den Durchschnittswert jedoch um ein Vielfaches überschreiten, auch wenn die Summe aller ausgestoßenen Emissionen unter dem definierten Gesamtwert liegt. Bei Zementwerken und anderen kontinuierlich laufenden Prozessen erfolgt die Abgasreinigung direkt nach dem thermischen Prozess. Dabei weist die Reinigungsanlage eine bestimmte Volumenstrom-Kapazität auf, die nicht überschritten werden darf. In diesem Fall kann die Summe der Emissionswerte über den gesamten Zeitraum zwar im vorgegebenen absoluten Gültigkeitsbereich liegen, in einzelnen Zeitschritten die Kapazität der Abgasreinigung jedoch überschreiten. Aus diesem Grund wird eine Nebenbedingung entwickelt, welche die Emissionen in jedem Zeitschritt auf einen vorgegebenen Wert begrenzt. Ein einfaches Modell, wie in Abbildung 4-3 dargestellt, wird in OEMOF erstellt, um die Randbedingung zu testen.

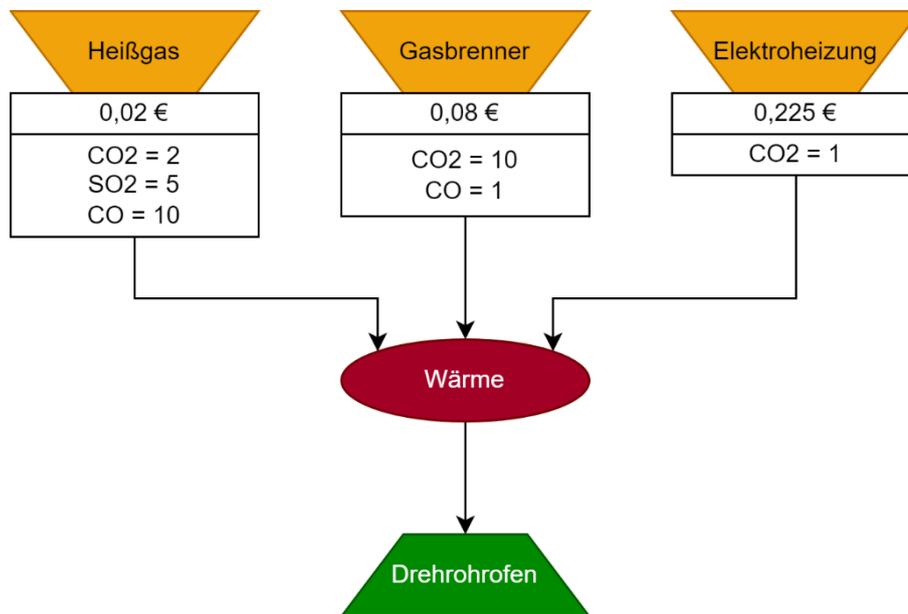


Abbildung 4-3: OEMOF-Modell für Emissionsbeschränkung

Das Modell besteht aus drei voneinander unabhängigen Energiequellen. Jeder werden spezifische Kosten (bspw. Gasbrenner 0,08 €/kWh) übergeben und für jeden Energiefluss werden unterschiedliche Emissionsparameter angegeben (bspw. Gasbrenner CO₂-Ausstoß ist 10 mg/kWh). Anzumerken ist dabei, dass die spezifischen Emissionswerte für Kohlenstoffdioxid (CO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO) in dem Modell nur Schätzwerte sind und ausschließlich zu Testzwecken dienen.

Die Nebenbedingung wird in Python so formuliert, wie in Formel (4-2) beschrieben. In jedem Zeitschritt soll die Summe der Emissionsparameter das jeweilige vorgegebene Limit nicht überschreiten. Die Formelzeichen sind analog zu denen in Formel (4-1) gewählt.

$$\forall z \in Z: \sum_{f \in F} P_f(z) * w_f(z) * \tau(z) \leq L \tag{4-2}$$

Für den Funktionstest der neuen Constraints wird eine beispielhafte Optimierung von dem in Abbildung 4-3 dargestellten Modell durchlaufen. Dabei wählt der Optimierer die wirtschaftlichsten Energiequellen aus, um den Energiebedarf des Drehrohrofens zu decken. Für den Test der Randbedingung wird ein willkürlicher

Verlauf für den Drehrohrföfen-Bedarf vorgegeben. Der Energiebezug aus jeder Quelle wird vom Optimierer berechnet.

Nach der Berechnung kann der zeitliche Verlauf der Emissionsausstöße und der Gesamtenergiebedarf für jede Energiequelle dargestellt werden. In Abbildung 4-4 ist ersterer in der linken Grafik und zweiteres im rechten Kuchendiagramm aufgezeichnet.

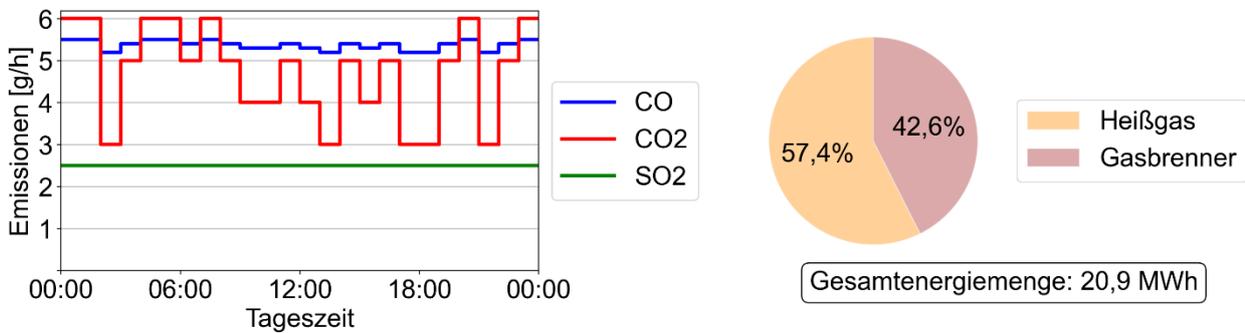


Abbildung 4-4: Optimierungsergebnis ohne Emissionsbegrenzung: Zeitliche Darstellung der Emissionsverläufe (links) und Gesamtenergiebedarf (rechts)

Im Vergleich dazu sollen die CO-Emissionen (blaues Verlaufsprofil) pro Zeitschritt auf 2.000 mg/h begrenzt werden. Bei gleichen Voraussetzungen und gleichem Lastprofil des Drehrohrföfens errechnet der Optimierer das wirtschaftlichste Ergebnis, wie in Abbildung 4-5 dargestellt.

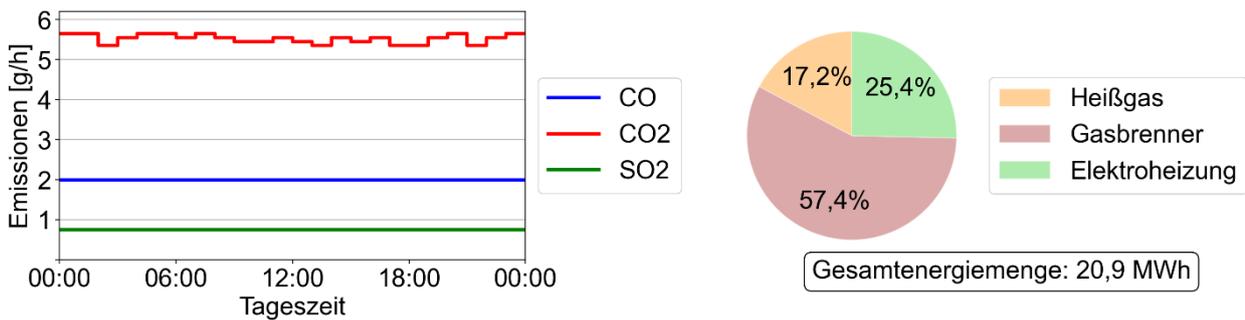


Abbildung 4-5: Optimierungsergebnis mit Emissionsbegrenzung: Zeitliche Darstellung der Emissionsverläufe (links) und Gesamtenergiebedarf (rechts)

Die CO-Emissionen sind in jedem Zeitschritt auf 2.000 mg/h (entspricht 2 g/h) begrenzt, was die durchgehende blaue Linie veranschaulicht. Um diesen Wert einzuhalten, muss die Wärmeenergie aus der nebenstehenden Anlage (oranges Segment im jeweils rechten Diagramm) von 57,4 % auf 17,2 % reduziert werden, da dies die größte CO-Quelle darstellt. Dies ist am SO₂-Ausstoß zu erkennen, der in der zweiten Berechnung sinkt (nur Heißgas verursacht SO₂-Emissionen). Um die fehlende Energie auszugleichen müssen die teureren Wärmequellen, also Gasbrenner und Elektroheizung, eingesetzt werden. Die Beschaffungskosten der Wärme steigen somit, das Ziel der Emissionsgrenze ist jedoch erfüllt und die Constraints können so in das finale Modell implementiert werden.

4.4 Temperaturabhängigkeit

Das OEMOF-Paket ist für die Modellierung und Optimierung von Energieflüssen entwickelt worden. Es werden nur Energiemengen (keine Materialflüsse) betrachtet und die Komponenten sind als Black-Box-Modelle anzusehen. Das bedeutet auch, die chemischen Eigenschaften der unterschiedlichen Ströme fließen in die Berechnung nicht mit ein.

Als Beispiel für das vorliegende Problem kann heißes Wasser herangezogen werden, das durch Abkühlen Wärme an die Umgebung abgibt. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt annähernd $4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [7]. Dieser Wert verändert sich bei unterschiedlichen Temperaturen geringfügig, wird aber für folgendes Beispiel als konstant angenommen. Bei der Abkühlung von 1 kg Wasser von 80 °C auf 50 °C (ungefähr $353,15 \text{ K}$ bzw. $323,15 \text{ K}$) werden $125,4 \text{ kJ}$ Energie frei, wie in Gleichung (4-3) berechnet wird. Dabei stellt Q die Energiemenge dar, m die Wassermasse, c_p die spezifische Wärmekapazität und ΔT die Temperaturänderung.

$$Q = m * c_p * \Delta T = 1 \text{ kg} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (353,15 \text{ K} - 323,15 \text{ K}) = 125,4 \text{ kJ} \quad (4-3)$$

Bei der Berechnung für die gleiche Wassermenge von 60 °C auf 30 °C wird auch eine Energiemenge von $125,4 \text{ kJ}$ erhalten. Dieses Ergebnis wird ebenfalls errechnet, wenn die Wassermasse bspw. 2 kg beträgt und die Temperatur von 80 °C auf 65 °C sinkt. Die gleiche Energiemenge kann folglich mit einer beliebigen Kombination von Masse und Temperaturgradient erreicht werden. Analog dazu können diese Berechnungen auch auf Gase angewandt werden, wie im folgenden beschrieben wird.

4.4.1 Modellaufbau

In der vorliegenden Arbeit wird ein Drehrohrofen untersucht, in dem unterschiedliche Materialien verarbeitet werden. Dabei ist nicht nur die Energiemenge relevant, die für die Pyrolyse der Materialien benötigt wird, sondern auch das dafür vorausgesetzte Temperaturniveau (materialabhängig). Da in OEMOF zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit keine Option für die Temperaturbetrachtung enthalten ist, muss ein neuer Ansatz in das Modell eingebaut werden.

Das nutzbare Abgas wird mit einer vorgegebenen Temperatur in das System eingeleitet. Um die Temperatur dieses Heißgases zu erhöhen, muss Energie hinzugefügt werden, bspw. über eine Elektroheizung. Die benötigte Energiemenge für eine Temperaturerhöhung verhält sich proportional zur Masse des Gases (isochore Temperaturänderung wird angenommen), wie in der Einleitung des Kapitels 4.4 beschrieben wurde. Da der Energieeinsatz, und somit die Masse des Gases, vom Optimierer berechnet werden soll, ist dieser unbekannt und kann dem Modell nicht im Voraus übergeben werden. Es wird ein neuer Ansatz entwickelt, bei dem die Energieflüsse in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden. Damit kann das Modell unabhängig von den Energiemengen und Massenströmen aufgesetzt werden.

Es wird eine neue Methodik entwickelt, mit der die Temperaturniveaus im Drehrohrofen zeitlich aufgelöst berechnet werden und die Drehrohrofen- und Material-Eigenschaften (Durchlaufzeit, Aufheizrate, benötigte Prozesstemperatur, ...) in die Berechnung mit einfließen. Vor der Berechnung müssen diese Informationen im Modell gesetzt werden. Zusätzlich müssen dem Modell die Umgebungs- und Heißgas-Temperaturen übergeben werden.

Die benötigte Prozesstemperatur soll Werte annehmen, welche optimale Voraussetzungen für jedes Material garantieren. Wenn das nutzbare Abgas mit einer zu niedrigen Temperatur von der nebenstehenden Anlage geliefert wird, muss dieses erhitzt werden. Im vorliegenden Modell wird angenommen, dass dies durch Zugabe von externer Wärme erreicht wird (indirekte Erhitzung). Diese kann bspw. durch die Verbrennung von Erdgas oder durch den Einsatz einer Elektroheizung erzielt werden. Falls die Temperatur des Heißgases über der erwünschten Prozesstemperatur liegt, muss dieses gekühlt werden. Das kann bspw. durch einen Wärmeübertrager erreicht werden – alternativ dazu, wenn im Drehrohrofen Verbrennung stattfinden soll, kann auch Frischluft (enthält Sauerstoff) direkt beigemischt werden. In den folgenden Berechnungen wird

angenommen, dass die Energiezu- bzw. -abgabe indirekt erfolgt. Dadurch verändern sich die chemischen Eigenschaften des Heißgases (bspw. Massenzusammensetzung) nicht.

Um das beschriebene Verhalten in der Optimierung zu erfüllen, wird ein Testmodell entwickelt, das in OEMOF wie in Abbildung 4-6 aufgebaut wird. Die Hauptkomponenten des Modells sind durch den roten Hintergrund markiert. Sie sind in jedem Berechnungsszenario enthalten und dürfen nicht entfernt werden. Der modulare Teil ist durch einen blauen Hintergrund gekennzeichnet. Dieser kann an die Anlagen- und Simulationsspezifikationen angepasst werden. Die Materialien, markiert durch einen gelben Hintergrund, werden abhängig von den zu untersuchenden Abfallfraktionen hinzugefügt.

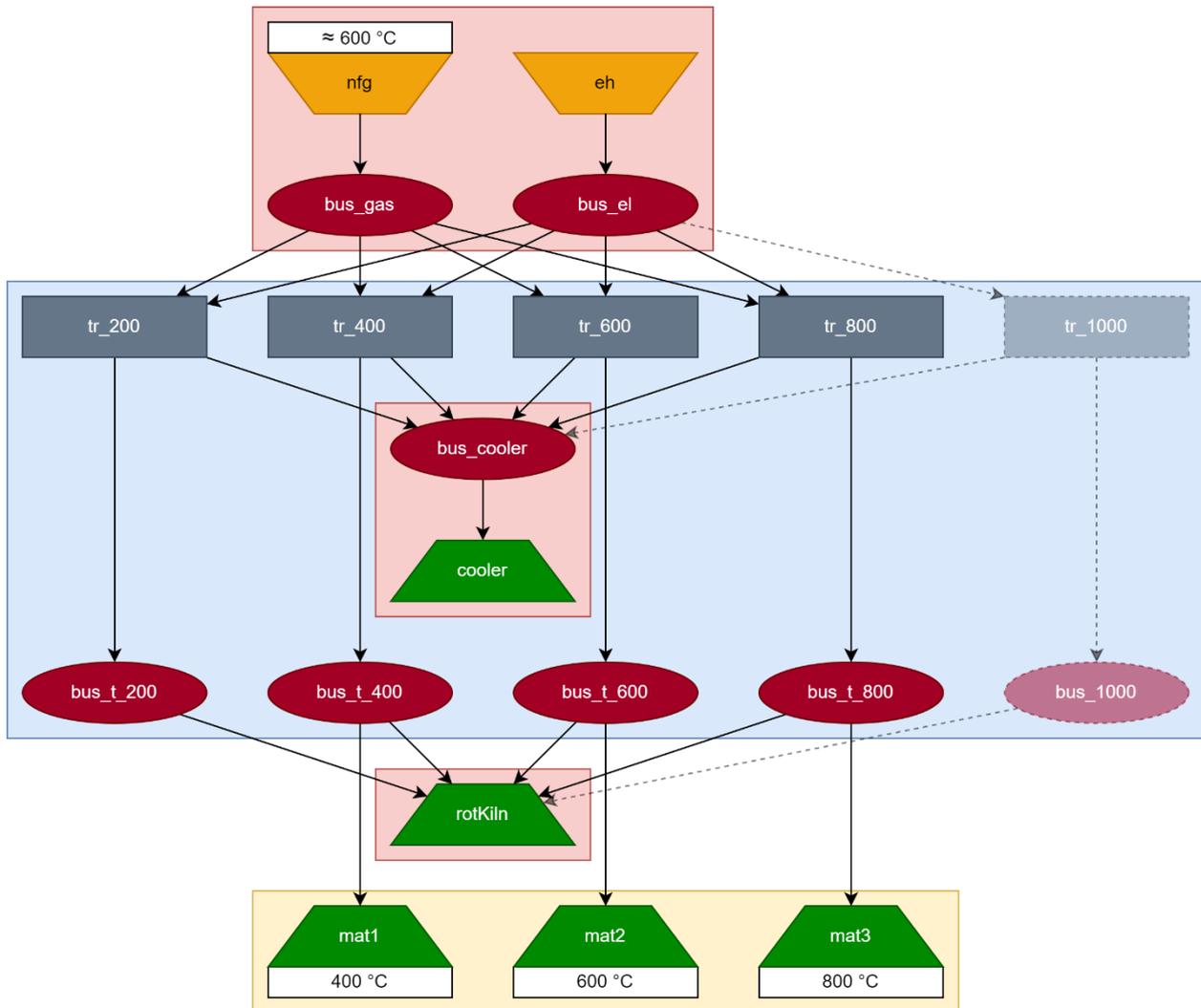


Abbildung 4-6: OEMOF-Modell für temperaturabhängige Optimierung im Bezug auf Umgebungstemperatur

Das nutzbare Heißgas wird durch die „nfg“-Source in das System eingebracht. Dessen Temperatur beträgt ungefähr 600 °C, schwankt aber in jedem Zeitschritt. Um das Gas zu erhitzen, wird dem Modell ein elektrisches Heizelement („eh“) hinzugefügt. Für die Kühlung des Gases muss eine virtuelle Komponente („cooler“) in das Modell eingebaut werden. Diese kann bspw. aus einem Wärmeübertrager bestehen, in dem das Heißgas vor dem Drehrohfen-Eintritt Wärme an ein Kühlmedium abgibt. Außerdem wird dem System noch eine Komponente hinzugefügt, die den Leerlauf-Wärmebedarf des Drehrohrofens darstellt („rotKiln“).

Die weiteren Komponenten können variabel auf die betrachtete Anlage angepasst werden. Für jedes mögliche Temperaturniveau wird jeweils ein Transformator und ein Bus implementiert – für eine Prozesstemperatur von 400 °C werden bspw. die Komponenten „tr_400“ und „bus_t_400“ verwendet. Die

verschiedenen Materialien werden mit den jeweiligen Bussen verbunden. Das Material „mat2“ benötigt bspw. eine Prozesstemperatur von 600 °C, deshalb wird dieser Sink mit „bus_t_600“ verbunden. Es können auch mehrere Materialien, die bei gleicher Temperatur pyrolysiert werden müssen, an dem dafür vorgesehenen Temperatur-Bus angelegt werden.

Die Funktionsweise des Modells ist darauf ausgelegt, dass immer eine Temperaturkomponente als aktiv (*nonconvex.status* = 1) angenommen wird. Alle Energieströme fließen über den aktiven Transformer. Durch verschiedene Nebenbedingungen wird die Temperaturänderung so geregelt, dass der Temperatursprung auf einen pro Zeitschritt begrenzt wird. Im Beispiel von Abbildung 4-6 benötigt der Optimierer bspw. drei Zeitschritte, um den Drehrohrofen von 200 °C auf 800 °C zu erhitzen.

Die Auswahl der angegebenen Temperaturniveaus hängt von den Drehrohrofen-Eigenschaften und den Optimierungs-Einstellungen ab. Bei der Annahme, dass die Aufheizrate der Anlage 200 °C/h beträgt und die Rechenschritte der Optimierung in Halb-Stunden-Werten gegeben werden, werden die Temperaturniveaus im Modell mit einem Gradienten von 100 °C gewählt, wie in Gleichung (4-4) beschrieben ist. Dabei stellt ΔT den Temperaturgradient der Komponenten, R_A die Aufheizrate des Drehrohrofens und τ die Länge der Zeitschritte der Optimierung dar. So wird die zeitliche Komponente der thermischen Trägheit erfüllt. Diese Temperaturniveaus werden dem Modell manuell hinzugefügt.

$$\Delta T = R_A * \tau = 200 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}} \right] * 0,5 [\text{h}] = 100^{\circ}\text{C} \quad (4-4)$$

4.4.2 Berechnung

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, kann in den *conversion_factors* das Verhältnis der Eingangs- und Ausgangsströme eines Transformators angegeben werden. In den in Abbildung 4-6 dargestellten Transformatoren muss dieses Verhältnis in Abhängigkeit des jeweiligen Temperaturniveaus und für jeden Zeitschritt explizit berechnet werden.

Im einfachsten Fall, bei dem das nutzbare Heißgas die gleiche Temperatur, wie als Prozesstemperatur vorgegeben, besitzt (600 °C), muss es weder gekühlt, noch erhitzt werden. Am Energiegehalt des Gases muss nichts geändert werden. Da dies jedoch in realen Anlagen selten der Fall ist, werden in den folgenden Absätzen die beiden Fälle Erhitzen und Kühlen betrachtet und die jeweiligen Berechnungen formuliert.

Erhitzen des Prozessgases

Wenn das Prozessgas mit einer niedrigeren Temperatur in das System eintritt als die geforderte Prozesstemperatur, muss es erhitzt werden. Durch die Zugabe von Energie, kann das Temperaturniveau des Gases erhöht werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Gasmenge (Masse) dabei nicht verändert.

Ein beispielhaftes zeitliches Temperaturprofil für das Prozessgas ist in Abbildung 4-7 skizziert. Dabei ist $T_{environment}$ die Umgebungstemperatur, T_{gas_in} die Eintrittstemperatur des Heißgases und $T_{process}$ die geforderte Prozesstemperatur. Als Referenztemperatur für die folgenden Berechnungen wird die Umgebungstemperatur gewählt. In der Abbildung bezeichnet Q_{gas} die Wärmemenge, welche dem Gas durch die nebenstehenden Anlage, und $Q_{heating}$ die Wärme, welche dem Gas durch zusätzliche Erhitzung zugeführt wird. Mit Q_{tot} wird die gesamte Wärme, die das Heißgas abgeben kann (bspw. zur Pyrolyse des Materials), bezeichnet.

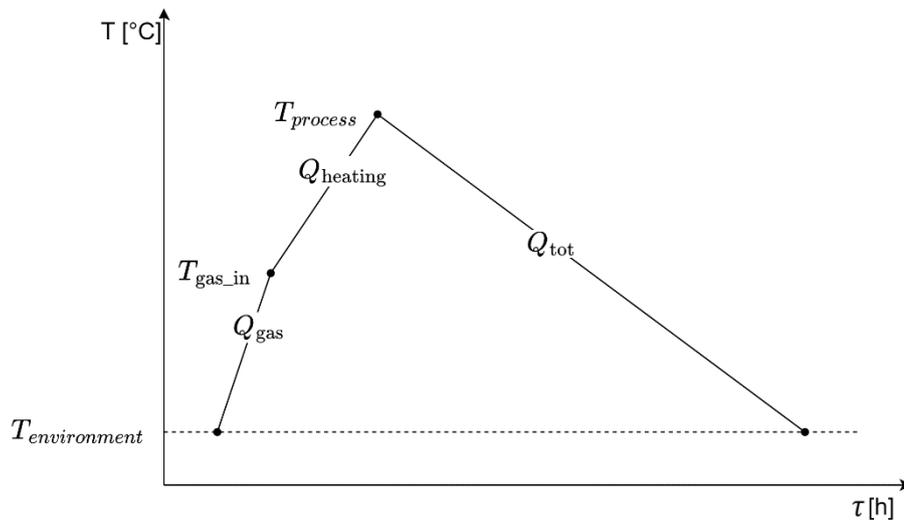


Abbildung 4-7: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur höher als die Eintrittstemperatur ist

Für die Hintergrundberechnungen wird ein ähnlicher Ansatz verwendet, wie Daugaard & Brown [8] beschreiben. Eine Energiegleichung für das Prozessgas kann wie in Formel (4-5) aufgestellt werden. Die Energie, die dem Gas zugeführt wird, wird auf der linken Seite und die Energie, welche vom Gas abgegeben wird, auf der rechten Seite angeschrieben.

$$Q_{gas} + Q_{heating} = -Q_{tot} \tag{4-5}$$

Die *conversion_factors* der Inputflüsse der Transformer-Komponenten werden als relative Anteile der gesamten zugeführten Energiemenge angegeben. Die Summe dieser Faktoren beträgt daher den Wert 1. Daraus folgend kann Gleichung (4-6) abgeleitet werden.

$$\frac{Q_{gas} + Q_{heating}}{-Q_{tot}} = \frac{Q_{gas} + Q_{heating}}{Q_{gas} + Q_{heating}} = \frac{Q_{gas}}{Q_{gas} + Q_{heating}} + \frac{Q_{heating}}{Q_{gas} + Q_{heating}} \stackrel{!}{=} 1 \tag{4-6}$$

Um den relativen Anteil der Zusatzwärme ($p_{heating}$) zu errechnen, wird auf Gleichung (4-7) umgeformt.

$$p_{heating} = \frac{Q_{heating}}{Q_{gas} + Q_{heating}} = 1 - \frac{Q_{gas}}{Q_{gas} + Q_{heating}} \tag{4-7}$$

Da die Energiemengen vom Optimierer berechnet werden, sind diese bei der Konfigurierung des Modells noch unbekannt. Deshalb werden für die Energiemengen die thermodynamischen Formeln (4-8) und (4-9) verwendet.

$$Q_{gas} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{gas_in} - T_{environment}) \tag{4-8}$$

$$Q_{heating} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{process} - T_{gas_in}) \tag{4-9}$$

Dabei ist die Masse m des Prozessgases in beiden Gleichungen dieselbe, da der Wärmeeintrag durch externe Energiequellen als indirekt angenommen wird (bspw. Wärmeübertrager oder Elektroheizung). Somit findet kein Massenaustausch statt und die Masse kann als konstant angenommen werden. Da die Zusammensetzung des Gases zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit unbekannt ist, wird die spezifische

Wärmekapazität c_p über den gesamten Temperaturbereich als konstant angenommen (vgl. mittlere spezifische Wärmekapazität in Cerbe & Wilhelms [7]). Somit kann die Masse und die spezifische Wärmekapazität in den folgenden Formulierungen gekürzt werden. Die Gleichungen (4-8) und (4-9) können in Gleichung (4-7) eingesetzt werden, was zu Gleichung (4-10) führt. Diese kann weiterführend auf Gleichung (4-11) aufgelöst werden.

$$p_{heating} = 1 - \frac{m * c_p * (T_{gas_in} - T_{environment})}{m * c_p * (T_{gas_in} - T_{environment}) + m * c_p * (T_{process} - T_{gas_in})} \quad (4-10)$$

$$p_{heating} = 1 - \frac{T_{gas_in} - T_{environment}}{T_{process} - T_{environment}} = \frac{T_{process} - T_{gas_in}}{T_{process} - T_{environment}} \quad (4-11)$$

Der relative Anteil der Heizenergie lässt sich somit aus den bekannten Temperaturverläufen errechnen. Der relative Anteil der Gas-Wärme wird im Folgenden durch Formel (4-12) berechnet.

$$p_{gas} = 1 - p_{heating} \quad (4-12)$$

Diese Werte werden vom Programm für jeden Zeitschritt und für jeden Transformer berechnet und automatisch bei den *conversion_factors* der Inputströme eingetragen. Auf der Output-Seite des jeweiligen Transformer-Elementes wird der *conversion_factor* für den Energiefluss zum „bus_cooler“ auf den Wert 0 gesetzt (keine Kühlung notwendig) und für den Fluss zum jeweiligen Temperatur-Bus auf den Wert 1 (100 % der Energie wird an den Prozess weitergeleitet).

Kühlen des Prozessgases

Wenn die Heißgastemperatur (T_{gas_in}) beim Eintritt in das System höher als die erforderte Prozesstemperatur ($T_{process}$) ist, muss das Gas gekühlt werden. Dieser Fall ist in Abbildung 4-8 skizziert.

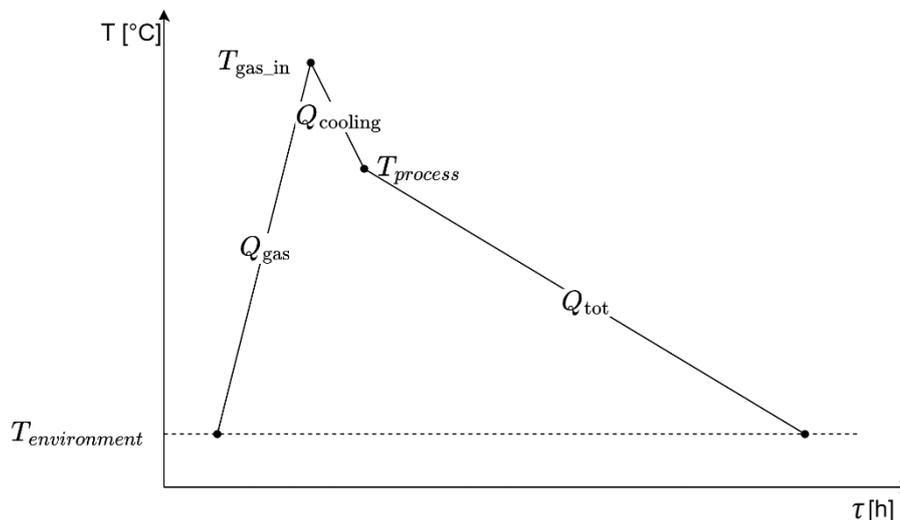


Abbildung 4-8: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur geringer als die Eintrittstemperatur ist

In diesem Fall müssen die *conversion_factors* für die Outputs berechnet werden, da das „cooler“-Element am Transformer-Ausgang angehängt ist (vgl. Abbildung 4-6). Um das Gas auf die benötigte Temperatur zu kühlen, muss ein Teil der Wärme abgeführt werden. Für die *conversion_factors* wird entsprechend der relative Anteil der Gesamtenergie berechnet, der vom Gas entfernt werden muss. Es wird angenommen, dass diese

Kühlung indirekt stattfindet, also bspw. über einen Wärmeübertrager. So kann die Gas-Masse als konstant angenommen werden. Der relative Anteil der Kühlung wird wie in Gleichung (4-13) berechnet.

$$p_{cooling} = \frac{-Q_{cooling}}{Q_{gas}} \quad (4-13)$$

Durch Einfügen von Gleichung (4-8) und Gleichung (4-14) wird Gleichung (4-15) erhalten.

$$Q_{cooling} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{process} - T_{gas_in}) \quad (4-14)$$

$$p_{cooling} = \frac{m * c_p * (T_{gas_in} - T_{process})}{m * c_p * (T_{gas_in} - T_{environment})} = \frac{T_{gas_in} - T_{process}}{T_{gas_in} - T_{environment}} \quad (4-15)$$

Analog zu Gleichung (4-12) kann der relative Anteil der Energie, die für den Prozess zur Verfügung steht und an den Temperatur-Bus weitergeleitet wird, wie in Gleichung (4-16) berechnet werden.

$$p_{bus_t} = 1 - p_{cooling} \quad (4-16)$$

Der *conversion_factor* wird für den Inputstrom von „bus_el“ auf den Wert 0 gesetzt, da keine zusätzliche Erhitzung benötigt wird. Für den Inputstrom von „bus_gas“ wird der Faktor auf 1 gesetzt. Bei den Output-Strömen werden die Faktoren $p_{cooling}$ für den Energiefluss zu „bus_cooler“ und p_{bus_t} für den Energiefluss zum jeweiligen Temperatur-Bus eingesetzt.

4.4.3 Test der temperaturabhängigen Optimierung

Die in Kapitel 4.4.2 hergeleiteten Formeln werden getestet. Dafür wird ein OEMOF-Modell, ähnlich zu Abbildung 4-6, erstellt und die *conversion_factors* der Temperatur-Transformer anhand der Formeln berechnet. Es wird ein beispielhafter Werktag optimiert, an dem die Anlage aktiv ist. Jedes der drei Materialien besitzt unterschiedliche Prozessanforderungen (bspw. benötigte Prozesstemperatur) und jedem wird eine Masse vorgegeben, die am betrachteten Tag zu pyrolysieren ist.

Durch die Optimierung werden Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 erhalten. Auf der Abszisse wird jeweils die Tageszeit (in vier-Stunden-Abständen) angegeben. Bei der Temperaturbetrachtung in Abbildung 4-9 werden die Drehrohren-Temperatur, die Temperatur des Heißgases (von einer nebenstehenden Anlage kommend) und die Umgebungstemperatur angezeigt. Auf der Ordinate werden die Temperaturstufen angegeben. Die Heißgastemperatur beträgt ca. 600 °C, schwankt jedoch in jedem Zeitschritt. Die Umgebungstemperatur beträgt ca. 0 °C und schwankt abhängig von der Tageszeit (vernachlässigbar). Durch die Optimierung wird berechnet, zu welcher Tageszeit die Materialien verarbeitet werden sollen. Abhängig vom Materialdurchsatz nimmt der Drehrohren das vorausgesetzte Temperaturniveau an.

In Abbildung 4-10 wird der dazugehörige Energielastgang dargestellt. Die Ordinate gibt die thermische Leistung an, die im jeweiligen Zeitschritt durch den Optimierer berechnet wird. Die Energiequellen werden durch farbige Flächen dargestellt. Dabei gibt die orange Fläche die gelieferte Wärme des Heißgases an und die grüne Fläche die Wärme von der Elektroheizung. In dieser Optimierung wird angenommen, dass das Heißgas während der Pyrolyse von der Eintrittstemperatur auf die Umgebungstemperatur (Referenztemperatur) abkühlt und die gesamte frei werdende Wärmemenge von den Materialien aufgenommen wird. Die blaue Schraffur in Abbildung 4-10 gibt die Wärme an, die dem Heißgas durch die „cooler“-Komponente entzogen wird, bevor es in die Anlage eingeleitet wird. Die Energieverbräuche der Materialien (für die Pyrolyse) werden durch die farbigen Linien dargestellt.

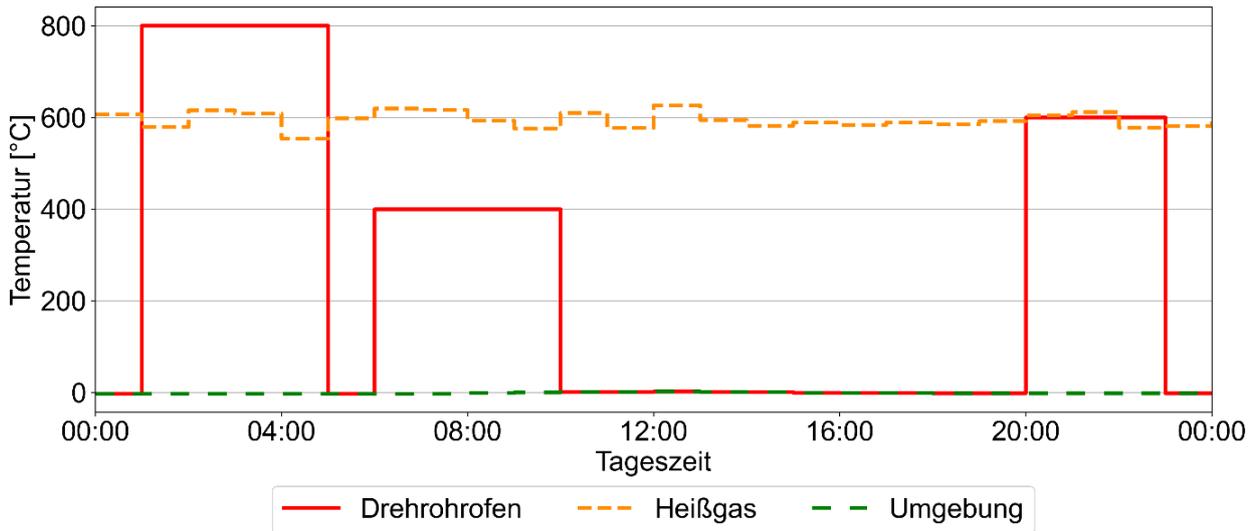


Abbildung 4-9: Temperaturabhängige Optimierung ohne Constraints – Temperaturverläufe

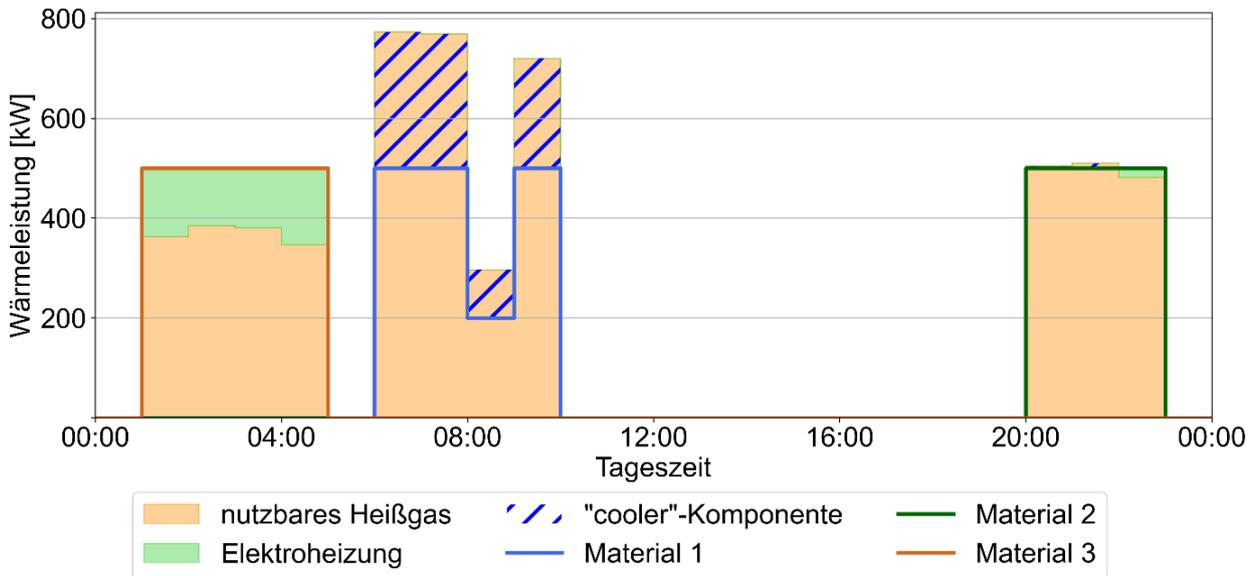


Abbildung 4-10: Temperaturabhängige Optimierung ohne Constraints – Energielastgang

In der vorliegenden Optimierung, sind nur zwei Constraints angegeben, welche die Materialien betreffen. Die erste dieser Nebenbedingungen begrenzt die Menge der aktiven Materialflüsse auf eins (unterschiedliche Materialarten müssen getrennt voneinander im Drehrohr pyrolysiert werden) und die zweite definiert, dass am Ende der Optimierung die gesamte angegebene Masse der Materialien verarbeitet werden muss.

Bei einem Vergleich der beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Elektroheizung Wärme liefern muss, wenn die Heißgastemperatur unter der benötigten Prozesstemperatur liegt (Material 3). Das Heißgas muss gekühlt werden, wenn die Prozesstemperatur kleiner als die Heißgas-Eintrittstemperatur sein soll (Material 1). Material 2 benötigt eine Prozesstemperatur von 600 °C, deshalb muss abhängig vom Zeitschritt entweder gekühlt oder erhitzt werden (geringe Wärmemengen).

Bei einer realen Anlage muss die zeitlich abhängige Temperaturänderung des Drehrohrofens (thermische Trägheit) ebenfalls in die Optimierung mit einfließen. Das bedeutet, abhängig von den Anlagenspezifikationen braucht das Drehrohr eine vorgegebene Zeit, um eine vorgesehene Temperaturänderung durchzuführen. Bei

größeren Anlagen steigt diese Zeit an, da mehr Eigenmasse des Drehrohrs die benötigte Temperatur erreichen muss. In Abbildung 4-9 ist zu beobachten, dass die Temperatur sprunghaft auf die benötigte Prozesstemperatur des jeweiligen Materials ansteigt, ohne die thermische Trägheit des Drehrohrrofens zu berücksichtigen.

Wenn die Constraints, welche die Temperaturänderung des Drehrohrrofens beeinflussen, hinzugefügt werden, wird das Ergebnis errechnet, das in Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 dargestellt ist. Dabei sind die Inputparameter dieselben, wie in der vorherigen Optimierung. Die Prozesstemperatur kann in diesem Beispiel nur um eine Stufe pro Zeitschritt erhöht oder gesenkt werden. Im realen Betrieb steigt und sinkt die Temperatur kontinuierlich, nicht sprunghaft. Um die Temperaturniveaus herauszuheben wird der Temperaturverlauf von Abbildung 4-11 in Stufenform dargestellt.

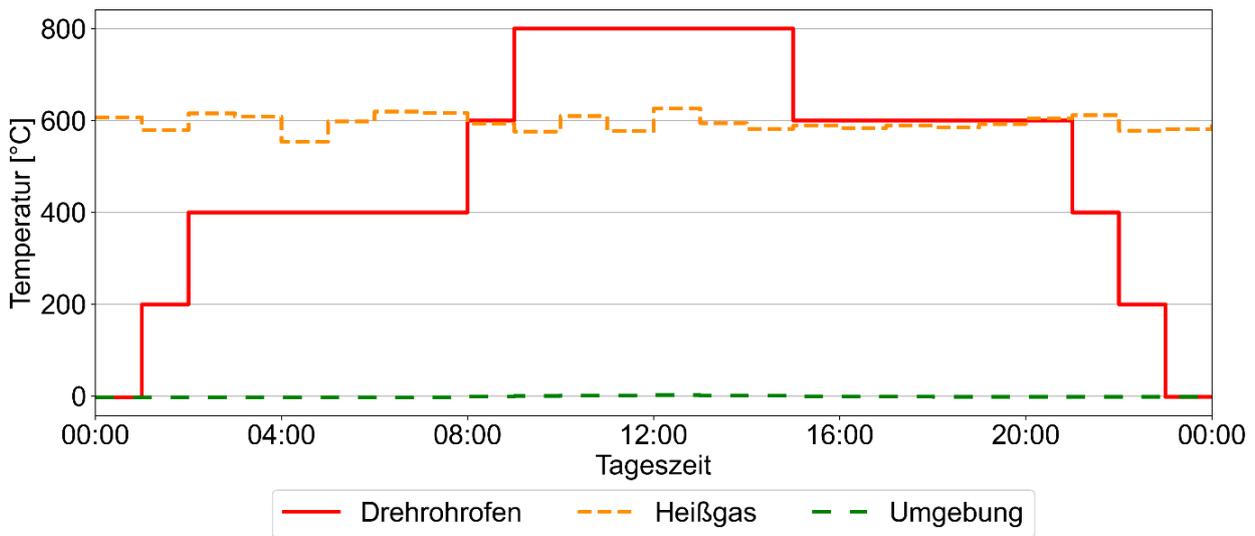


Abbildung 4-11: Temperaturabhängige Optimierung mit Constraints – Temperaturverläufe

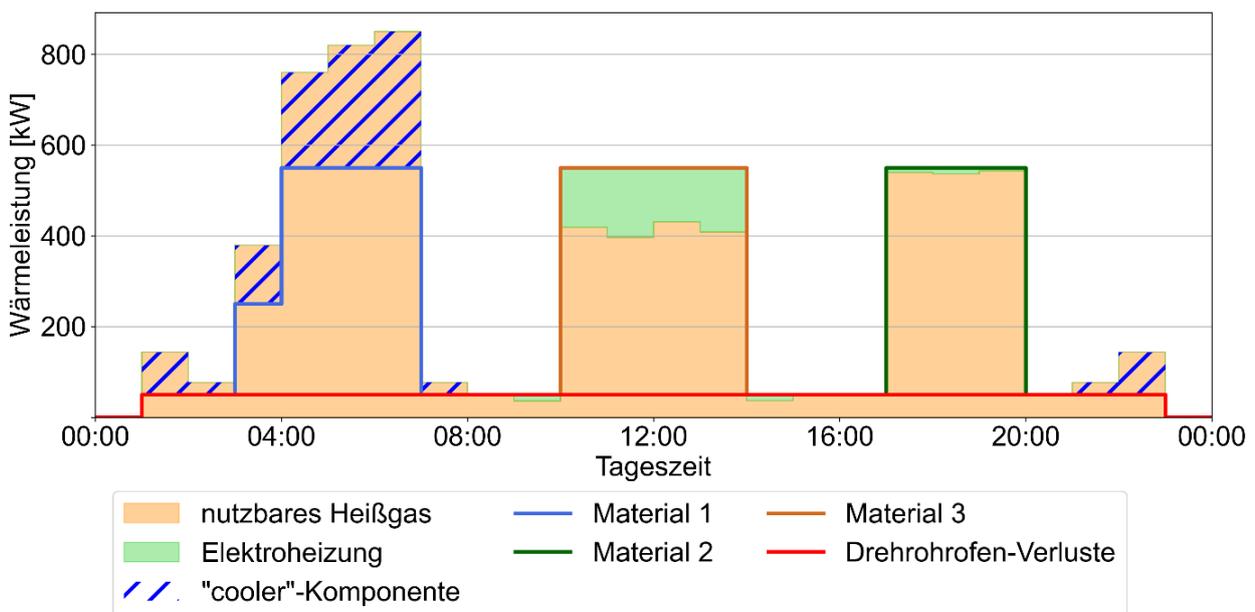


Abbildung 4-12: Temperaturabhängige Optimierung mit Constraints – Energielastgang

Zusätzlich zu den Constraints für die Temperaturänderung wurden weitere Constraints hinzugefügt, bspw. dass die Anlage jeweils einen Zeitschritt vor und nach dem Materialeinsatz das dafür benötigte Temperaturniveau besitzen soll. Außerdem werden konstante Drehrohren-Verluste (rote Linie in Abbildung 4-12) berücksichtigt. Auch im Drehrohren-Leerlauf muss das Erhitzen und Kühlen des Heißgases eingehalten werden, um das jeweilige Temperaturniveau zu erreichen. Das Test-Beispiel zeigt, dass die Constraints zu den gewünschten Ergebnissen führen und in das finale Modell implementiert werden können.

4.4.4 Abhängigkeit von Drehrohren-Austrittstemperatur

Die in den vorigen Kapiteln dargestellten Verläufe und Energieverbräuche entstehen unter der Annahme, dass das Abgas von der Prozesstemperatur auf die Umgebungstemperatur abkühlt und das gesamte Wärmepotential für die Pyrolyse eingesetzt wird. Im realen Betrieb verlässt das Abgas die Anlage jedoch mit einer höheren Temperatur, als die Umgebungstemperatur. Abbildung 4-7 wird erweitert, wodurch der Verlauf von Abbildung 4-13 erhalten wird. Die Austrittstemperatur des Heißgases (nach Durchlaufen des Prozesses) wird als $T_{\text{gas_out}}$ bezeichnet. Dabei wird angenommen, dass der gesamte Energieeintrag am Eingang des Drehrohrens erfolgt (keine Zwischenerhitzung findet statt).

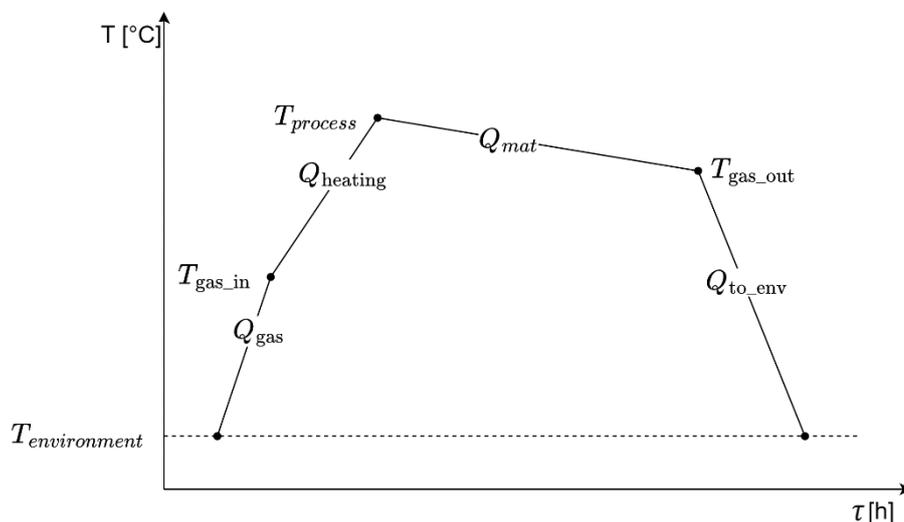


Abbildung 4-13: Zeitlicher Temperaturverlauf des Prozessgases, wenn die benötigte Prozesstemperatur höher als die Eintrittstemperatur ist und die Drehrohren-Austrittstemperatur berücksichtigt wird

Die Energiemenge, die für die Pyrolyse der Materialien und die Erwärmung des Drehrohres genutzt wird ist in Abbildung 4-13 als Q_{mat} angegeben. Die in der Anlage nicht nutzbare Energie ($Q_{\text{to_env}}$) verlässt das System und wird an die Umgebung abgegeben. Im realen Fall kann ein Teil dieser Abwärme bspw. für die Einspeisung in ein Fernwärmenetz oder die Beheizung von Büroräumlichkeiten genutzt werden, um die höchstmögliche Ausschöpfung – im Sinne einer kaskadischen Nutzung – zu erzielen.

Für die Berücksichtigung dieses Verhaltens muss das, in Abbildung 4-6 dargestellte, Modell erweitert werden und ein weiterer Bus und Sink werden hinzugefügt. Die Temperatur-Transformer werden um einen neuen Output erweitert und mit dem neuen Bus verbunden. Der Aufbau ist ausschnittsweise in Abbildung 4-14 dargestellt. Die neuen Komponenten sind „bus_heat_out“ und „heat_out“.

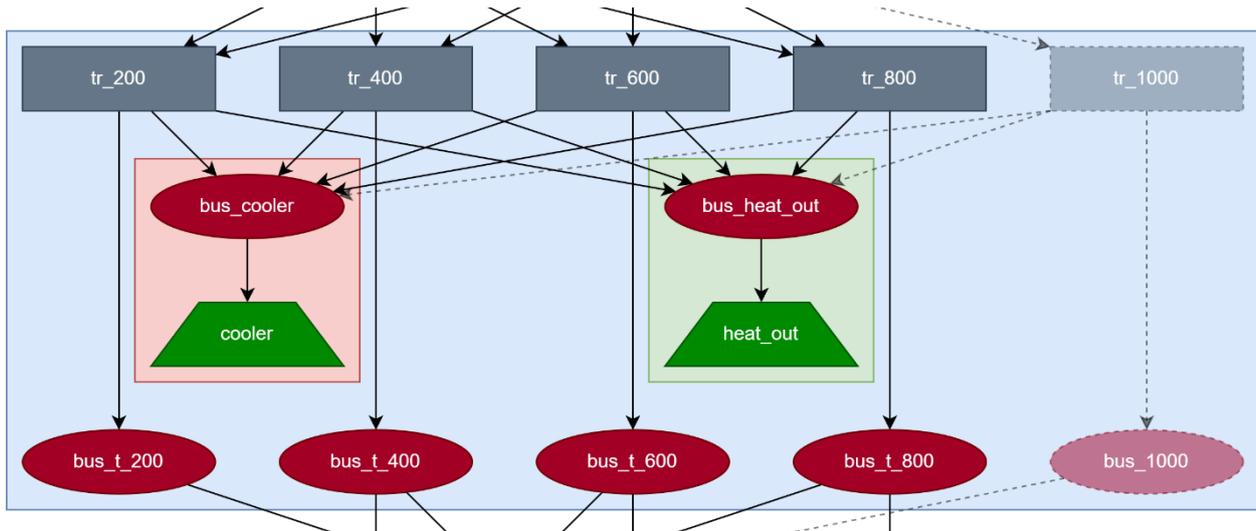


Abbildung 4-14: OEMOF-Modell Temperaturabhängigkeit bezogen auf Austrittstemperatur

Die Berechnung der neuen *conversion_factors* erfolgt analog zu Kapitel 4.4.2. Die Energie, die für den Prozess genutzt werden kann, kann durch Formel (4-17) errechnet werden. Formel (4-18) definiert die Energie, welche das System verlässt und nicht genutzt wird.

$$Q_{mat} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{process} - T_{gas_out}) \quad (4-17)$$

$$Q_{to_env} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{gas_out} - T_{environment}) \quad (4-18)$$

Analog zu Gleichung (4-6) gilt Gleichung (4-19).

$$\frac{Q_{mat}}{Q_{mat} + Q_{to_env}} + \frac{Q_{to_env}}{Q_{mat} + Q_{to_env}} \stackrel{!}{=} 1 \quad (4-19)$$

Daraus kann der relative Energieanteil, der im Prozess genutzt wird, durch Gleichung (4-20) angegeben werden und durch Einsetzen der Formeln (4-17) und (4-18) auf Gleichung (4-21) aufgelöst werden.

$$p_{mat_rel} = \frac{Q_{mat}}{Q_{mat} + Q_{to_env}} \quad (4-20)$$

$$p_{mat_rel} = \frac{(T_{process} - T_{gas_out})}{(T_{process} - T_{gas_out}) + (T_{gas_out} - T_{environment})} = \frac{T_{process} - T_{gas_out}}{T_{process} - T_{environment}} \quad (4-21)$$

Bei Berücksichtigung einer möglichen vorherigen Kühlung des Gases, erfolgt die Berechnung für die *conversion_factors* wie in Gleichung (4-22) und Gleichung (4-23) beschrieben. Die Berechnung für die nutzbare und nicht nutzbare Energie im Drehrohr wird nur auf den Teil der Energie angewandt, der nach der Kühlung in den Prozess eintritt. Deshalb wird in Gleichung (4-22) der Anteil der Kühlung vom Gesamtwert 1 subtrahiert.

$$p_{mat} = (1 - p_{cooling}) * p_{mat_rel} \quad (4-22)$$

$$p_{heat_out} = 1 - p_{cooling} - p_{mat} \quad (4-23)$$

Die Optimierung des angepassten Modells ergibt die in Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16 dargestellte Lösung. Dabei wird die Austrittstemperatur aus dem Drehrohrföfen mit $T^{0,91}$ angenommen, wobei für T die jeweilige Prozesstemperatur in °C eingesetzt wird (annähernd gültig für Werte aus Cribb et al. [9] und Boateng & Barr [10]). Nach der Inbetriebnahme der realen Anlage, kann die Austrittstemperatur des Heißgases in Abhängigkeit zur Prozesstemperatur gemessen, eine reale Kennlinie errechnet und dem Modell hinzugefügt werden. In Abbildung 4-15 wird die Austrittstemperatur des Abgases als blau punktierter Verlauf dargestellt.

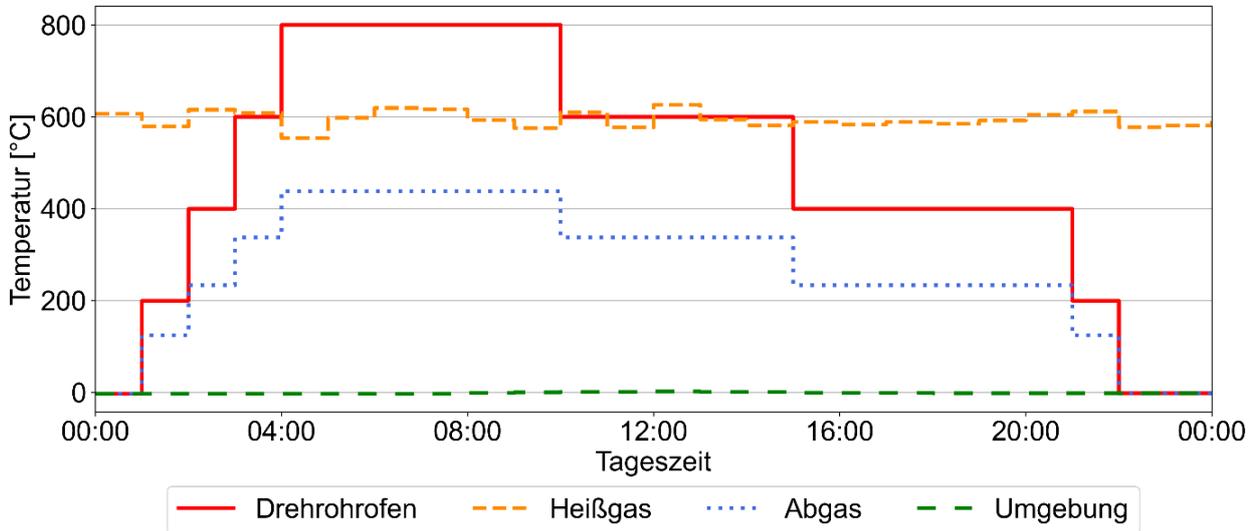


Abbildung 4-15: Optimierung in Abhängigkeit von Austrittstemperatur – Temperaturverläufe

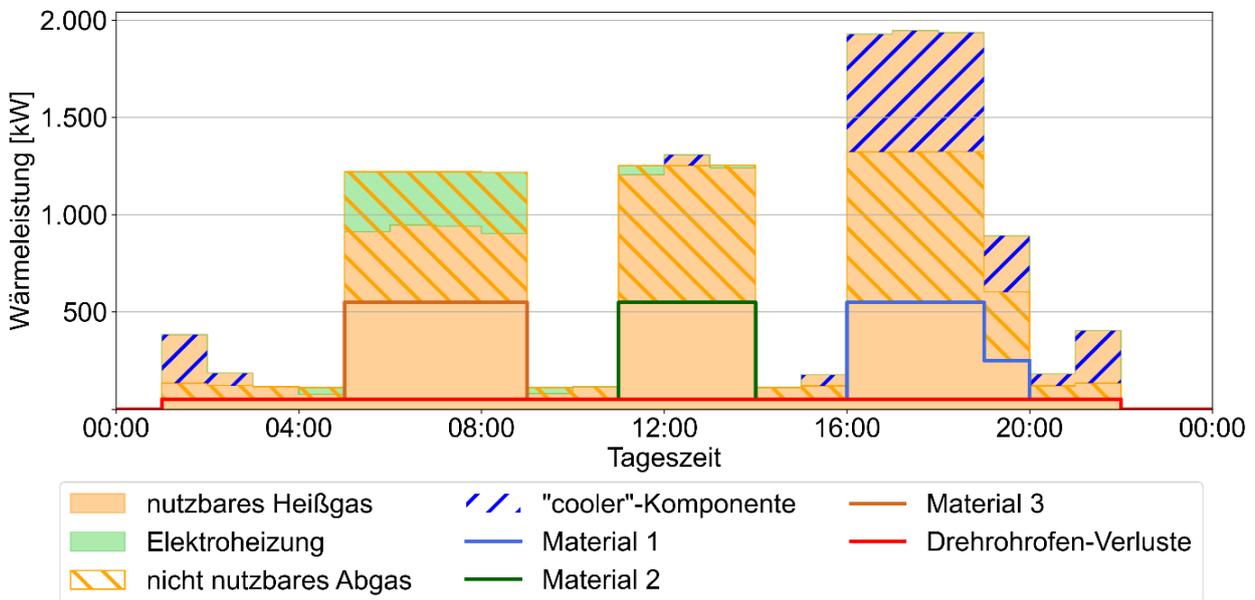


Abbildung 4-16: Optimierung in Abhängigkeit von Austrittstemperatur – Energielastgang

In Abbildung 4-16 stellt die orange Schraffur die Wärmemenge dar, welche das System verlässt und gegebenenfalls einen sekundären Nutzen erfüllen kann (bspw. Fernwärmeeinspeisung). Die gesamte benötigte Wärmeleistung steigt im Vergleich zu den vorherigen Annahmen an, da ein großer Teil der Heißgas-Energie nicht im Prozess genutzt werden kann. Da die Menge der Materialien (und so auch die Pyrolyse-Energiemenge) gleich bleibt, muss folglich mehr Heißgas verwendet werden.

4.5 Gesamtmodell

Das in Abbildung 4-2 dargestellte Basismodell kann in OEMOF modelliert werden und durch die in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4 beschriebenen Konzepte erweitert werden. Dadurch entsteht das in Abbildung 4-17 dargestellte Modell, welches für die nachfolgenden Berechnungen und Auswertungen verwendet wird. Es handelt sich um ein generisches Modell für das von Seccon entwickelte Verfahren, wodurch verschiedene Szenarien optimiert werden können, ohne die Grundstruktur des Modells zu verändern. Die Komponenten-Bezeichnungen sind wie im Python-Code angegeben.

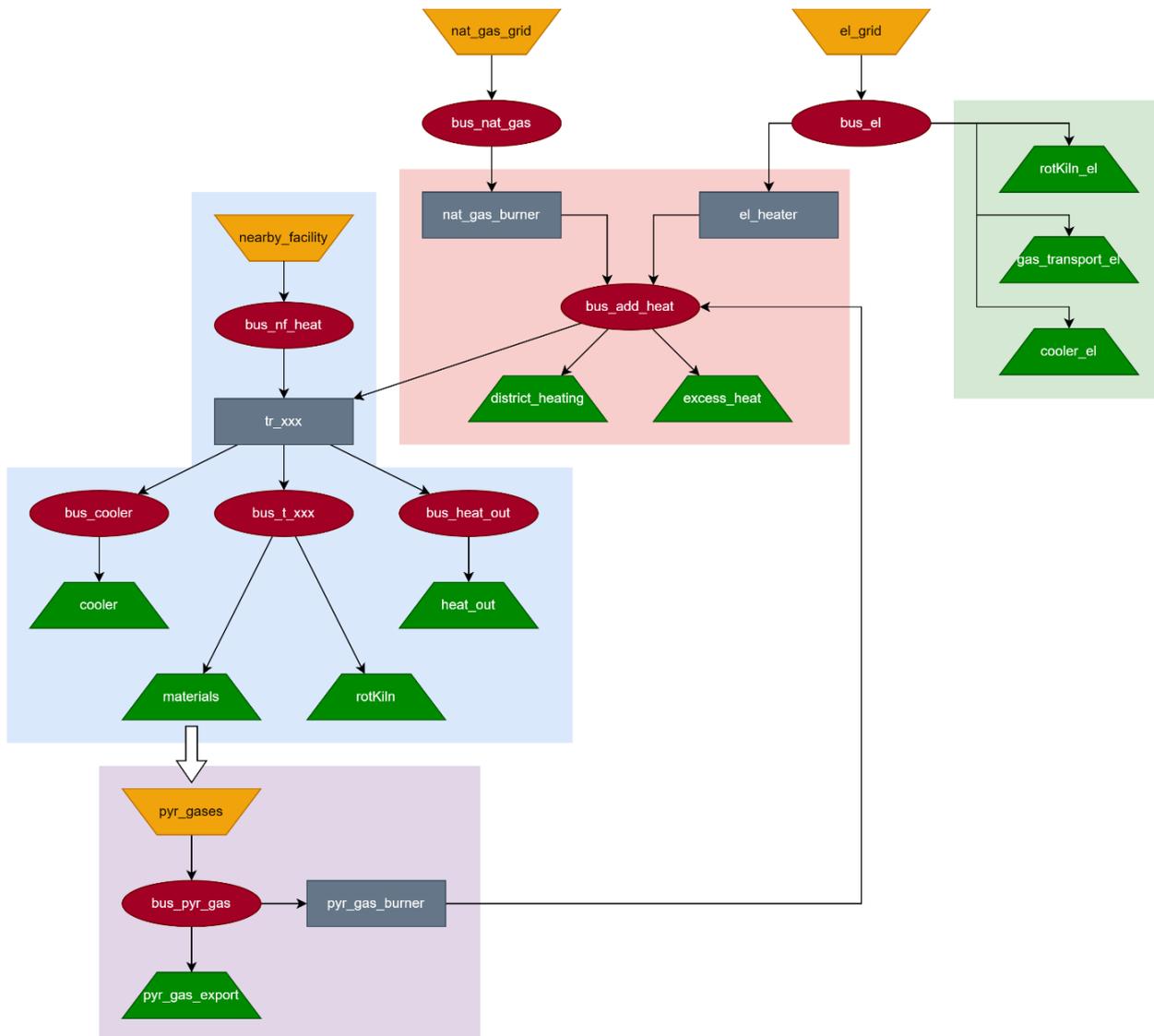


Abbildung 4-17: Finales OEMOF-Gesamtmodell

Hauptkomponenten

Die Hauptkomponenten der Anlage sind in Abbildung 4-17 mit blauem Hintergrund markiert. Diese bestehen aus der Zufuhr des nutzbaren Heißgases („nearby_facility“), der „cooler“- und „heat_out“-Komponente, den Sinks für die Materialien („materials“ – dargestellt als ein gesammelter Sink) und dem Drehrohren („rotKiln“).

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, werden auch Transformer und Busse für die angegebenen Temperaturniveaus hinzugefügt. Diese sind in Abbildung 4-17 als „tr_xxx“ bzw. „bus_t_xxx“ dargestellt, wobei im realen Modell für jedes Temperaturniveau ein solches Element eingebaut wird (vgl. Abbildung 4-14).

Pyrolysegas

Bei der Pyrolyse der Materialien wird brennbares Gas frei. Die Handhabung dieses Gases erfolgt durch die Komponenten, die in Abbildung 4-17 durch den violetten Hintergrund markiert sind. Die Komponente „pyr_gases“ stellt das zur Verfügung stehende Pyrolysegas dar. Der Energiefluss aus dieser Source wird vom Optimierer in Abhängigkeit zur pyrolysierten Materialmenge berechnet, wie in Gleichung (4-24) dargestellt ist.

$$\forall z \in Z: P_{pyr_gases}(z) = \sum_{m \in M} P_{th}(m, z) * \frac{c_v(m)}{Q_s(m)} \quad (4-24)$$

Dabei stellt Z die gesamte Menge der Zeitschritte, P_{pyr_gases} die maximal mögliche Leistung des entstehenden Pyrolysegas, M die gesamte Menge der Materialien, P_{th} die thermische Leistung des verwendeten Heißgases, c_v den spezifischen Brennwert des Pyrolysegas und Q_s die spezifische Pyrolyseenergie dar. Die zwei letzteren Werte werden auf die Materialmasse bezogen und müssen vor der Berechnung im Modell gesetzt werden.

Das Pyrolysegas kann auf zwei Arten genutzt werden. Der Verkauf – bzw. die Weiterleitung an einen nebenstehenden Prozess – erfolgt durch die Komponente „pyr_gas_export“. Dadurch verlässt das Gas den Prozess und kann einen Erlös erwirtschaften. Die zweite Art der Nutzung ist die Direktnutzung im Prozess selbst. Dabei wird das Pyrolysegas in einer Nachbrennkammer (dargestellt durch „pyr_gas_burner“) verbrannt und die freiwerdende Wärme wird genutzt, um das benötigte Temperaturniveau zu garantieren.

Zusätzliche Wärme

Damit die Temperatur des Abgases erhöht werden kann, werden die Komponenten hinzugefügt, welche die zusätzliche Wärme bereitstellen. Diese sind in Abbildung 4-17 durch einen roten Hintergrund markiert. Die drei Wärmequellen bestehen aus einem Erdgas-Brenner „gas_burner“, einem elektrischen Heizelement „el_heater“ und der freiwerdenden Wärme durch die Verbrennung des Pyrolysegas. In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund firmenpolitischer Entscheidungen die Nutzung von Erdgas (fossile Energie) abgelehnt und der dazugehörige Energiefluss auf null gesetzt. Um die Möglichkeit der Erdgasnutzung für zukünftige Anlagen trotzdem einzuschließen, wurde entschieden das Element im Modell zu belassen.

Die beiden Sinks kommen bei überschüssigen Wärmemengen zum Einsatz. Die Komponente „district_heating“ stellt die mögliche Anbindung der Anlage an ein Fernwärmenetz dar. Dadurch kann überschüssige Wärme gewinnbringend genutzt werden, bzw. kann bei hohen Einspeiserlösen zusätzliche Wärme – bspw. durch Verbrennung von Pyrolysegas – erzeugt werden. Dies wird durch den Optimierer ermittelt. Der zweite Sink „excess_heat“ ist ein virtuelles Element. Dieses dient dazu, Wärme aufzunehmen, die weder durch den Prozess, noch durch Verkauf, abgegeben werden kann, und verhindert somit einen Abbruch der Berechnung (durch nicht-Lösbarkeit des Gleichungssystems). Im Regelfall ist der Wärmefluss zu diesem Sink über die gesamte Zeitspanne null.

Elektrische Verbraucher

Die reale Anlage benötigt zusätzlich zur Wärme für den Prozess auch elektrische Energie. Diese wird für den Transport des nutzbaren Abgases (Gebläse, Verdichter o. ä.) und die Rotation des Drehrohrofens benötigt. Die elektrischen Verbraucher sind in Abbildung 4-17 durch einen grünen Hintergrund markiert.

Dabei stellt „rotKiln_el“ den Verbrauch des elektrischen Motors für die Rotation des Drehrohrofens dar. Dieser wird als konstanter Wert angegeben und in den Zeitschritten aktiviert, in denen die Anlage aktiv ist. Die beiden Sinks „gas_transport_el“ und „cooler_el“ werden für die Gebläse verwendet, mit denen das Heißgas transportiert wird. Erstere weist in jedem Zeitschritt einen Verbrauch auf, in dem Heißgas von der

nebenstehenden Anlage bezogen wird. Zweitere ist immer aktiv, wenn das Gas gekühlt werden muss, um bspw. den Druckverlust eines Wärmeübertragers auszugleichen. Dabei wird auch bei der Kühlung der gesamte Volumenstrom des nutzbaren Abgases zur Berechnung verwendet.

Die Berechnung der Förderleistung erfolgt nach der Formelsammlung von Anton Schweizer [11]. Dabei wird angenommen, dass für den Leistungsbedarf des Heißgastransportes die Gleichungen für Ventilatoren für die Lüftungstechnik verwendet werden können. Der elektrische Leistungsbedarf kann mit Hilfe von Gleichung (4-25) berechnet werden.

$$P_{el} = \frac{\dot{V} * \Delta p}{\eta_{blower} * \eta_{motor}} \quad (4-25)$$

Dabei stellt P_{el} die benötigte elektrische Leistung, \dot{V} den Volumenstrom, Δp den zu überwindenden Druckunterschied, η_{blower} den thermodynamischen Wirkungsgrad des Gebläses und η_{motor} den elektrischen Wirkungsgrad des Motors dar. Da von der Pilotanlage von Seccon, und zukünftige Anlagen, keine Angaben für die Wirkungsgrade zur Verfügung stehen, werden in der Optimierung beispielhafte Werte aus Fachliteratur verwendet. Für η_{blower} wird 0,7 [12] und für η_{motor} 0,9 [13] eingefügt. Diese werden über den gesamten Volumenstrom als konstant angenommen. Bei zukünftigen Berechnungen für eine reale Anlage können die realen Werte gemessen oder den Maschinenspezifikationen entnommen und eingesetzt werden.

Da in OEMOF mit Energieflüssen gerechnet wird, muss der Volumenstrom während der Optimierung berechnet werden. Dem Modell wird Gleichung (4-26) für die Berechnung hinzugefügt.

$$\dot{V} = \frac{P_{th}}{\rho * c_p * (T_{in} - T_{env})} \quad (4-26)$$

Dabei stellt P_{th} die thermische Leistung dar, die vom Heißgas der nebenstehenden Anlage abgegeben wird. Diese wird vom Optimierer für jeden Zeitschritt berechnet. Die Variable ρ stellt die Dichte des Gases und c_p die spezifische Wärmekapazität dar. Diese Variablen werden über den gesamten Temperaturbereich als konstant angenommen und auf gemittelte Literaturwerte für CO₂ zwischen 0 °C und 1.200 °C gesetzt. Die Dichte beträgt dadurch 1,9767 kg/m³ und die spezifische Wärmekapazität 1,1554 kJ kg⁻¹ K⁻¹ [7]. Die beiden Temperaturvariablen – T_{in} für die Eintrittstemperatur des Heißgases und T_{env} für die Umgebungstemperatur – werden durch Inputverläufe vorgegeben.

4.6 Eingabeparameter und -daten

Abhängig von der zu untersuchenden Anlage können die Eingabedaten des Programmes angepasst werden, um eine praxisnahe Berechnung zu ermöglichen. Im folgenden Kapitel werden die Eingabewerte für den Python-Code zusammenfassend beschrieben. Grundlegende Kenntnisse zu Python werden vorausgesetzt.

Allgemeine Informationen zur Optimierung:

In Tabelle 4-2 werden allgemeine Eingabewerte beschrieben, die das Modell und der Optimierer benötigen. Dem Modell werden diese Werte als Python-Dictionary mit der Bezeichnung *opt_info* übergeben.

Tabelle 4-2: Bezeichnung und Beschreibung der allgemeinen Eingabewerte für die Optimierung des OEMOF-Modells

Bezeichnung	Beschreibung
<i>number_of_timesteps</i>	Anzahl der zu untersuchenden Zeitschritte
<i>hourly_interval</i>	Zeitunterschied zwischen aufeinanderfolgenden Zeitschritten in Stunden angegeben
<i>start_of_timesteps</i>	Start-Datum und -Uhrzeit der Zeitschritte
<i>solver</i>	Bezeichnung des zu verwendenden Solvers
<i>solver_verbose</i>	Entscheidungsvariable, ob Solver-Informationen laufend ausgegeben werden sollen
<i>mipgap</i>	„Genauigkeit“ der Solver-Berechnung
<i>rand_seed</i>	Seed für „Random-Profile-Generator“
<i>give_process_plan</i>	Entscheidungsvariable, ob Prozessplan vorgegeben wird oder vom Optimierer berechnet wird
<i>t_out_is_t_env</i>	Entscheidungsvariable, ob Referenztemperatur auf Umgebungstemperatur gesetzt werden soll
<i>safe_model</i>	Entscheidungsvariable, ob das Modell nach der fertigen Berechnung als Datei gespeichert werden soll

Materialspezifikationen:

Die benötigten Informationen für die Materialien werden im Python-Dictionary *materials* gesetzt. Die *dict.keys* geben die Bezeichnungen der unterschiedlichen Materialien an. Um für jedes Material spezifische Informationen anzugeben, wird in den *dict.values* wiederum ein Python-Dictionary angelegt. Die darin enthaltenen Werte sind in Tabelle 4-3 beschrieben.

Tabelle 4-3: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Materialspezifikationen des OEMOF-Modells

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>T</i>	Benötigte Prozesstemperatur	<i>K</i>
<i>m</i>	Maximal zu verarbeitende Material-Masse	<i>kg</i>
<i>Qs</i>	Spezifische Pyrolyseenergie	$\frac{kWh}{kg(\text{Inputmasse})}$
<i>cv</i>	Spezifischer Brennwert des entstehenden Pyrolysegases	$\frac{kWh}{kg(\text{Inputmasse})}$
<i>PpM</i>	Spezifischer Erlös des pyrolysierten Materials	$\frac{\text{€}}{kg(\text{pyrolysiertes Material})}$

Eingabeverläufe und -profile:

Die für die Optimierung benötigten zeitlichen Verläufe und Profile werden dem Python-Dictionary *profiles* hinzugefügt. Eine Beschreibung dieser Informationen wird in Tabelle 4-4 angeführt. Die Verläufe, welche keine Einheit vorweisen, sind als relative Verläufe anzunehmen. Sie können nur Werte von null (Minimum) bis eins (Maximum) annehmen.

Tabelle 4-4: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Eingabe-Verlaufsprofile des OEMOF-Modells

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>flow_hot_input_gas</i>	Relativer Verlauf für die maximale, durch die nebenstehende Anlage, lieferbare Energie	-
<i>flow_district_heating</i>	Relativer Verlauf für die maximal mögliche, in das Fernwärmenetz, einzuspeisende Energie	-
<i>temperature_hot_input_gas</i>	Temperaturprofil des nutzbaren Heißgases aus der nebenstehenden Anlage	K
<i>temperature_environment</i>	Temperaturprofil der Umgebungstemperatur	K
<i>costs_electricity</i>	Spezifisches Kostenprofil für elektrischen Strom	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>costs_natural_gas</i>	Spezifisches Kostenprofil für Erdgas	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>rho_hot_input_gas</i>	Dichteverlauf des nutzbaren Abgases aus der nebenstehenden Anlage	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
<i>cp_hot_input_gas</i>	Verlauf der spezifischen Wärmekapazität des nutzbaren Abgases aus der nebenstehenden Anlage	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Drehrohrofenspezifikationen:

Die benötigten Informationen zur Anlage und zum Betrieb des Drehrohrofens werden im Python-Dictionary *rotary_kiln_specs* gesetzt. Die Eingabedaten werden in Tabelle 4-5 beschrieben.

Tabelle 4-5: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Drehrohrofenspezifikationen des OEMOF-Modells

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>max_mass</i>	Maximal möglicher Massendurchsatz	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$
<i>max_power</i>	Maximal mögliche thermische Leistung	kW
<i>residence_time</i>	Durchlaufzeit des Materials	min
<i>base_consumption</i>	Leerlauf- bzw. Verlustleistung des Drehrohrofens	kW
<i>electrical_consumption</i>	Elektrischer Strombedarf für Rotationsbewegung	kW
<i>working_hours</i>	Betriebsstunden eines Tages	-

Fortsetzung Tabelle 4-5: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Drehrohrofenspezifikationen des OEMOF-Modells

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>working_days</i>	Werktage einer Woche	-
<i>min_up_time</i>	Mindestanzahl an Zeitschritten, die Material pyrolysiert werden muss, bevor gewechselt werden darf	-
<i>process_temperature_levels</i>	In der Optimierung berücksichtigte Prozesstemperatur-Stufen	<i>K</i>
<i>outlet_temperature_levels</i>	Drehrohrofen-Austrittstemperaturen	<i>K</i>
<i>process_plan</i>	Manuell erstellter Prozessplan	-

Spezifikationen der OEMOF-Komponenten:

Die Komponenten und Elemente im Modell benötigen zusätzliche Eingabewerte, wie bspw. spezifische Kosten, Nominalwerte oder Wirkungsgrade. Die anzugebenden Daten werden in Tabelle 4-6 beschrieben und im Programm im Python-Dictionary *comp_specs* festgehalten. Die Nominalwerte geben den maximalen Energiefluss an, den die jeweilige Komponente erlaubt.

Tabelle 4-6: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Spezifikationen der OEMOF-Komponenten

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>costs_cooling</i>	Spezifische Kosten bzw. Erlöse für die „cooler“-Komponente	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>costs_district_heating</i>	Spezifische Erlöse für Fernwärme-Einspeisung	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>costs_heat_out</i>	Spezifische Erlöse für Abwärme aus Drehrohrofen	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>costs_pyrolysis_gas</i>	Spezifische Erlöse für Pyrolysegas-Verkauf	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>costs_useable_gas</i>	Spezifische Kosten für nutzbares Heißgas aus nebenstehender Anlage	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
<i>nomVal_district_heating</i>	Nominalwert der Fernwärmeeinspeisung	<i>kW</i>
<i>nomVal_electricity</i>	Nominalwert des elektrischen Netzanschlusses	<i>kW</i>
<i>nomVal_natural_gas</i>	Nominalwert des Erdgasnetz-Anschlusses	<i>kW</i>
<i>nomVal_temperature_transformers</i>	Nominalwert der Temperatur-Transformer-Komponenten	<i>kW</i>
<i>nomVal_useable_gas</i>	Nominalwert des nutzbaren Heißgases aus der nebenstehenden Anlage	<i>kW</i>

Fortsetzung Tabelle 4-6: Bezeichnung, Beschreibung und Maßeinheit der Spezifikationen der OEMOF-Komponenten

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>nomVal_cooler</i>	Nominalwert der „cooler“-Komponente	<i>kW</i>
<i>eta_nat_gas_burner</i>	Wirkungsgrad des Erdgasbrenners	-
<i>eta_pyr_gas_burner</i>	Wirkungsgrad des Pyrolysegasbrenners	-
<i>eta_electric_heater</i>	Wirkungsgrad der elektrischen Heizelemente	-
<i>del_p_pipeline</i>	Druckverlust der Pipeline von der nebenstehenden Anlage bis zum Drehrohrofen	<i>Pa</i>
<i>del_p_cooler</i>	Druckverlust im Wärmeübertrager bei der Kühlung des Heißgases	<i>Pa</i>
<i>eta_blower</i>	Wirkungsgrad des Heißgas-Gebläses bzw. -Verdichters	-
<i>eta_motor</i>	Wirkungsgrad des Elektromotors für das Gebläse	-

Emissionsgrenzwerte

Die letzten zu definierenden Angaben sind die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte. Im Python-Dictionary *totEmLim* werden die über den gesamten Zeitraum summierten Emissionsgrenzwerte angegeben. In *timestepEmLim* werden die jeweiligen Emissionsgrenzwerte pro Zeitschritt definiert. Sie werden hier nicht genauer beschrieben, da die Emissionszusammensetzung des Gases von der Anlage abhängig ist und variabel angepasst werden muss.

5 OPTIMIERUNGS-SZENARIEN

In den folgenden Kapiteln wird das erstellte Modell getestet und untersucht. Zu Beginn wird ermittelt, mit welcher Ergebnislösung die Optimierungen durchlaufen werden sollen, wie das Modell konfiguriert wird und wie die Simulationen ausgewertet werden. In den darauffolgenden Kapiteln werden vier Szenarien ausgearbeitet, durch welche ein breiter Überblick über mögliche Betriebsbedingungen gegeben wird. Abschließend werden die Ergebnisse der Simulationen zusammengefasst und verglichen, durchschnittliche Energiepreise und die Nachnutzung des Drehrohren-Abgases untersucht und die Herausforderungen des Optimierungskonzeptes beleuchtet.

5.1 Rechendauer und Ergebnislösung der Optimierung

Bevor die Szenarien ausgewertet werden können, muss die erforderliche Güte des Ergebnisses festgelegt werden. Für den, in dieser Arbeit verwendeten, Gurobi-Solver kann eine Mindestgüte angegeben werden, die als Abbruchkriterium für die Optimierung gilt. Der Parameter ist in Tabelle 4-2 als *mipgap* aufgelistet („mip“ für „mixed-integer programming“ und „gap“ für Lücke). [14]

Dieser Parameter gibt den tatsächlichen Unterschied des Ergebnisses zur endgültigen Lösung an. Das bedeutet, dass das vom Solver errechnete Ergebnis sich höchstens um die angegebene MIPGap vom globalen Optimum unterscheidet. Die Berechnung wird beendet, wenn diese Voraussetzung erfüllt ist. [14]

Je niedriger die MIPGap, desto besser ist das Endergebnis. Jedoch erhöht sich auch die Rechendauer, was zu zeitaufwändigen Optimierungen führen kann. In einer ersten Berechnung, die mit dem erstellten Modell und beispielhaften Parametern durchgeführt wird, ergibt sich der Zusammenhang zwischen Optimierungsergebnis und MIPGap, wie in Abbildung 5-1 dargestellt. Auf der Abszisse ist der Prozentsatz der MIPGap angegeben, auf der Ordinate der errechnete Gewinn. Das Beispiel wird jeweils mit 100, 200 und 300 Zeitschritten optimiert (gleiche Voraussetzungen und Einstellungen) und die Zusammenhänge werden untersucht. Als Referenz dazu wird eine Berechnung mit vorgegebenem Prozessplan durchgeführt.

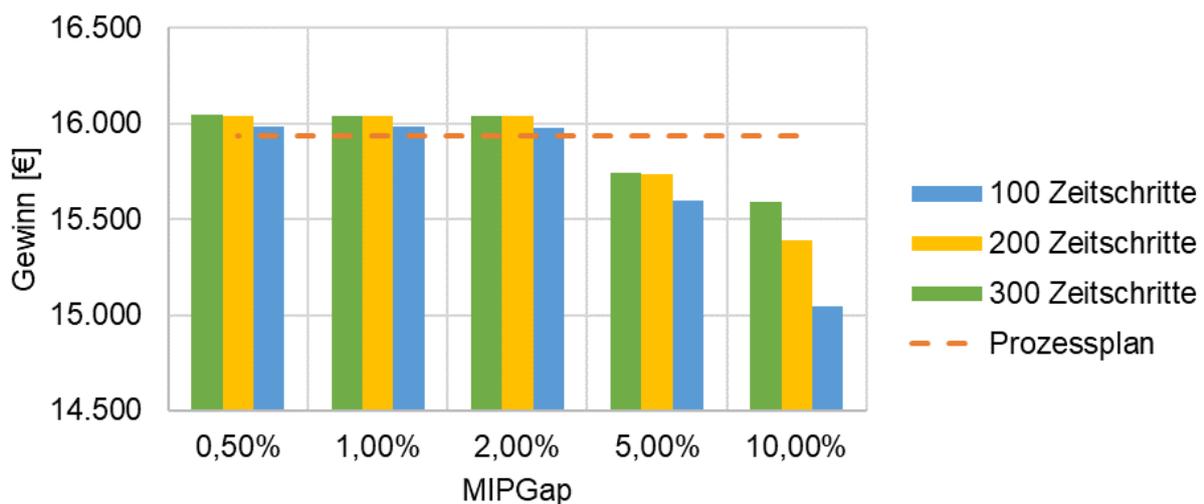


Abbildung 5-1: Zusammenhang von MIPGap zu Optimierungsergebnis im Balkendiagramm dargestellt

In Abbildung 5-1 ist zu beobachten, dass die Menge der Zeitschritte das optimierte Ergebnis beeinflusst. Je mehr Zeitschritte zur Verfügung stehen, desto besser ist das erhaltene Ergebnis (mehr Freiheitsgrade). Bei einer MIPGap von 10 % ist der Unterschied der Ergebnisse am stärksten zu beobachten. Bei kleiner werdender MIPGap wird auch der relative Unterschied zwischen den Szenarien geringer. Ab einer MIPGap von 2 % (und kleiner) übersteigt das vom Optimierer errechnete Ergebnis den Wert des Prozessplanes.

Ein besseres Optimierungsergebnis hat jedoch eine längere Rechendauer zur Folge. Dies ist für die untersuchten Beispiele in Abbildung 5-2 dargestellt. Auf der Ordinate ist die Rechendauer in Minuten angegeben.

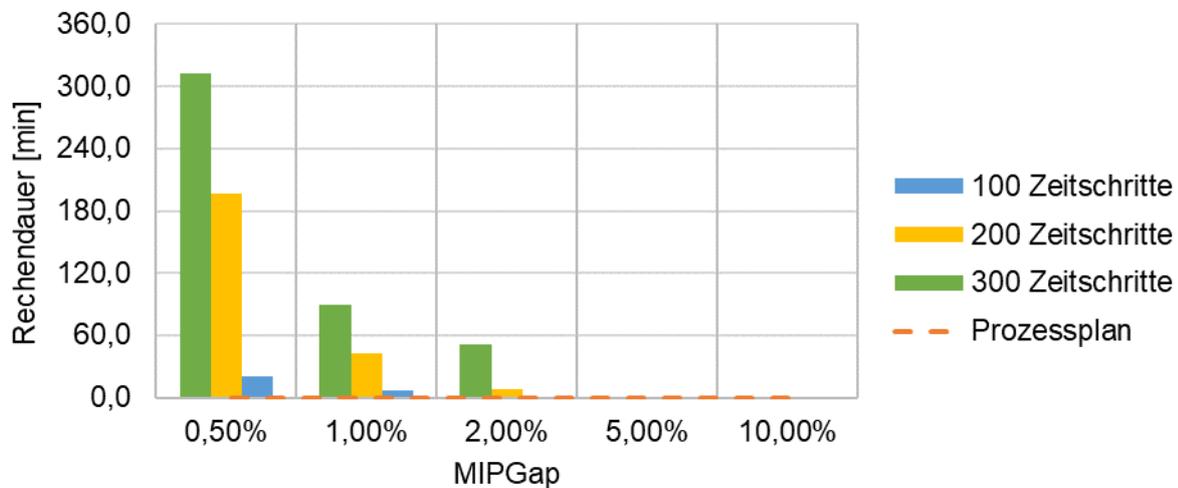


Abbildung 5-2: Zusammenhang von MIPGap und Rechendauer

Es kann beobachtet werden, dass die Rechendauer in Abhängigkeit zur MIPGap, annähernd exponentiell ansteigt. Auch die Anzahl der Zeitschritte beeinflusst die Rechendauer. Je mehr Zeitschritte angegeben werden, desto länger braucht der Optimierer, um ein Ergebnis zu erzielen. Bei einer großen MIPGap, ist die Rechendauer gering (bspw. bei 5 % und 10 %). Auch bei dem vorgegebenen Prozessplan ist die Rechendauer gering, da die Optimierung nur eine geringe Anzahl an Freiheitsgraden besitzt.

Auch für die Optimierung der Szenarien, die in den folgenden Kapiteln berechnet werden, muss eine MIPGap angegeben werden. Anhand der oben dargestellten Analyse wird die MIPGap für die folgenden Auswertungen auf 1 % festgelegt. Bei diesem Wert bleibt die Rechendauer der Optimierung in praktisch möglichen Grenzen und die Ergebnisgüte verbessert sich bei kleineren MIPGaps nur mehr vernachlässigbar.

5.2 Modellkonfiguration und Methodik der Simulation und Auswertung der Szenarien

Im folgenden Kapitel wird auf die Durchführung der Szenarien-Berechnung eingegangen und die wichtigsten Eingabeparameter werden beschrieben. Um den Optimierer zu testen und Energie- und Kosteneinsparungspotentiale zu erkennen werden vier Szenarien analysiert. Das erste beschreibt die bereits bestehende Pilotanlage („small scale demonstrator“ – SSD), die drei weiteren eine zukünftig zu errichtende Großanlage („large scale demonstrator“ – LSD). Die vier Szenarien sind (mit Kurzbezeichnung in den Klammern) folgende:

- Pilotanlage (SSD),
- Großanlage im Sommer (LSD – Sommer),
- Großanlage im Winter (LSD – Winter) und
- Großanlage ohne Heißgas-Versorgung (LSD – Wartung).

Materialparameter:

In jedem der vorliegenden Szenarien werden vier Abfallprodukte pyrolysiert, um die wertvollen Bestandteile von den Störstoffen (bspw. organische Beschichtungen) zu trennen. Folgende Materialien werden definiert:

- Kaffee kapseln,
- Leiterplatten,
- Biomasse und
- Faserverbundwerkstoffe.

Jeder dieser Abfälle enthält Wertstoffe, die durch die Pyrolyse von den Störstoffen getrennt werden und gewinnbringend verkauft werden können. Die Prozesseigenschaften für die Pyrolyse und der Verkaufserlös sind für jedes der Materialien unterschiedlich. In den untersuchten Szenarien werden für die Abfallfraktionen die in Tabelle 5-1 angegebenen Werte gesetzt. Diese werden vom Projektpartner vorgegeben, bzw. anhand von Literaturwerten aus den Quellen [15–21] errechnet. Die angegebenen Werte sind für alle Szenarien dieselben. Die Einheiten, in denen die Werte angegeben werden, können aus Tabelle 4-3 entnommen werden.

Tabelle 5-1: Materialparameter für die Szenarien mit Quellenangabe

Parameter	Kaffee kapseln	Leiterplatten	Biomasse	Faserverbundwerkstoffe	Quellen
<i>T</i>	773	773	1073	973	[15–18]
<i>Qs</i>	0,625	5,469	2,39	0,778	[15–17, 19]
<i>cv</i>	0,499	0,664	3,75	0,56	[15–17, 19]
<i>PpM</i>	0,26 ¹	1,4 ¹	0,105	1,0	[20, 21]

Modellparameter:

Das verwendete Modell bleibt in allen vier Szenarien unverändert. Die verschiedenen Simulationen unterscheiden sich nur durch die Einstellungen und Eingabeparameter, die dem Modell übergeben werden. Die wichtigsten dieser Parameter sind in Tabelle 5-2 angegeben. Die rechte Spalte der Tabelle gibt die Quellen an, auf deren Basis die Werte definiert sind. Die Parameter werden von Seccon vorgegeben, bzw. anhand von Literaturwerten aus [22–27] für die untersuchten Szenarien geschätzt. Die Parameter, welche keine Quelle vorweisen, werden nach Absprache mit dem Projektteam definiert. Für die Kostenverläufe der Energiequellen werden prognostizierte Day-Ahead-Preise für das Jahr 2025 von Traupmann et al. [28] verwendet, da in diesem Jahr sowohl der reguläre Betrieb der Pilotanlage, als auch die Inbetriebnahme einer Großanlage erwartet wird. Für detailliertere Informationen zu den Eingabedaten ist im Anhang die Tabelle 8-1 hinterlegt, welche einen Überblick über alle einzustellenden Parameter des Modelles gibt.

¹ Vom Projektpartner Seccon vorgegeben

Tabelle 5-2: Wichtigste Parameter-Einstellungen der Szenarien

Parameter	SSD	LSD – Sommer	LSD – Winter	LSD – Wartung	Quellen
Anzahl Zeitschritte	1.008	1.488	1.488	1.488	-
Dauer Zeitschritte	10 min	30 min	30 min	30 min	-
Start der Betrachtung am	01.04.2025	01.07.2025	01.01.2025	01.01.2025	-
Fernwärme-Einspeisung	nein	ja	ja	ja	Seccon
Prozessgas-Temperatur	Atmosphäre	ca. 600 °C	ca. 600 °C	Atmosphäre	[22]
Pyrolysegas-Verkauf	nein	ja	ja	nein	Seccon
Heißgas-Begrenzung	keine	8.000 kW	8.000 kW	keine	Seccon
Massenstrom-Begrenzung	500 kg/h	4.000 kg/h	4.000 kg/h	4.000 kg/h	Seccon
Prozesswärme-Begrenzung	2.000 kW	17.000 kW	17.000 kW	17.000 kW	[23, 24]
Durchlaufzeit Material	30 min	60 min	60 min	60 min	[25–27]
Arbeitszeit	6:00 bis 18:00 Uhr	durchgängig	durchgängig	durchgängig	Seccon
Werkzeuge	Montag bis Samstag	durchgängig	durchgängig	durchgängig	Seccon
Mindestzeit bis Materialwechsel	60 min	4 h	4 h	4 h	-
Kaffeekapseln	8.000 kg	800.000 kg	800.000 kg	800.000 kg	-
Biomasse	5.000 kg	350.000 kg	350.000 kg	350.000 kg	-
Leiterplatten	2.000 kg	100.000 kg	100.000 kg	100.000 kg	-
Faserverbundwerkstoffe	3.000 kg	250.000 kg	250.000 kg	250.000 kg	-

Für die Pilotanlage (SSD) wird die erste Kalenderwoche im April 2025 untersucht (moderate Umgebungstemperaturen). Das Technikum von Seccon verfügt über keine Heißgaszufuhr (die gesamte Wärme wird durch Erdgas und elektrischen Strom bereitgestellt). Für das Prozessgas wird deshalb Inertgas bzw. Frischluft verwendet, welches Atmosphärentemperatur besitzt. Dieses muss bspw. durch eine Elektroheizung auf die benötigte Prozesstemperatur erwärmt werden, bevor es in den Drehrohren eingeleitet wird. Das Technikum beinhaltet keine Fernwärmeeinspeisung und keine Möglichkeit, das entstehende Pyrolysegas zu verkaufen. Die Lieferleistung der externen Energiequellen (bspw. elektrisches Stromnetz) soll vom Optimierer als unbegrenzt angenommen werden. Da für die Berechnung ein Wert vorausgesetzt wird, werden die Nominalwerte dieser Energieflüsse auf ein Terawatt (praktisch unbegrenzt) gesetzt. Eine Arbeitswoche besteht aus sechs Tagen, wobei zwölf Stunden pro Tag gearbeitet wird. Es wird festgelegt, dass eine Materialart mindestens 60 Minuten pyrolysiert werden muss, bevor ein Wechsel der Abfallfraktion vorgenommen werden darf. Insgesamt wird im betrachteten Zeitraum eine Masse von 18 Tonnen Abfall pyrolysiert.

Für eine zukünftig zu errichtende Großanlage (LSD) werden drei Szenarien untersucht. Diese Anlage läuft ganztägig und für sieben Tage pro Woche. Die Optimierung betrachtet jeweils ein Kalendermonat in 30-Minuten-Schritten. Die Anlage ist an einen nebenstehenden thermischen Prozess angebunden, von dem Heißgas für die Pyrolyse bezogen werden kann (vgl. Patent in Kapitel 2). Ein Materialwechsel kann höchstens alle vier Stunden durchgeführt werden. Um die Anlage zu verschiedenen Betriebszeitpunkten zu vergleichen, werden die Materialmassen für alle drei Szenarien auf die gleichen Werte gesetzt (jeweils insgesamt 1.500 Tonnen).

Das erste Szenario der Großanlage stellt den Kalendermonat Juli dar (LSD – Sommer). Im zweiten (LSD – Winter) und dritten (LSD – Wartung) Szenario der Großanlage wird der Kalendermonat Januar dargestellt. Durch die Gegenüberstellung von Sommer- und Wintermonaten kann der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Energiekosten auf den Betrieb der Anlage untersucht werden.

In den ersten beiden Szenarien der Großanlage ist die nebenstehende thermische Produktion in Betrieb und Heißgas steht für den Pyrolyseprozess zur Verfügung. Die Temperatur des Prozessgases wird durch einen zufällig generierten Verlauf (ca. 600 °C) vorgegeben. Das entstehende Pyrolysegas kann zum nebenstehenden Prozess abgeführt und gewinnbringend verkauft werden. Das dritte Szenario stellt die Zeit dar, während der die nebenstehende Anlage gewartet wird und außer Betrieb ist. Es kann deshalb kein Heißgas genutzt werden und das Prozessgas wird wie bei der Pilotanlage auf Umgebungstemperatur gesetzt. Außerdem ist der Verkauf des Pyrolysegases nicht möglich.

Simulation und Auswertung

Für jedes Szenario werden jeweils zwei Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. In der ersten Simulation wird der zeitliche Materialeinsatz gemäß gängiger Praxis mittels Prozessplan vorgegeben. Optimierte dabei nur der Einsatz der unterschiedlichen Energiequellen in jedem Zeitschritt, der zeitliche Materialeinsatz (und somit die benötigte Energiemenge) ist nicht veränderbar. In der zweiten Simulation wird zusätzlich zum zeitlichen Energieeinsatz auch der zeitliche Materialeinsatz vom Optimierer hinsichtlich minimaler Kosten ermittelt. Die Eingabedaten (bspw. Kostenprofil) bleiben dabei unverändert.

Die verfügbaren Materialmengen sind in beiden Simulationen gleich. In der Simulation mit vorgegebenem Prozessplan wird das gesamte verfügbare Material verarbeitet, in der Simulation mit der Optimierung kann auch nur ein Teil des Materials verarbeitet werden (wird abhängig von den Randbedingungen vom Optimierer ermittelt). Folglich kann der Optimierer nicht wirtschaftliche Materialien identifizieren.

Die wichtigsten Input- und Outputparameter für beide Simulationen sind in Tabelle 5-3 festgehalten. Die Heißgastemperatur, Umgebungstemperatur, Materialparameter, Energiekosten- und Erlösprofile werden bei beiden Simulationen als Inputparameter vorgegeben. Der vorgegebene Prozessplan enthält den Energielastgang für jedes Material (entsprechend dem Materialdurchsatz) und das zeitliche Prozesstemperaturprofil. Diese beiden Parameter werden bei der Optimierung nicht vorgegeben und können vom Optimierer so gewählt werden, dass der Gewinn auf ein Maximum ansteigt.

Tabelle 5-3: Wichtigste Input- und Outputparameter bei vorgegebenem Prozessplan und Optimierung

	Bezeichnung	Prozessplan	Optimierung
Inputparameter	Energielastgang pro Material (entsprechend Materialdurchsatz)	✓	
	Heißgastemperaturprofil	✓	✓
	Prozesstemperaturprofil	✓	
	Spezifische Pyrolyseenergie Material	✓	✓
	Spezifische Verkaufserlöse Wertstoffe	✓	✓
	Spezifisches Erlösprofil Fernwärmeeinspeisung	✓	✓
	Spezifisches Erlösprofil Pyrolysegasverkauf	✓	✓
	Spezifisches Kostenprofil elektrischer Strom	✓	✓
	Spezifisches Kostenprofil Erdgas	✓	✓
	Umgebungstemperaturprofil	✓	✓
Outputparameter	Abgastemperaturprofil	✓	✓
	Erlöse Fernwärmeeinspeisung	✓	✓
	Erlöse Pyrolysegasverkauf	✓	✓
	Erlöse Wertstoffverkauf	✓	✓
	Gesamtenergiemenge	✓	✓
	Gesamter Energielastgang	✓	✓
	Kosten elektrischer Strom	✓	✓
	Kosten Erdgas	✓	✓
	Materialdurchsatz		✓
	Prozesstemperaturprofil		✓

Die Outputparameter in Tabelle 5-3 bestehen aus den Erlösen durch Energie- und Wertstoffverkauf, der Gesamtenergiemenge (sowohl für Energiequellen, als auch für -verbraucher) und den gesamten Energiekosten. Das Temperaturprofil des Drehrohrofenabgases ist von der Prozesstemperatur abhängig und wird deshalb auch als Outputparameter definiert. Der zeitliche Materialdurchsatz stellt nur bei der Optimierung einen Output dar. Entsprechend wird auch das Prozesstemperaturprofil bei der Optimierung an den Materialeinsatz angepasst.

Durch die Gegenüberstellung der beiden Simulationsergebnisse kann die optimale Fahrweise für den Drehrohrofen bestimmt und Einsparungspotentiale ermittelt werden. Für die Ergebnisinterpretation werden für jede Simulation folgende Grafiken ausgegeben:

- Energiekostenprofil,
- Temperaturprofil,
- Materialdurchsatz,
- Energielastgang,
- Gesamtenergiebetrachtung und
- Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung.

In den folgenden Kapiteln werden die erhaltenen Grafiken interpretiert und Einsparungspotentiale ermittelt. Das Energiekostenprofil wird für jedes Szenario nur einmal dargestellt, da es für beide Simulationen gleich ist. Das Temperaturprofil, der Materialdurchsatz, der Energielastgang und die Gesamtenergiebetrachtung werden jeweils für die Simulation mit vorgegebenem Prozessplan und die Optimierung ausgegeben.

Das Gewinnsteigerungspotential wird erhalten, wenn die Simulationsergebnisse des vorgegebenen Prozessplanes mit den Ergebnissen des optimierten Materialeinsatzes verglichen werden. Dabei wirken nur die Erlöse der Wertstoffe und der Verkauf von Fernwärme bzw. Pyrolysegas umsatzsteigernd. Für die Kosten werden ausschließlich die variablen Prozesskosten (Energiekosten) in die Berechnung mit aufgenommen. Da sowohl bei vorgegebenem Prozessplan, als auch beim optimierten Materialeinsatz die gleichen Randbedingungen gelten und die gleichen Zeiträume untersucht werden, können die Fixkosten in beiden Simulationen als gleich groß angenommen werden. Etwaige Investitions-, Transport-, Instandhaltungs-, und Lohnkosten werden in der Gewinnpotentialberechnung deshalb nicht berücksichtigt.

5.3 Szenario 1: SSD

Im ersten Szenario wird die bereits bestehende Pilotanlage am Technikum von Seccon untersucht (SSD). Für den Betrachtungszeitraum wird die erste Aprilwoche des Jahres 2025 gewählt, wobei moderate Außentemperaturen vorherrschen (ca. von -2 °C bis 20 °C). Die Anlage ist im Zwei-Schichten-Betrieb (6:00 Uhr bis 18:00 Uhr) und sechs Tage pro Woche (Montag bis Samstag) aktiv. Der maximal mögliche Materialdurchsatz wird mit 500 kg/h, die maximal mögliche thermische Leistung mit 2 MW und die Durchlaufzeit der Materialien mit 30 Minuten definiert. Die Aufheizrate des Drehrohrofens beträgt 10 °C pro Minute und die Zeitschritte werden in zehn-Minuten-Abständen angegeben. Dadurch können die Temperaturstufen für die Optimierung im Abstand von 100 °C festgelegt werden. Das niedrigste betrachtete Temperaturniveau liegt bei 100 °C und das höchste bei 800 °C.

Da in der Pilotanlage keine Abwärme einer nebenstehenden Anlage zur Verfügung steht, muss ein Inertgas (bzw. Frischluft bei Verbrennung) als Prozessgas verwendet und erhitzt werden. Es wird angenommen, dass dieses Gas bei Umgebungstemperatur gelagert wird. Das Gas wird durch elektrische Heizelemente erhitzt, um auf Prozesstemperatur zu kommen und die Temperaturstufen zu halten. Die benötigte Wärme kann auch durch Verbrennung des Pyrolysegases in einer Nachbrennkammer zur Verfügung gestellt werden. Dadurch,

dass das Prozessgas bei Eintritt in die Anlage Umgebungstemperatur besitzt, beeinflusst die „cooler“-Komponente die Modellierung in diesem Szenario nicht. Die Einspeisung in ein Fernwärmenetz ist von Seccon nicht vorgesehen.

Die Rechendauer vom Start der Berechnung bis zur fertigen Optimierung beträgt (auf dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Gerät) 1,11 Sekunden, wenn der Prozessplan vorgegeben wird, bzw. 88,02 Sekunden, wenn der zeitliche Materialeinsatz vom Optimierer errechnet wird.

Energiekosten

Die, für das vorliegende Szenario, relevanten Energiekosten sind in Abbildung 5-3 angegeben. Diese sind sowohl in der Berechnung, in der der Prozessplan vorgegeben wird, als auch in der Optimierung, gleich. Auf der Abszisse ist der betrachtete Zeitraum in Kalendertagen dargestellt, auf der Ordinate die spezifischen Kosten der Energiequellen. Für die elektrischen Stromkosten werden prognostizierte Day-Ahead-Preise verwendet, welche von Traupmann et al. [28] für das Jahr 2025 erstellt und ausgewertet wurden. In diesem Beispiel beeinflusst nur der elektrische Stromeinkauf die Kostenberechnung, die spezifischen Kosten der anderen Energiequellen werden nicht benötigt (kein Erdgas oder Heißgas werden für die Pyrolyse eingesetzt).

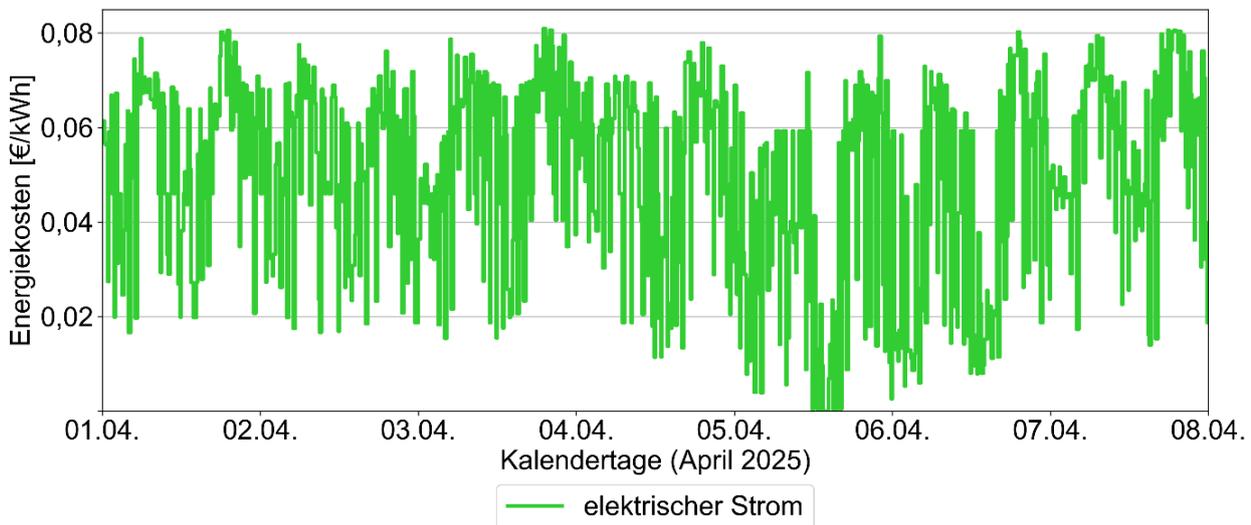


Abbildung 5-3: SSD: Energiekosten

Nach einer ersten Simulation wurde eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Bei der Untersuchung der Inputdaten und Ergebnisse war zu beobachten, dass die Stromkosten zwischen dem fünften und sechsten April negative Werte annehmen (bspw. wenn am Strommarkt das Angebot größer als die Nachfrage ist). Um den Gewinn zu maximieren, wurde vom Optimierer Strom aus dem Netz entnommen, durch die Elektroheizung in Wärme umgewandelt und als Ausschusswärme („excess_heat“-Komponente) an die Umgebung abgegeben. Der Strom wurde folglich bezogen, ohne für den Prozess genutzt zu werden, um die Bezugserlöse zu erwirtschaften. Da dies keine praktische Vorgehensweise darstellt, werden die Kostenprofile so angepasst, dass negative Werte auf 0 €/kWh gesetzt werden. Dadurch kann kein Erlös durch Stromeinkauf erzielt werden und die virtuelle Gewinnmaximierung wird verhindert.

Temperaturbetrachtung

Der Temperaturverlauf bei vorgegebenem Prozessplan ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Da die Eintrittstemperatur des Prozessgases in diesem Szenario gleich der Umgebungstemperatur gesetzt wird (keine Abwärme aus einer nebenstehenden Anlage verfügbar), wird in der Abbildung auch nur letztere

dargestellt. Die Ordinate gibt das Temperaturniveau in °C an. Der zeitliche Temperaturverlauf ist dem Materialeinsatz angepasst (abhängig von den Prozessanforderungen der jeweiligen Materialien auch unterschiedliche Temperaturen). Da die Arbeitszeit von 6:00 Uhr bis 18:00 Uhr (Montag bis Samstag) festgelegt wird, ist die Anlage in den Nachtzeiten und am Sonntag, den sechsten April, nicht in Betrieb.

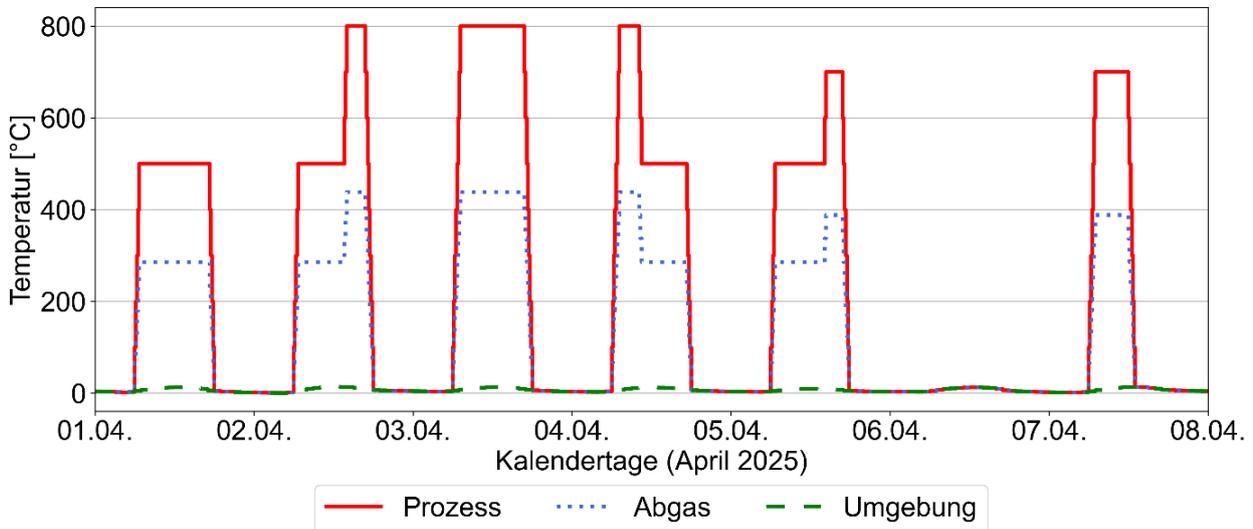


Abbildung 5-4: SSD: Temperaturverläufe Prozessplan

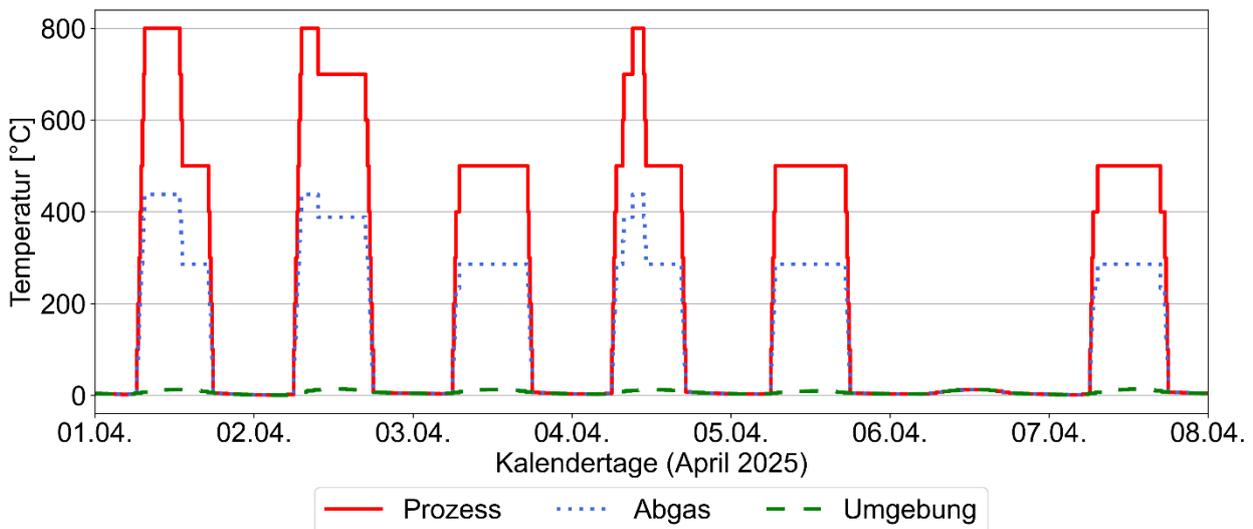


Abbildung 5-5: SSD: Temperaturverläufe Optimierung

Der vom Optimierer errechnete zeitliche Temperaturverlauf des Drehrohrofens ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Wenn günstige Bedingungen für hohe Prozesstemperaturen gegeben sind, kann es auch lokale Temperaturerhöhungen für wenige Stunden geben, wie an den Temperatur-„Peaks“ zu erkennen ist (bspw. am vierten April). Durch die in Tabelle 4-6 beschriebene Einstellung *min_up_time* wird die Mindestzeit festgelegt, auf der ein Temperaturniveau gehalten werden muss, bevor es geändert werden darf. In der vorliegenden Optimierung wurde dieser Wert auf sechs Zeitschritte definiert. Das bedeutet, es kann höchstens ein Materialwechsel pro Stunde ($6[\text{Zeitschritte}] * 10[\text{Minuten pro Zeitschritt}] = 60[\text{Minuten}]$) durchgeführt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Pyrolyseprozess im Drehrohrofen

vernachlässigbar geringe Rückstände hinterlässt und ein Materialwechsel ohne vorherige Reinigung der Anlage stattfinden kann.

Materialdurchsatz

Der zeitlich aufgelöste Materialdurchsatz bei vorgegebenem Prozessplan ist in Abbildung 5-6 dargestellt, der vom Optimierer berechnete in Abbildung 5-7. Auf der Ordinate wird jeweils der Materialdurchsatz angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Prozesseigenschaften der Materialien, ergeben sich auch unterschiedliche Materialdurchsätze. Der Materialdurchsatz wird durch die Angaben in Tabelle 5-2 auf 500 kg/h begrenzt (bspw. Kaffeekapseln). Abhängig von der spezifischen Pyrolyseenergie des jeweiligen Materials und der thermischen Leistungsbegrenzung, ist der höchstmögliche Durchsatz bei bestimmten Materialien geringer (bspw. Biomasse knapp 400 kg/h), wie im nachstehenden Abschnitt „Energielastgang“ beschrieben wird.

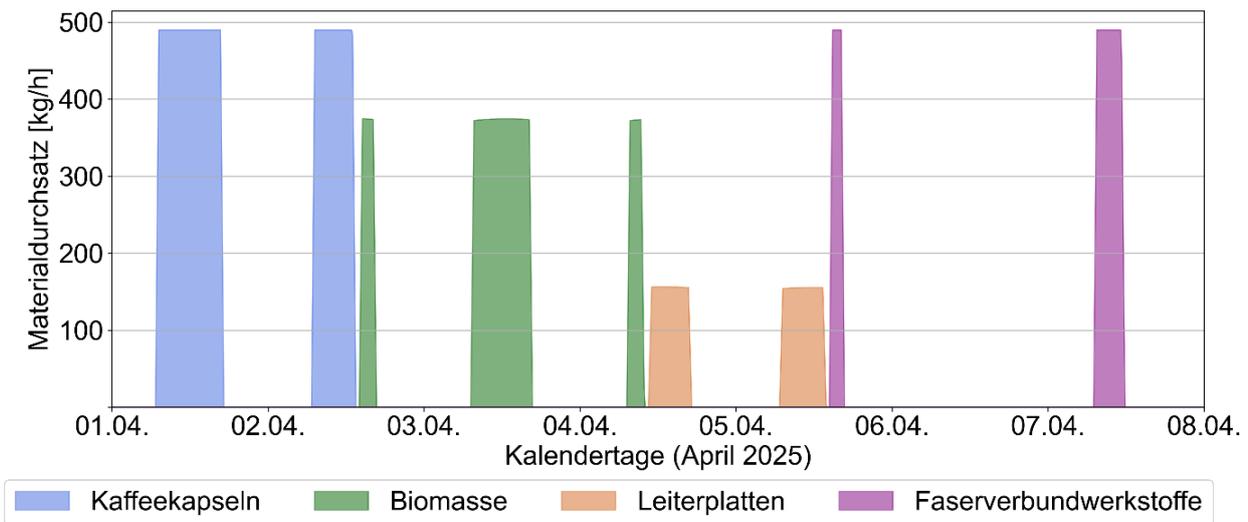


Abbildung 5-6: SSD: Materialdurchsatz Prozessplan

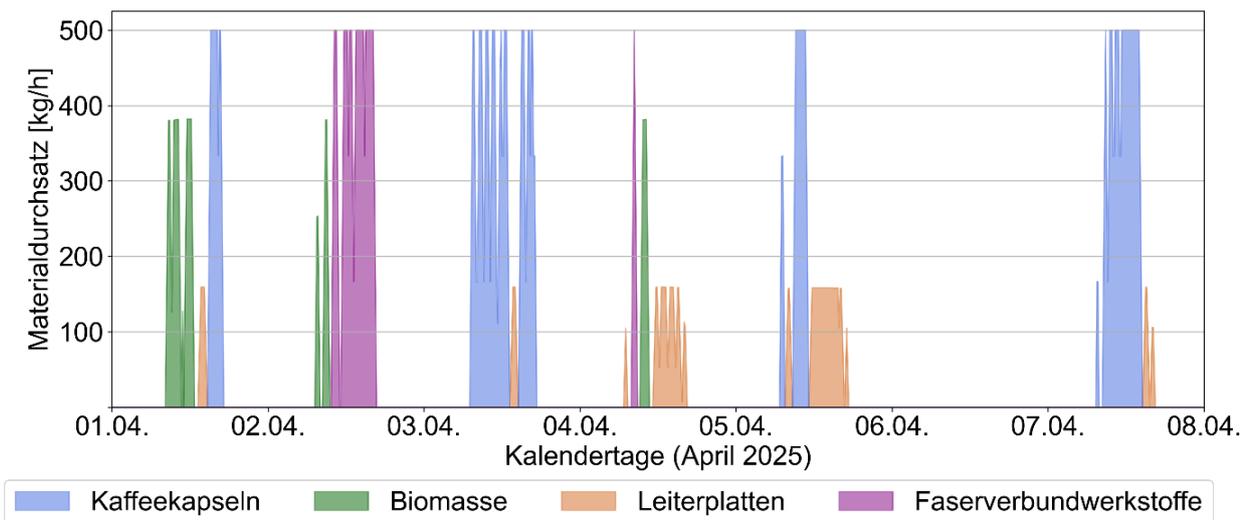


Abbildung 5-7: SSD: Materialdurchsatz Optimierung

Der optimale zeitliche Materialeinsatz wird, wie in Abbildung 5-7 dargestellt, errechnet. Der Optimierer passt den Materialeinsatz auf Energiekostenverläufe und Verfügbarkeiten an. Es findet ein kontinuierlicher Wechsel zwischen den verschiedenen Materialien statt. In diesem optimalen Ergebnis wird die gelagerte Biomasse

nur teilweise pyrolysiert (1.907 kg von 5.000 kg). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verkaufserlöse der Pyrolyseprodukte die Kosten des Prozesses nicht decken (siehe nachstehender Abschnitt „Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung“).

Energielastgang

Im folgenden Abschnitt werden die eingesetzten und genutzten Energiemengen im Prozess betrachtet. Dabei wird nur die thermische Energie, die für den Prozess benötigt wird, analysiert. Der Energieeinsatz der sekundären Anwendungen (Rotation Drehrohrofen, Förderenergie Prozessgas) fließt nicht in diese Auswertung mit ein. Die zeitlich aufgelösten Energiemengen bei vorgegebenem Prozessplan sind in Abbildung 5-8 dargestellt, die vom Optimierer berechneten in Abbildung 5-9.

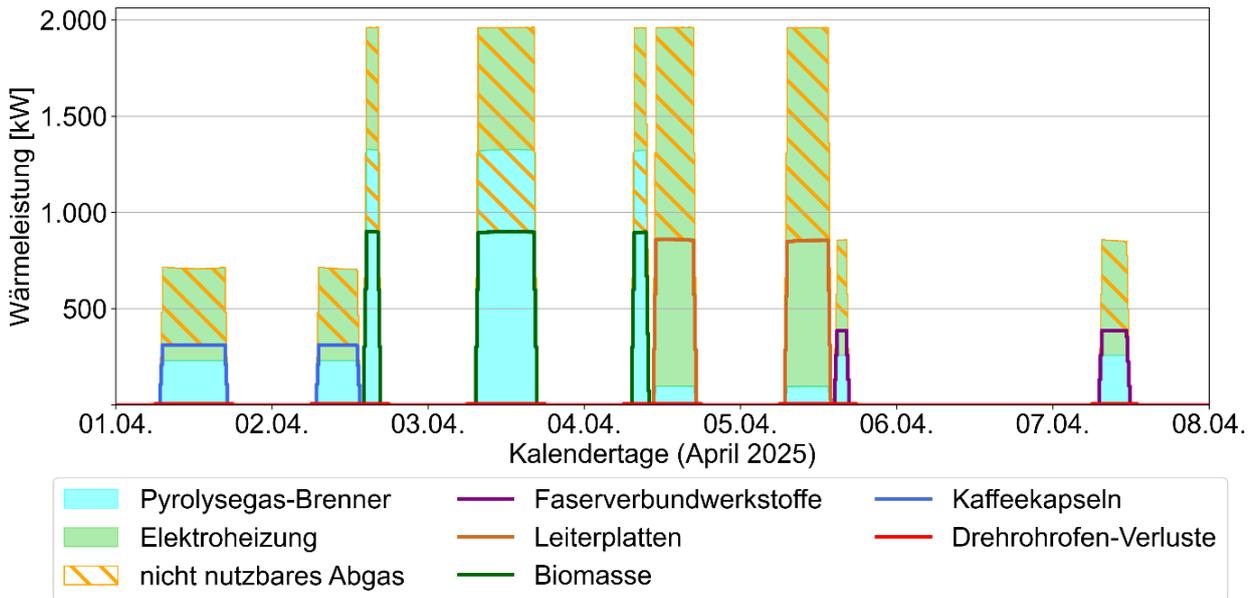


Abbildung 5-8: SSD: Energielastgang Prozessplan

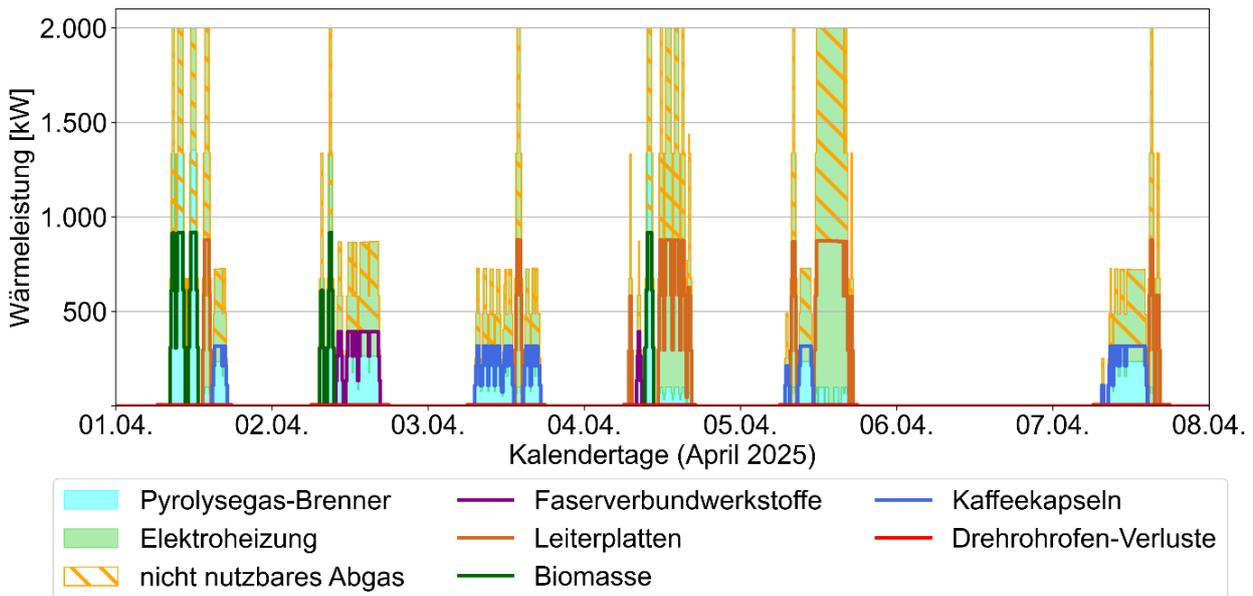


Abbildung 5-9: SSD: Energielastgang Optimierung

Die Ordinaten geben dabei die Wärmeleistung an, die für den Prozess eingesetzt wird. Die Energiequellen werden durch farbige Flächen dargestellt. In diesem Szenario wird die gesamte thermische Energie durch elektrische Heizelemente (grün) und die Nachbrennkammer für das Pyrolysegas (cyan) bereitgestellt. Die im Prozess nicht direkt genutzten Wärmemenge (vgl. Q_{to_env} in Kapitel 4.4.4) wird durch die orange Schraffur gekennzeichnet. Die Energiemengen für die Aufbereitung der Materialien, sowie die Verlust- und Leerlaufenergie des Drehrohrofens werden durch die farbigen Verlaufslinien dargestellt.

Da jedes Material eine unterschiedliche spezifische Pyrolyseenergie besitzt (vgl. Q_s in Tabelle 4-3), werden für die Pyrolyse der Materialien auch unterschiedliche Energiemengen benötigt. Die eingesetzte thermische Leistung ist durch die Vorgaben in Tabelle 5-2 auf 2.000 kW begrenzt. Nach dem Abzug der nicht nutzbaren Energie (orange Schraffur) wird die Energiemenge erhalten, die für die Pyrolyse der Materialien zur Verfügung steht. In Abbildung 5-8 ist beispielhaft zu beobachten, dass die genutzte Wärmeleistung der Kaffeekapseln ca. 300 kW beträgt, wohingegen die Leistung für die Pyrolyse von Biomasse knapp 1.000 kW beträgt. Die Verlust- und Leerlaufleistung des Drehrohrofens ist vernachlässigbar gering (5 kW) und in den Abbildungen deshalb nicht deutlich zu erkennen.

Da die elektrischen Heizelemente der realen Anlage nur 64 kW (von ca. 2.000 kW) liefern, wird die fehlende benötigte Wärme am Technikum mit fossilen Energiequellen erzeugt. In der vorliegenden Arbeit soll der theoretische „CO₂-neutrale“ Prozess betrachtet werden, der Erdgasbrenner kommt dabei nicht zum Einsatz. Die benötigte Wärme wird deshalb nur durch die Elektroheizung bereitgestellt. In Abbildung 5-9 ist der Energielastgang dargestellt, der aus der Optimierung hervorgeht. Durch die laufende Änderung des Materialeinsatzes ergeben sich die zeitlichen Leistungsspitzen.

Gesamtenergiebetrachtung

Die zeitlichen Energiemengen von Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 können aufsummiert und für eine Gesamtenergiebetrachtung verwendet werden. Außerdem fließen die Energiemengen für die sekundären Anwendungen auch in diese Auswertung ein. In Abbildung 5-10 stellt das linke Diagramm die Energiemengen bei vorgegebenem Prozessplan und das rechte die vom Optimierer errechneten Energiemengen dar. Der äußere Ring der Diagramme stellt jeweils die Energieverbraucher dar, der innere Bereich die Energiequellen. Über den Darstellungen wird die jeweilige Gesamtenergiemenge angegeben.

Der Energieeinsatz bei vorgegebenem Prozessplan beträgt 68,4 MWh, bei der Optimierung 52,3 MWh (Rückgang von ca. 24 %). Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass die Biomasse in der zweiten Berechnung nicht vollständig pyrolysiert wird.

Der elektrische Stromeinsatz beträgt beim Prozessplan ca. 44 MWh ($68,4 \text{ MWh} * 64,4\% \approx 44 \text{ MWh}$) und die Energie aus der Pyrolysegas-Verbrennung ca. 24,4 MWh. Bei der Optimierung beträgt der entsprechende Energieeinsatz ca. 39,1 MWh und ca. 13,2 MWh. Die Energiemenge für die Pyrolyse der Materialien ist in beiden Diagrammen dieselbe (Beispiel für Kaffeekapseln: $68,4 \text{ MWh} * 16,0\% \approx 52,3 \text{ MWh} * 20,9\%$), einzig bei der Biomasse wird weniger Energie bei der Optimierung aufgewandt, da auch weniger Masse pyrolysiert wird. Das Segment „Andere“ stellt in diesen Berechnungen die Pyrolyseenergie für die Faserverbundwerkstoffe und die Drehrohrofen-Verluste dar.

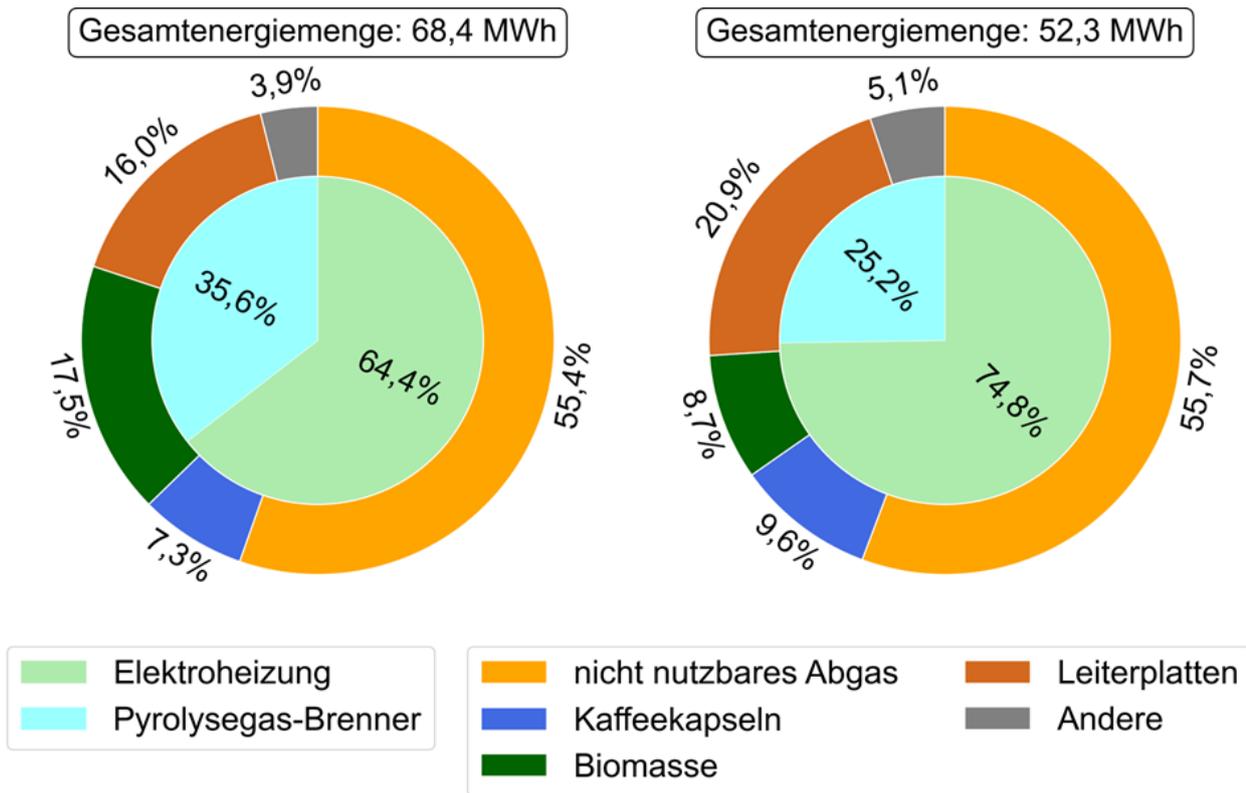


Abbildung 5-10: SSD: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts)

Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung

Die Zielfunktion des OEMOF-Modelles ist darauf ausgelegt, die Gesamtkosten zu minimieren, um ein möglichst wirtschaftliches Ergebnis zu erzielen. Um ein Auswertungskriterium für die Optimierung zu erhalten werden die Geldflüsse der beiden Berechnungen grafisch dargestellt. Durch die Diagramme in Abbildung 5-11 kann eine Kosten- und Erlösbetrachtung durchgeführt werden.

Die vier Materialien erwirken beim Verkauf einen Erlös. Dieser ist abhängig von der Menge an verarbeitetem Wertstoff und dem Verkaufspreis (vgl. PpM in Tabelle 5-1). Im linken Balkendiagramm wird der Umsatz der verkauften Wertstoffe dargestellt. Dabei wird mit „PP“ die Simulation mit vorgegebenem Prozessplan bezeichnet und mit „OPT“ die Simulation mit optimiertem Materialeinsatz. Das mittlere Balkendiagramm gibt die Energiekosten für beide Simulationen an. Im rechten Balkendiagramm kann die Auswirkung der Optimierung auf den Umsatz und die Kosten untersucht werden.

Wie im Abschnitt „Materialdurchsatz“ beschrieben wurde, wird die Menge der pyrolysierten Biomasse in der Optimierung reduziert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verkaufserlöse der Pyrolyseprodukte die Kosten des Prozesses nur zu bestimmten Zeitpunkten decken können. Diese Zeitpunkte werden vom Optimierer bestimmt. Da im vorliegenden Fall nur kurze Zeiträume für eine wirtschaftliche Aufbereitung von Biomasse zur Verfügung stehen, wird nur ein Teil der Menge pyrolysiert. Der restliche Teil bleibt im Lager und beeinflusst die Erlöse nicht.

Die Reduktion der pyrolysierten Biomasse, und somit die Reduktion des Umsatzes, wirkt sich im vorliegenden Fall negativ auf das Ergebnis aus. Der erzielte Umsatz in der untersuchten Woche sinkt um 325 € (ca. 4 %). Eine positive Auswirkung auf das Ergebnis hat jedoch die Kostenreduktion des elektrischen Stromes. Durch die Optimierung können diese Kosten um ca. 36 % (725 €) reduziert werden. Die Differenz aus positivem und negativem Einfluss ergibt das Gewinnsteigerungspotential durch die Optimierung. In der betrachteten Woche kann der Gewinn um 400 € gesteigert werden.

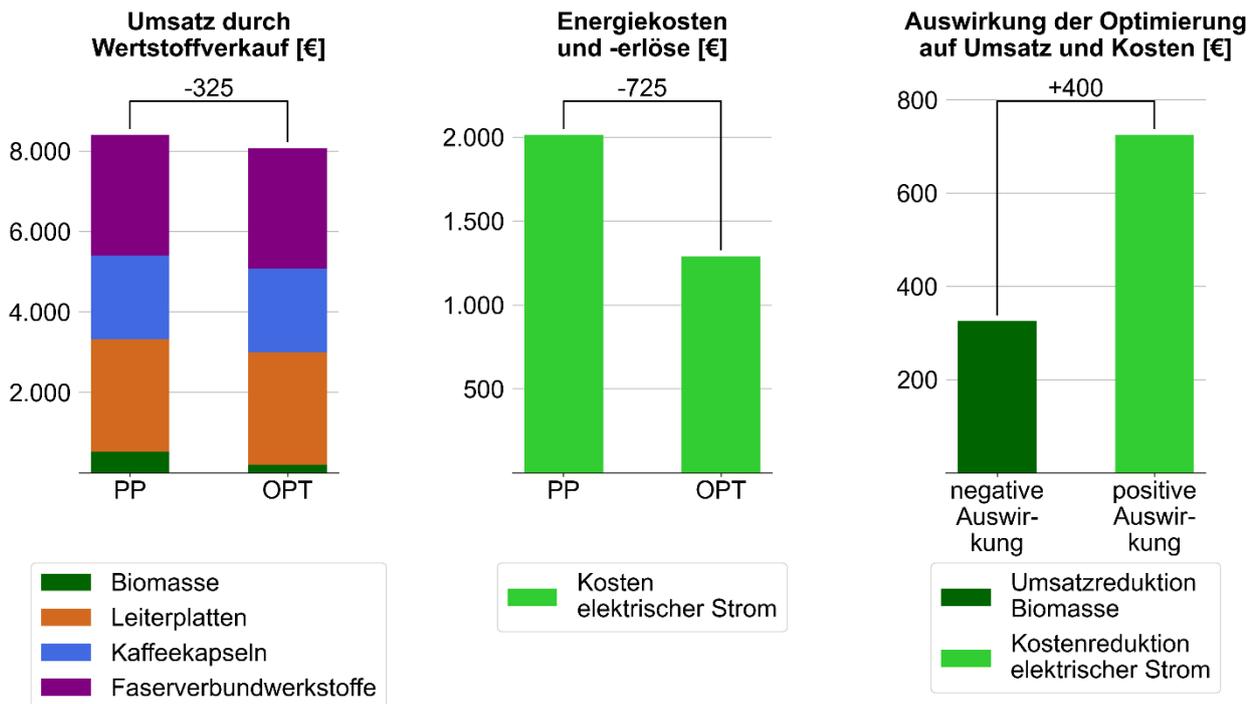


Abbildung 5-11: SSD: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)

Da der Verkauf des Pyrolysegas durch die Szenario-Parameter (Tabelle 5-2) nicht vorgesehen ist und auch in Abbildung 5-11 nicht aufscheint, kann geschlussfolgert werden, dass das gesamte entstehende Pyrolysegas in der Nachbrennkammer direkt genutzt wird, um die thermische Energie für den Prozess bereitzustellen.

5.4 Szenario 2: LSD – Sommer

Im zweiten Szenario wird eine zukünftig geplante Großanlage untersucht, die von Seccon, in Zusammenarbeit mit Partnerbetrieben, gebaut und betrieben werden soll. Für den Betrachtungszeitraum wird der Kalendermonat Juli des Jahres 2025 gewählt. In diesem Sommermonat sind relativ hohe Außentemperaturen vorherrschend (ca. von 7 °C bis 30 °C). Die Anlage ist durchgehend in Betrieb (ganztäglich und an jedem Wochentag). Der maximal mögliche Materialdurchsatz wird auf 4.000 kg/h begrenzt, die maximal mögliche thermische Leistung auf 17 MW und die Durchlaufzeit beträgt 60 Minuten. Die Aufheizrate des Drehrohrofens wird von Seccon mit 200 °C pro Stunde vorgegeben und die Zeitschritte der Optimierung werden in 30-Minuten-Abständen angegeben. Dadurch ergeben sich dieselben Prozesstemperatur-Stufen wie in Kapitel 5.3 (Temperaturstufen im Abstand von 100 °C). Die Anlage besitzt einen Zugang zum Fernwärmenetz, wodurch überschüssige Wärme als Fernwärme verkauft werden kann. Außerdem kann auch das Pyrolysegas gewinnbringend verkauft werden (bspw. an die nebenstehende Anlage).

Im Unterschied zur Pilotanlage steht in diesem Szenario ein Heißgas einer nebenstehenden Anlage zur Verfügung, dessen thermische Energie für den Prozess genutzt werden kann. Dieses Abgas kann bis zu 8.000 kW thermische Leistung liefern (von Seccon vorgegeben). Da keine realen Temperaturverläufe dieses Prozessgases vorliegen, wird, in Absprache mit dem Projektteam, die Prozesstemperatur zufällig generiert. Der zeitliche Mittelwert der Temperatur beträgt ca. 600 °C. Wenn die benötigte Prozesstemperatur über der Heißgastemperatur liegt, muss dieses durch zusätzlichen Wärmeeintrag erhitzt werden (elektrische

Heizelemente bzw. Pyrolysegas-Verbrennung). Falls die Gastemperatur einen zu hohen Wert annimmt, muss das Gas mit der „cooler“-Komponente gekühlt werden (bspw. Wärmeübertrager).

Die Rechendauer vom Start der Berechnung bis zur fertigen Optimierung beträgt (auf dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Gerät) 0,68 Sekunden, wenn der Prozessplan vorgegeben wird, bzw. 24 Minuten, wenn der zeitliche Materialeinsatz vom Optimierer errechnet wird.

Energiekosten

Die Energiekosten für den untersuchten Zeitraum werden in Abbildung 5-12 dargestellt. Für die Preise vom elektrischen Strom und Erdgas werden die Day-Ahead-Preise von Traupmann et al. [28] und für die Einspeiseerlöse von Fernwärme wird der durchschnittliche Wert von Moser et al. [29] verwendet. Die Einspeiseerlöse der Fernwärme („negative Kosten“) werden mit positivem Vorzeichen dargestellt, um einen besseren Vergleich mit den Kosten zu gewährleisten. Auf Basis der Arbeit von Czajczyńska et al. [30] werden die Verkaufserlöse des Pyrolysegases dem (negativen) Wert des Erdgaspreises gleichgesetzt. Da für die Anlage eine Kooperation mit dem nebenstehenden Unternehmen, welches das Heißgas zur Verfügung stellt, vorgesehen ist, werden die spezifischen Kosten des nutzbaren Abgases mit 0 €/kWh angenommen.

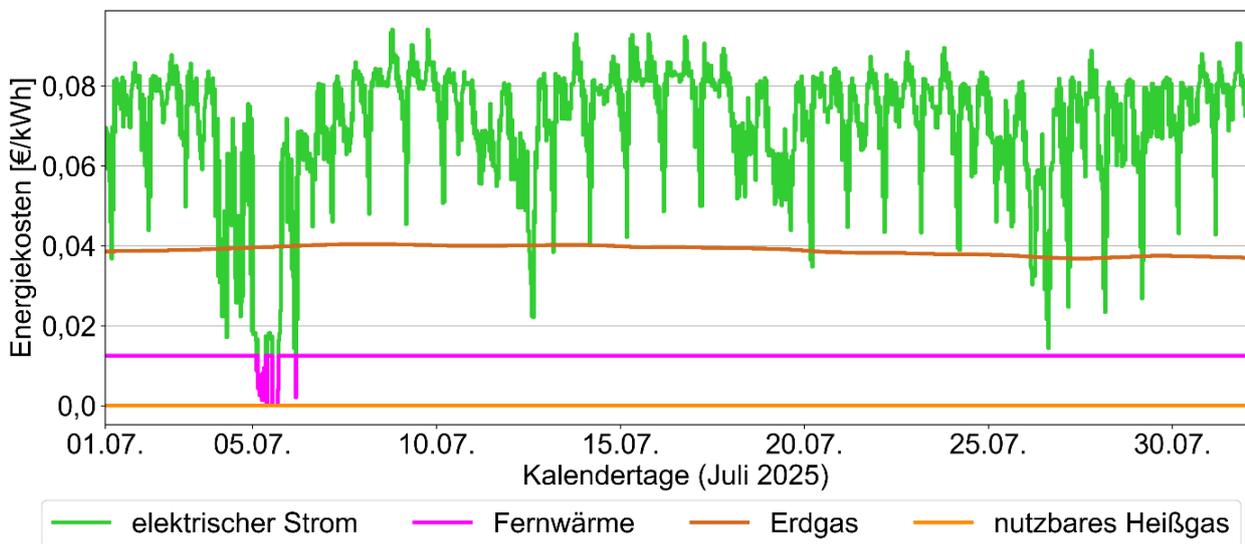


Abbildung 5-12: LSD – Sommer: Energiekosten

Bei einer ersten Optimierung des vorliegenden Szenarios ergaben sich zeitliche Leistungsspitzen bei der Fernwärme-Einspeisung. Bei Untersuchung der Inputdaten und Ergebnisse war zu beobachten, dass zusätzliche Wärme durch die Elektroheizung generiert wurde, um diese als Fernwärme zu verkaufen. Dies war zu den Zeitpunkten zu beobachten, bei denen der Einkaufspreis des elektrischen Stromes niedriger als der Verkaufspreis der Fernwärme war. Da die Fernwärme-Einspeisung nicht zum Kerngeschäft von Seccon gehört, werden die Verkaufserlöse der Fernwärme so angepasst, dass die Einspeisung durch Wärme aus elektrischem Strom verhindert wird. Dadurch ergibt sich bspw. das Verlaufstief am fünften Juli. Negative Strompreise werden analog zu Szenario 1 auf 0 €/kWh gesetzt.

Temperaturbetrachtung

Die Temperaturverläufe bei vorgegebenem Prozessplan sind in Abbildung 5-13 dargestellt, die Ergebnisse der Optimierung in Abbildung 5-14. Die Prozessgastemperatur ist durch den zeitlich schwankenden Verlauf abgebildet (orange gestrichelte Linie).

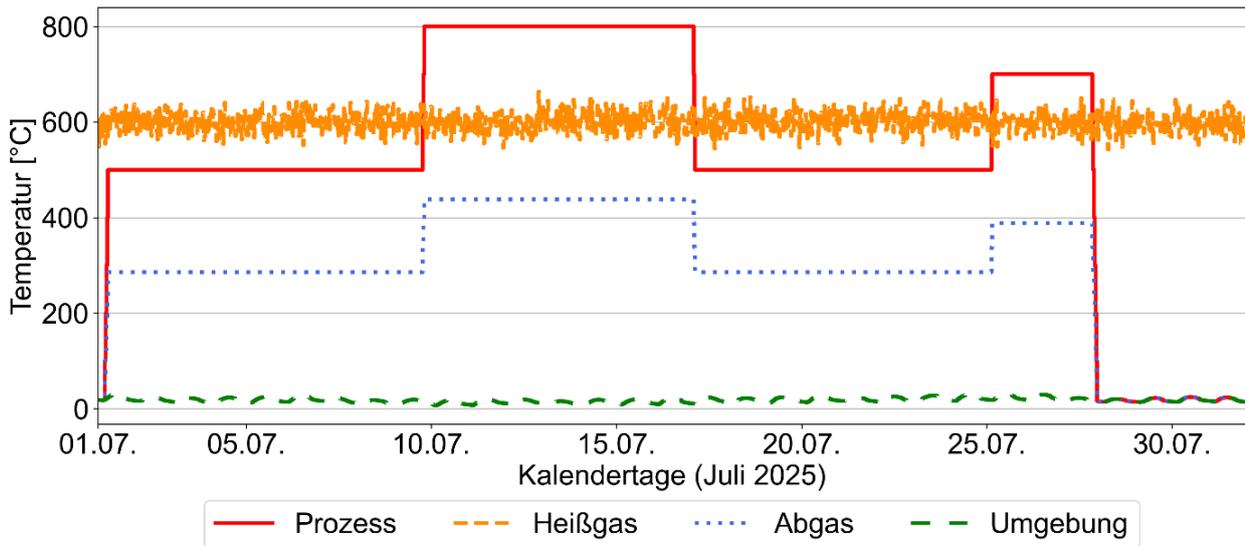


Abbildung 5-13: LSD – Sommer: Temperaturverläufe Prozessplan



Abbildung 5-14: LSD – Sommer: Temperaturverläufe Optimierung

In Abbildung 5-13 sind die Materialmengen am 28. Juli vollständig pyrolysiert, deshalb wird die Anlage in den letzten Tagen ausgeschaltet. Der vom Optimierer errechnete zeitliche Temperaturverlauf des Drehrohrofens ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Abhängig von den Kostenverläufen und Verfügbarkeiten, kann es dort auch zu lokalen Temperaturerhöhungen für wenige Stunden kommen, wie bspw. an den „Peaks“ zwischen 22. und 28. Juli zu erkennen ist. Die Mindestdauer für diese Temperaturspitzen beträgt vier Stunden, wie in Tabelle 5-2 vorgegeben ist. Im Vergleich zum vorgegebenen Prozessplan läuft die Anlage über den gesamten Betrachtungszeitraum durch (bis zum 31. Juli).

Materialdurchsatz

Der zeitlich aufgelöste Materialdurchsatz bei vorgegebenem Prozessplan ist in Abbildung 5-15 dargestellt, der vom Optimierer berechnete in Abbildung 5-16. Der Durchsatz wird aufgrund der Angaben in Tabelle 5-2 auf 4.000 kg/h begrenzt. Der Durchsatz der Biomasse und Leiterplatten wird durch die spezifische

Pyrolyseenergie begrenzt, wie im nachstehenden Abschnitt „Energiebelastgang“ beschrieben wird. Deshalb ergibt sich die zeitlich schwankende Materialmasse dieser Abfälle im Drehrohr.

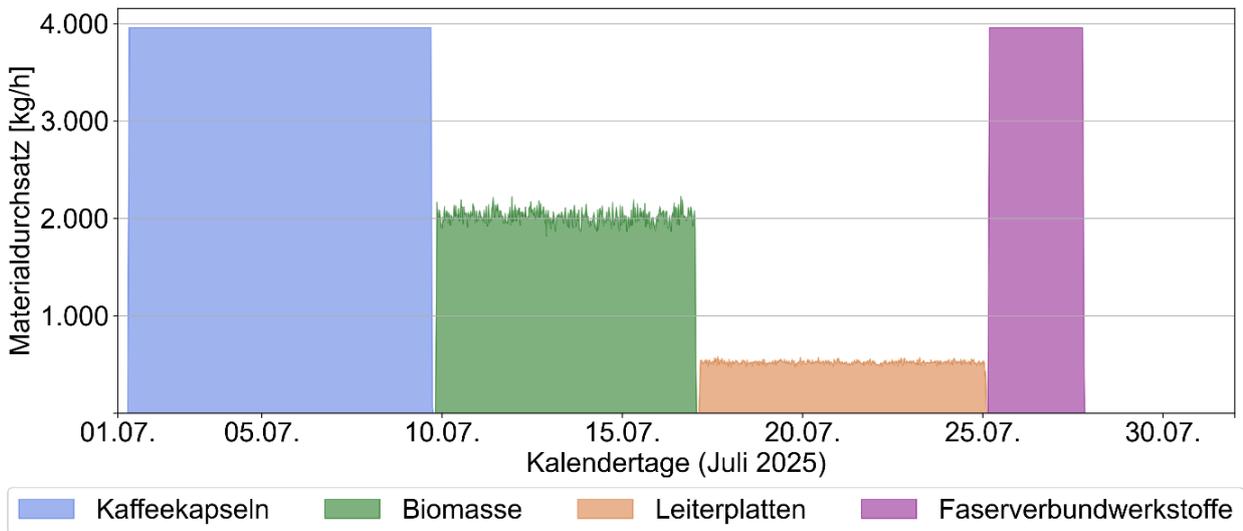


Abbildung 5-15: LSD – Sommer: Materialdurchsatz Prozessplan

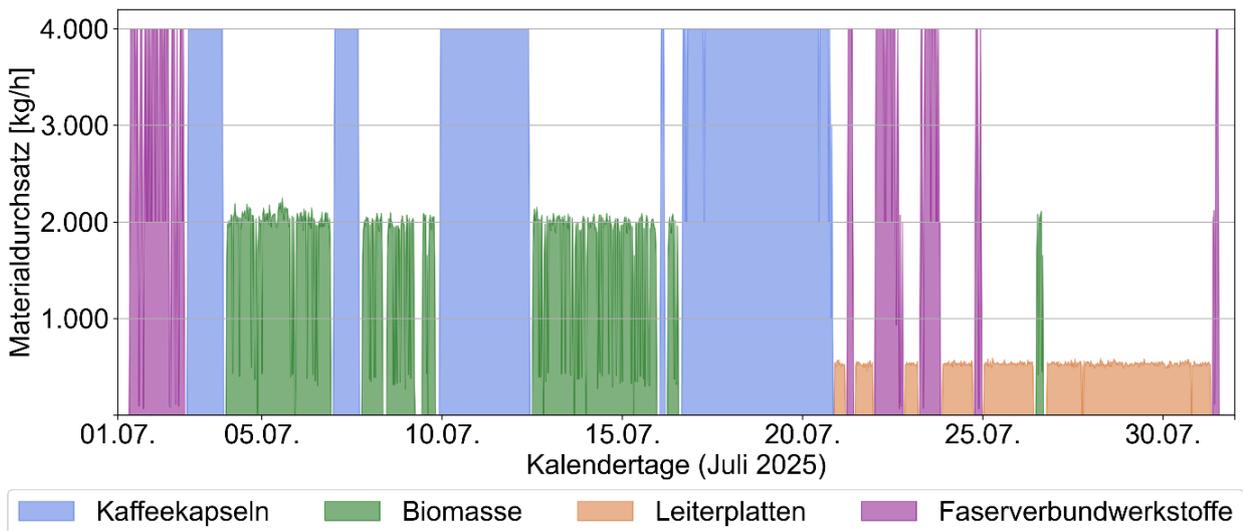


Abbildung 5-16: LSD – Sommer: Materialdurchsatz Optimierung

Beim optimalen zeitlichen Materialeinsatz in Abbildung 5-16 findet ein kontinuierlicher Materialwechsel statt. In der vorliegenden Optimierung wird die gesamte lagernde Materialmenge pyrolysiert (auch die Biomasse). Die aufsummierten Materialmengen sind bei vorgegebenem Prozessplan und bei der Optimierung dieselben (1.500 Tonnen).

Energiebelastgang

Im folgenden Abschnitt wird der Energiebelastgang von Szenario 2 betrachtet. Der, zu den Materialverläufen, dazugehörige Energiebelastgang wird in Abbildung 5-17 (Prozessplan) und Abbildung 5-18 (Optimierung) dargestellt. Dabei stellt die orange Fläche die Energie dar, welche durch das Heißgas der nebenstehenden Anlage in den Drehrohröfen eintritt. Die blaue Schraffur gibt die Energiemenge an, welche durch die „cooler“-Komponente abgegeben wird, um die Temperatur des Prozessgases zu senken. Zusätzlich benötigte Wärme wird durch den Pyrolysegasbrenner und die Elektroheizung generiert.

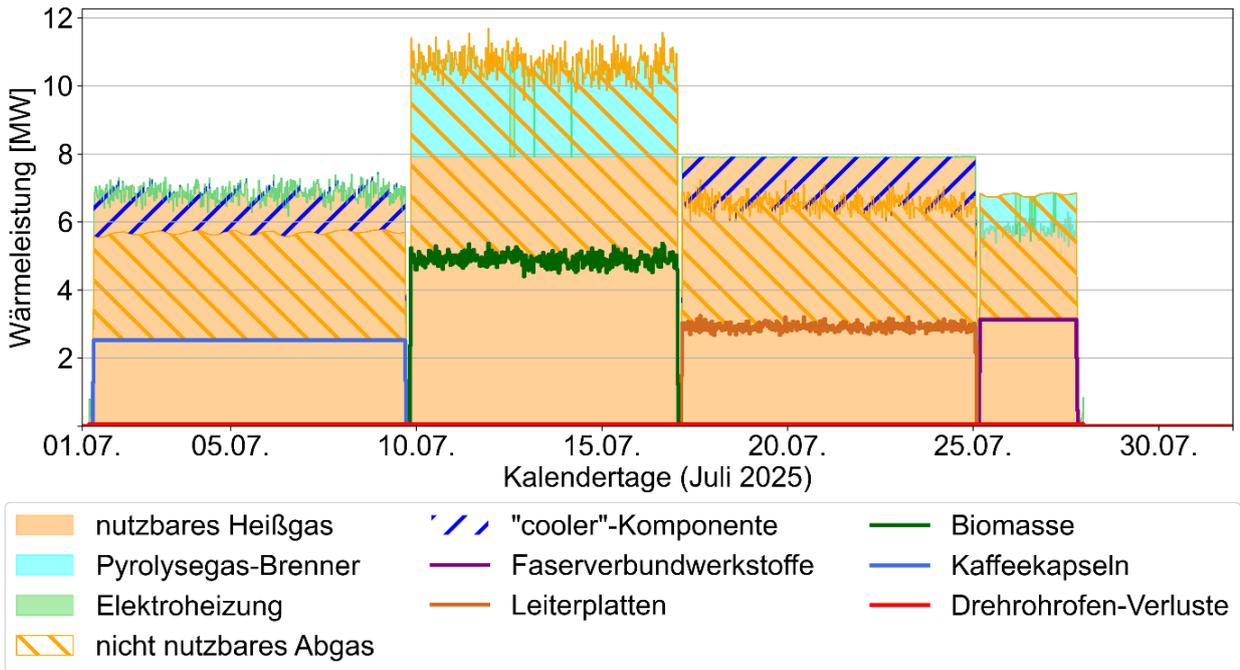


Abbildung 5-17: LSD – Sommer: Energielastgang Prozessplan

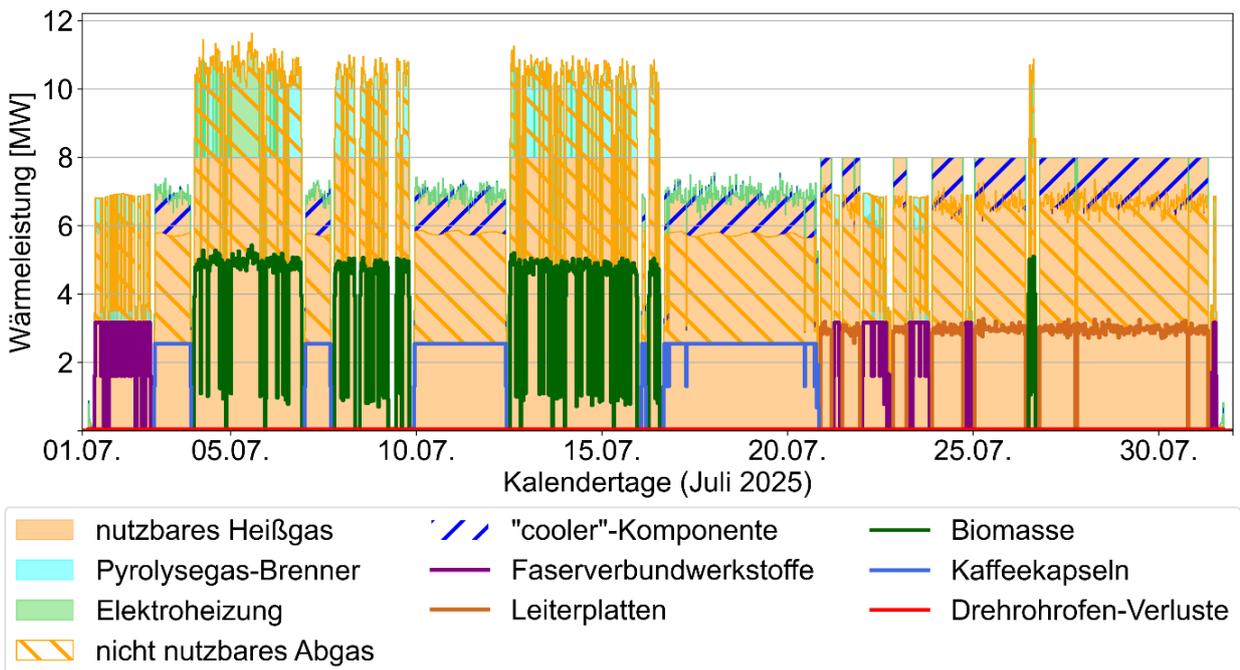


Abbildung 5-18: LSD – Sommer: Energielastgang Optimierung

Durch die Vorgaben von Tabelle 5-2 kann das Heißgas eine Höchstleistung von 8 MW thermische Energie für den Prozess bereitstellen, wie bei der Biomasse und den Leiterplatten zu beobachten ist. Die Begrenzung für den thermischen Energieeinsatz (vgl. 17 MW in Tabelle 5-2) wird zu keinem Zeitpunkt erreicht und ist deshalb in den Grafiken nicht zu erkennen.

Abhängig von der Heißgastemperatur wird in jedem Zeitschritt zusätzliche Wärme (oder „Kühlung“) benötigt, um die erforderliche Prozesstemperatur zu erreichen. Dadurch steht eine zeitlich abhängige Maximalleistung

zur Verfügung, um die Abfälle zu pyrolysieren. Deshalb ergeben sich auch die zeitlichen Materialschwankungen der Biomasse und Leiterplatten in Abbildung 5-15. Die Tatsache, dass der Drehrohrofen bis zum letzten Tag durchläuft, lässt darauf schließen, dass die Drehrohrofen-Verluste so gering sind dass die Abschaltung der Anlage vernachlässigbare Einsparungen erwirken würde.

Gesamtenergiebetrachtung

Die Gesamtenergiemengen werden in Abbildung 5-19 dargestellt. Da in beiden Berechnungen dieses Szenarios dieselben Materialmengen pyrolysiert werden, unterscheiden sich die jeweiligen Gesamtenergiemengen nur geringfügig. In der Optimierung werden ca. vier Megawattstunden weniger Energie benötigt.

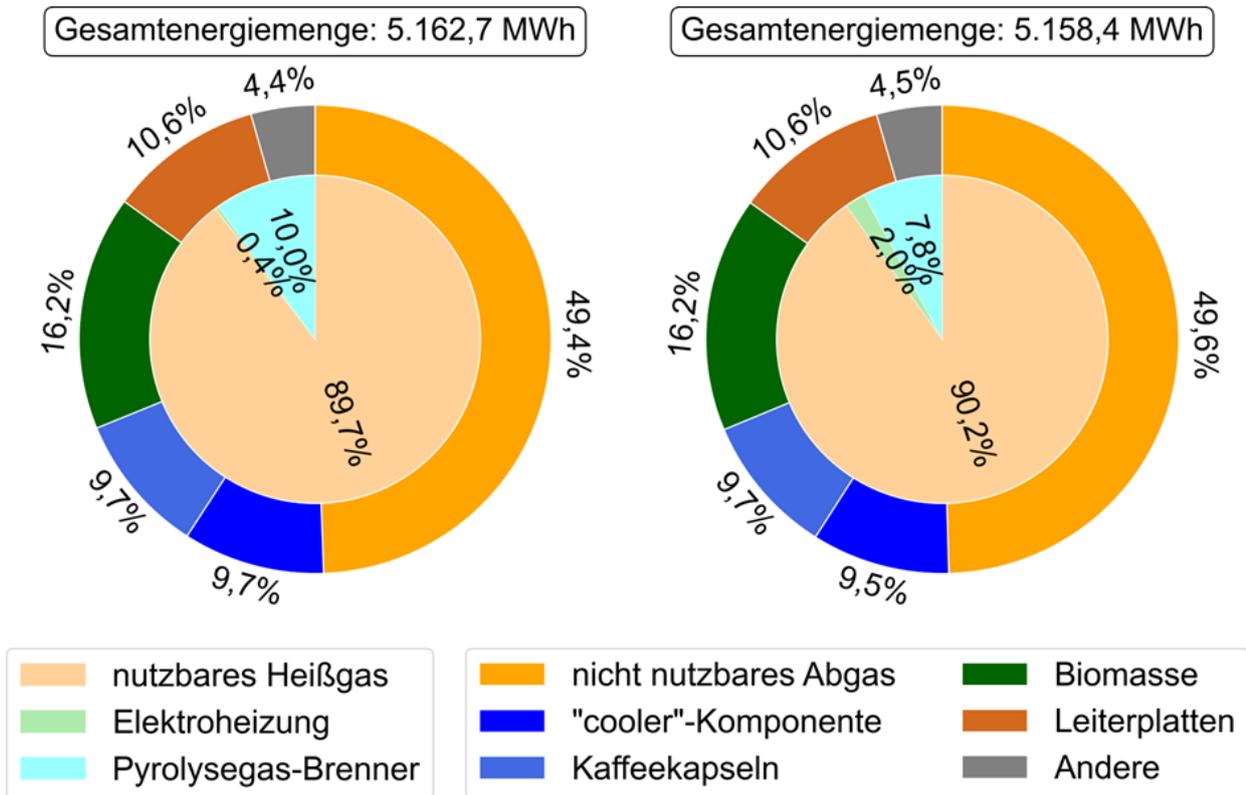


Abbildung 5-19: LSD – Sommer: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts)

Durch den optimierten zeitlichen Materialeinsatz steigt die vom Heißgas bezogene Wärme um 0,5 %. Auch der elektrische Stromeinsatz steigt um 1,6 %, was eine Verringerung des Pyrolysegaseinsatzes von 2,2 % zur Folge hat. Die Energieaufnahme der Materialien ist in beiden Berechnungen gleich. Die Summe aus den Wärmemengen, die in die „cooler“-Komponente fließt und als nicht nutzbares Abgas das System verlässt, kann bspw. für eine Fernwärmeeinspeisung oder die Beheizung von Büroräumen teilweise genutzt werden (wird in dieser Arbeit nicht detailliert behandelt). Das Segment „Andere“ stellt die Pyrolyseenergie für die Faserverbundwerkstoffe und die Drehrohrofen-Verluste dar.

Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung

Die Kosten- und Erlösbetrachtung von Szenario 2 wird mit Abbildung 5-20 durchgeführt. Der Verkauf der Wertstoffe ergibt in beiden Simulationen dieselben Erlöse. Im Vergleich zu Szenario 1 beeinflusst der Verkauf des Pyrolysegases die Diagramme. Der erwirtschaftete Erlös des Pyrolysegasverkaufes steigt durch die Optimierung um ca. 8 % und die Kosten für elektrischen Strom um ca. 12 %. Der Gewinn wird durch die Optimierung im betrachteten Monat um 3.125 € erhöht.

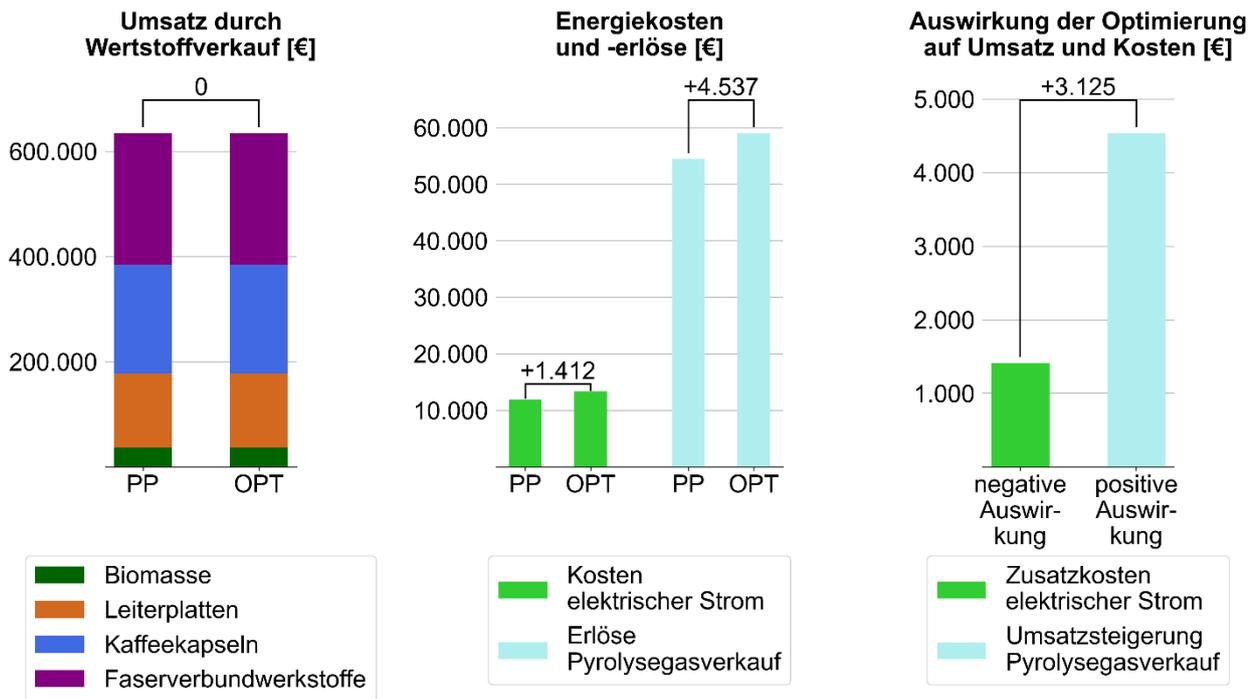


Abbildung 5-20: LSD – Sommer: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)

5.5 Szenario 3: LSD – Winter

Im Szenario 3 wird dieselbe Großanlage wie in Szenario 2 analysiert. Für den Betrachtungszeitraum wird jedoch ein Wintermonat, der Januar 2025, ausgewählt, wo relativ niedrige Umgebungstemperaturen vorherrschen (ca. von -12 °C bis 2 °C). Die Anlagen- und Materialparameter bleiben dieselben. Auch die Menge des Abfallgutes beträgt 1.500 Tonnen.

Die Rechendauer vom Start der Berechnung bis zur fertigen Optimierung beträgt (auf dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Gerät) 0,70 Sekunden, wenn der Prozessplan vorgegeben wird, bzw. 17 Minuten, wenn der zeitliche Materialeinsatz vom Optimierer errechnet wird.

Energiekosten

Die Energiekosten für den betrachteten Zeitraum werden in Abbildung 5-21 dargestellt. Die elektrischen Stromkosten und die Erdgaskosten werden wieder von Traupmann et al. [28], die Fernwärmeerlöse von Moser et al. [29], entnommen. Im Vergleich zu Szenario 2 schwanken die elektrischen Stromkosten stärker und nehmen häufiger negative Werte an (negative Spitzen werden wieder auf 0 €/kWh gesetzt). Erdgas muss in der Winterzeit um einen höheren Preis eingekauft werden. Das nutzbare Heißgas aus der nebenstehenden Anlage verursacht keine Kosten. Die Fernwärmeerlöse werden wieder dem elektrischen Strompreis angepasst, sodass die Einspeisung durch eine Elektroheizung verhindert wird (negative Spitzen im Fernwärmeverlauf).

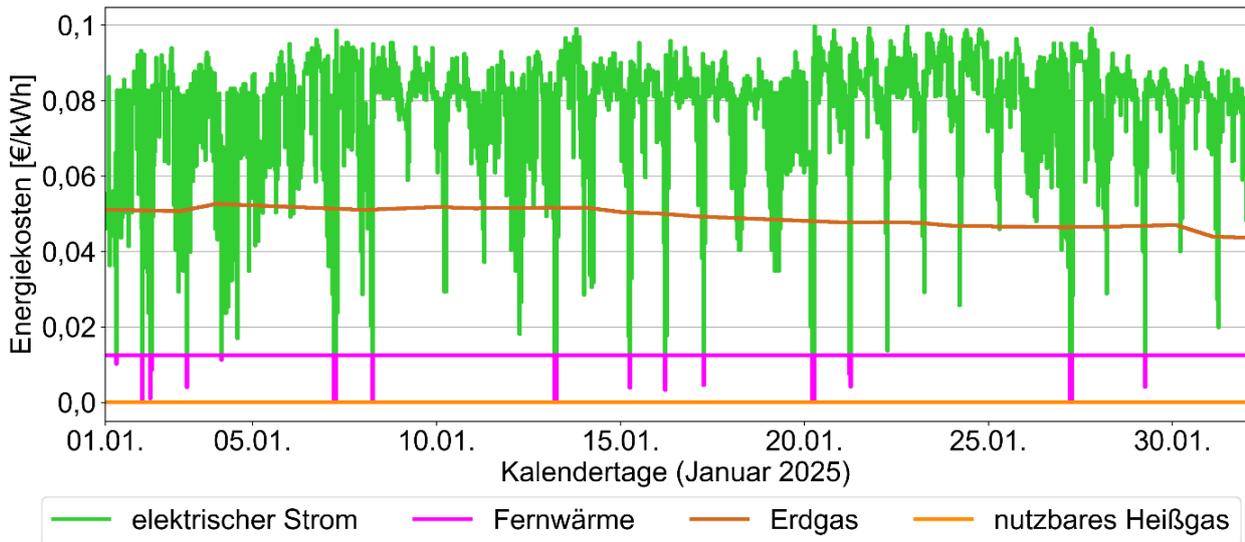


Abbildung 5-21: LSD – Winter: Energiekosten

Temperaturbetrachtung

Die Temperaturverläufe bei vorgegebenem Prozessplan werden in Abbildung 5-22 dargestellt. Da die Abfälle die gleichen Mengen vorweisen und in der gleichen Reihenfolge verarbeitet werden, sind die Unterschiede der Prozesstemperaturen im Vergleich zu Abbildung 5-13 vernachlässigbar gering. Zu erkennen ist, dass die Umgebungstemperatur geringer als in Szenario 2 ist (auch kleiner als 0 °C).

Der vom Optimierer errechnete zeitliche Temperaturverlauf des Drehrohrofens ist in Abbildung 5-23 dargestellt. Abhängig von den unterschiedlichen Kostenverläufen und Verfügbarkeiten ergibt sich ein geringer Unterschied der Prozesstemperatur im Vergleich zu Szenario 2. Auch in der vorliegenden Optimierung läuft die Anlage bis zum letzten Betrachtungstag kontinuierlich durch.

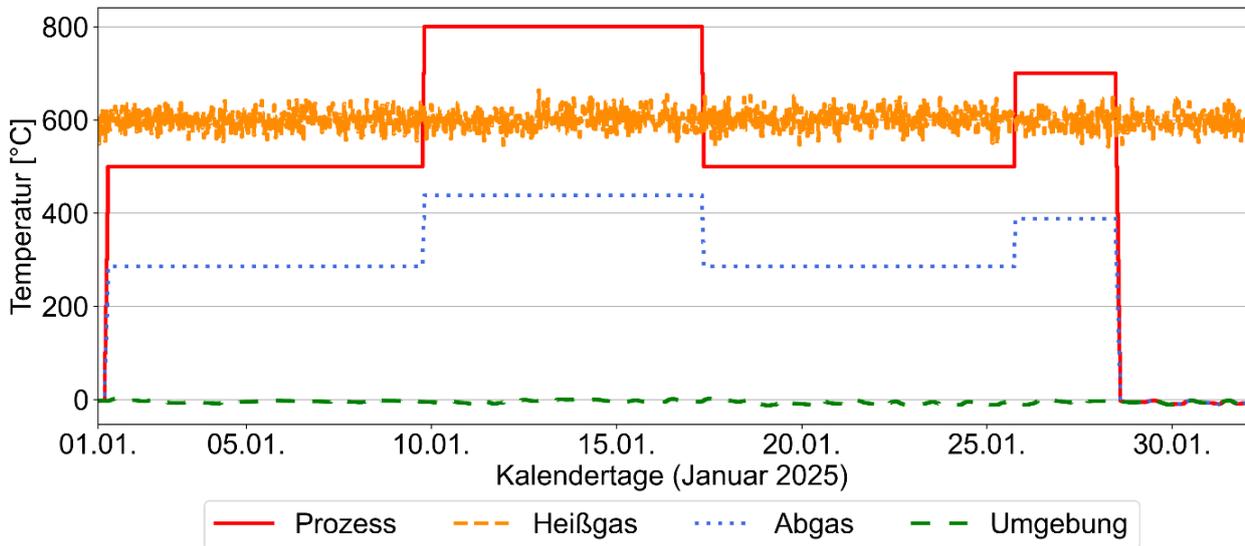


Abbildung 5-22: LSD – Winter: Temperaturverläufe Prozessplan

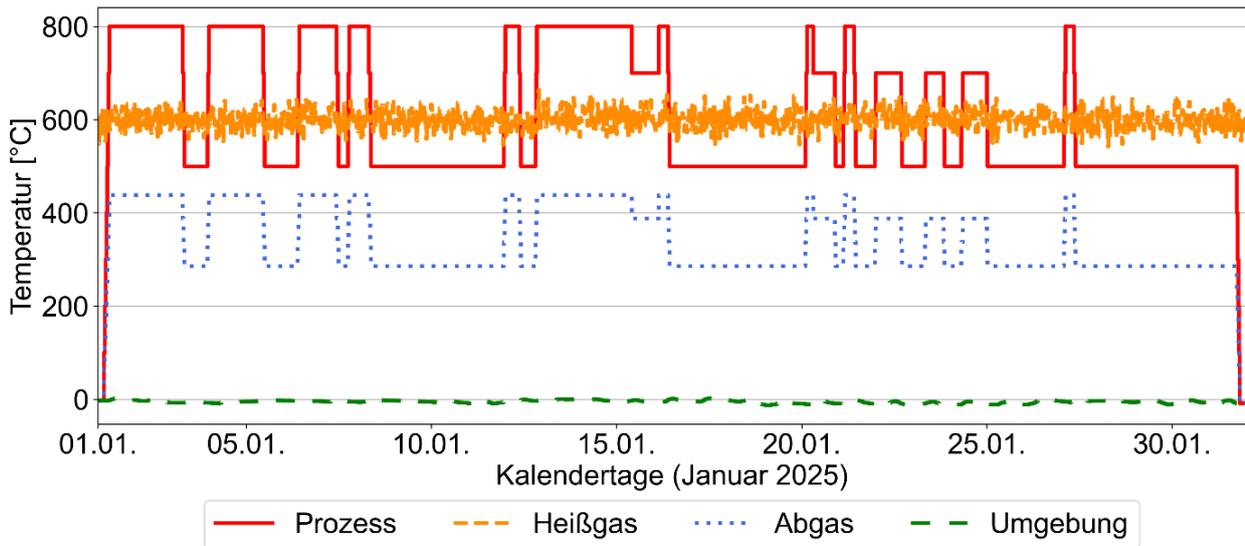


Abbildung 5-23: LSD – Winter: Temperaturverläufe Optimierung

Materialdurchsatz

Der zeitlich aufgelöste Materialeinsatz bei vorgegebenem Prozessplan ist, für die Großanlage im Januar, in Abbildung 5-24 dargestellt. Der Massendurchsatz wird auf 4.000 kg/h begrenzt. Der zeitliche Verlauf ist gleich dem in Szenario 2 (Abbildung 5-15). Der optimale zeitliche Materialeinsatz wird in Abbildung 5-25 dargestellt. Die lagernde Materialmenge wird vollständig pyrolysiert, wodurch gleich viel Abfall, wie beim vorgegebenen Prozessplan, verarbeitet wird. Abhängig von den vorgegebenen Verläufen findet ein kontinuierlicher Materialwechsel statt.

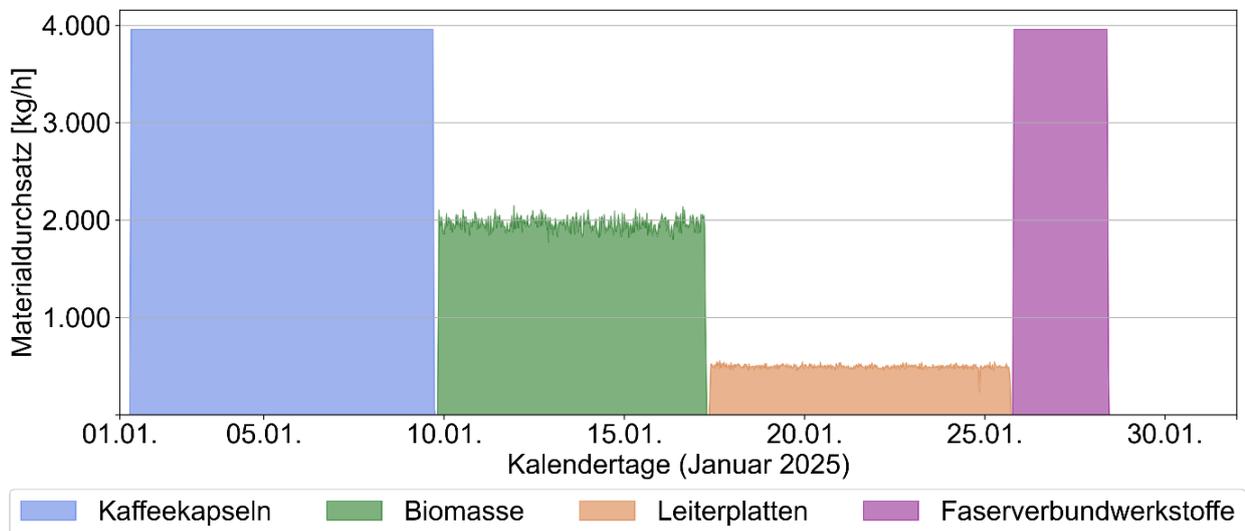


Abbildung 5-24: LSD – Winter: Materialdurchsatz Prozessplan

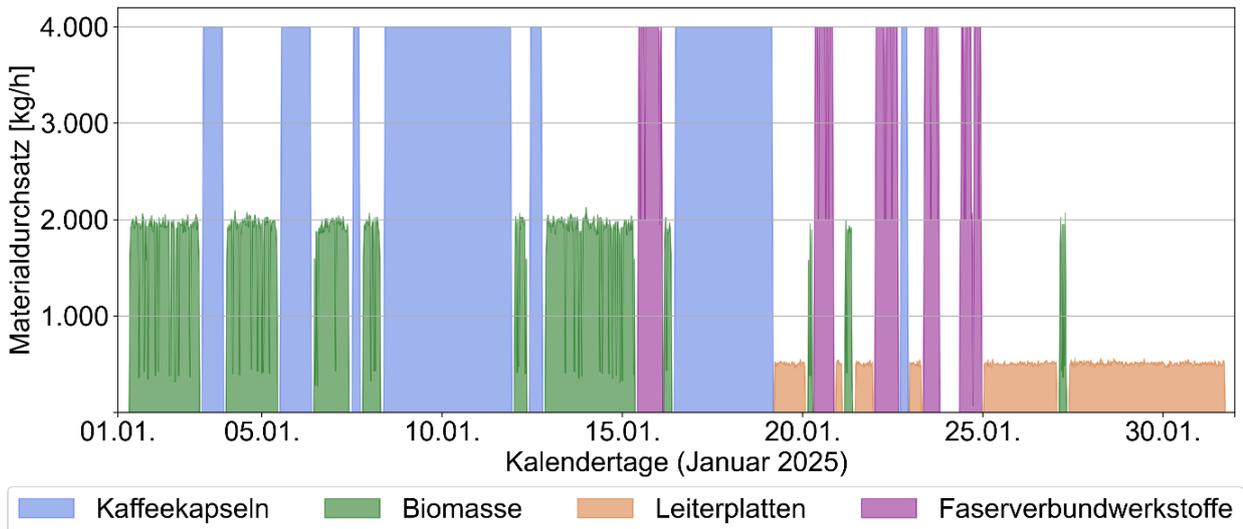


Abbildung 5-25: LSD – Winter: Materialdurchsatz Optimierung

Energielastgang

Der Energielastgang bei vorgegebenem Prozessplan wird in Abbildung 5-26 abgebildet. Die maximal lieferbare Leistung durch das Heißgas aus der nebenstehenden Anlage wird wieder auf 8 MW begrenzt. Den optimalen Energielastgang für den betrachteten Zeitraum zeigt Abbildung 5-27. Es ist zu beobachten, dass die Anlage am 24. Januar im Leerlauf fährt (daran erkennbar, dass die Drehrohfen-Verluste in diesem Zeitraum nicht auf 0 MW sinken). An diesem Tag wird kein Material aufgegeben, die Temperatur wird jedoch gehalten (vgl. Abbildung 5-23). Dadurch kann geschlussfolgert werden, dass es in diesem Zeitraum günstiger ist, die Temperatur zu halten, als die Anlage abzuschalten und wieder aufzuheizen.

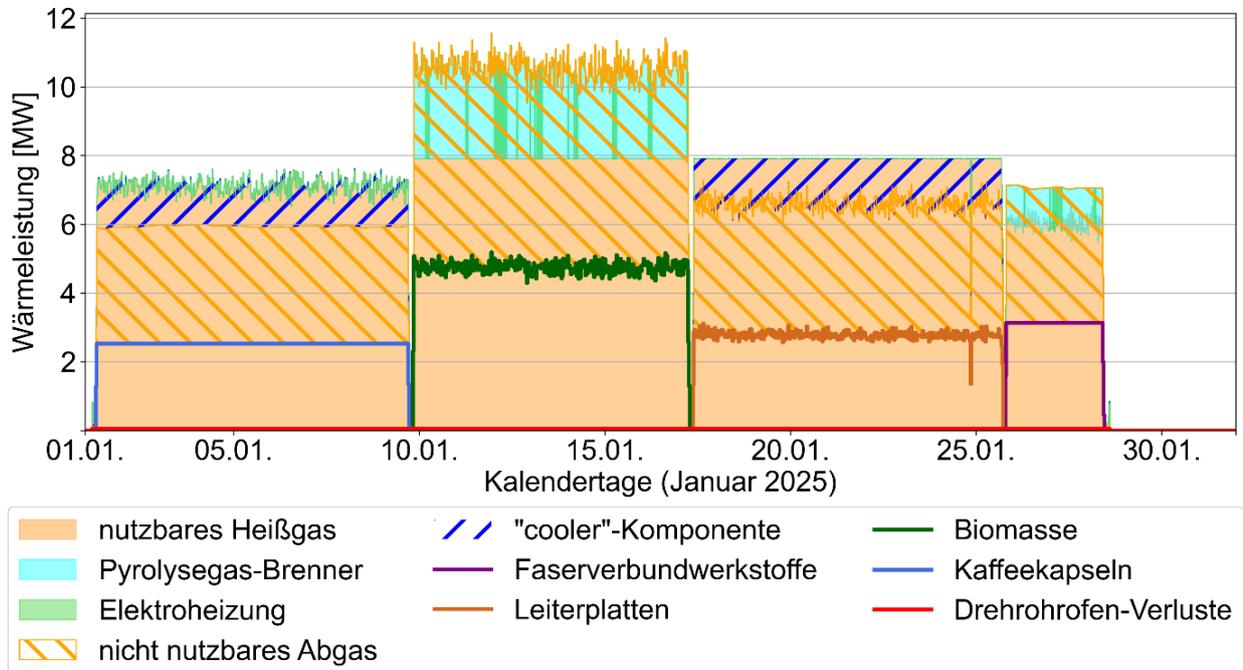


Abbildung 5-26: LSD – Winter: Energielastgang Prozessplan

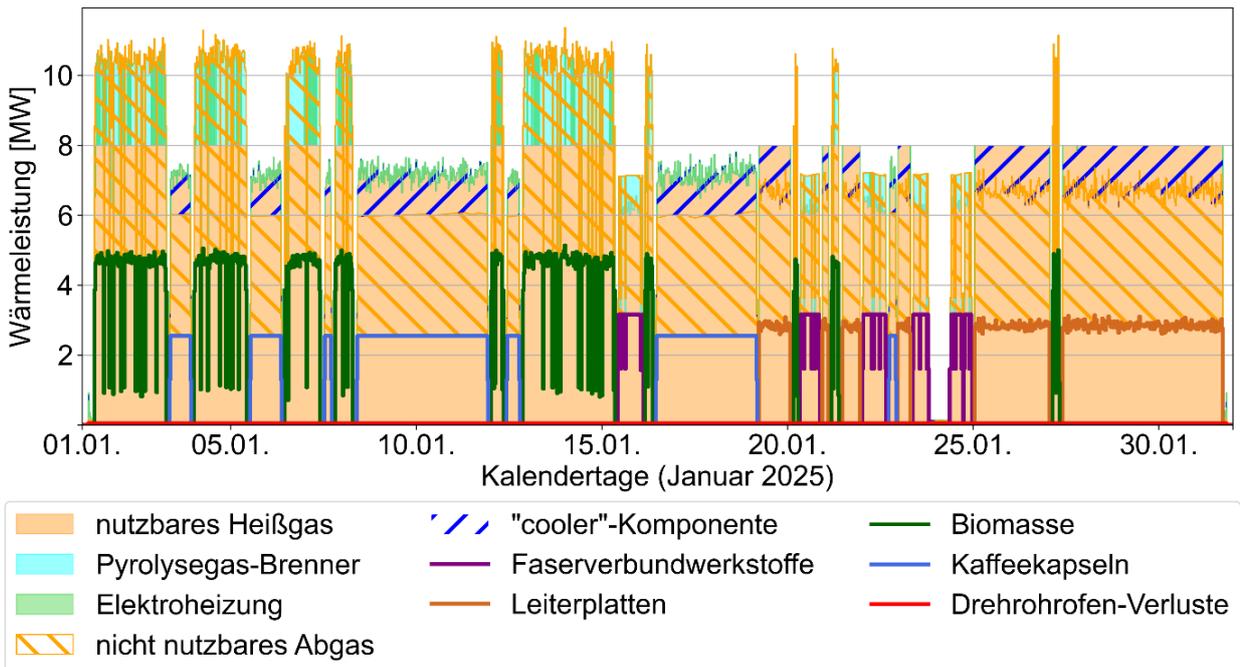


Abbildung 5-27: LSD – Winter: Energielastgang Optimierung

Gesamtenergiebetrachtung

Die Gesamtenergiebetrachtung wird in Abbildung 5-28 dargestellt. Durch die Optimierung werden im Vergleich zum vorgegebenen Prozessplan knapp acht Megawattstunden weniger Prozessenergie benötigt. Dies wird dadurch erreicht, dass der zeitliche Materialeinsatz an den Temperaturverlauf des Heißgases optimal angepasst wird und dadurch weniger Heizenergie hinzugekauft werden muss.

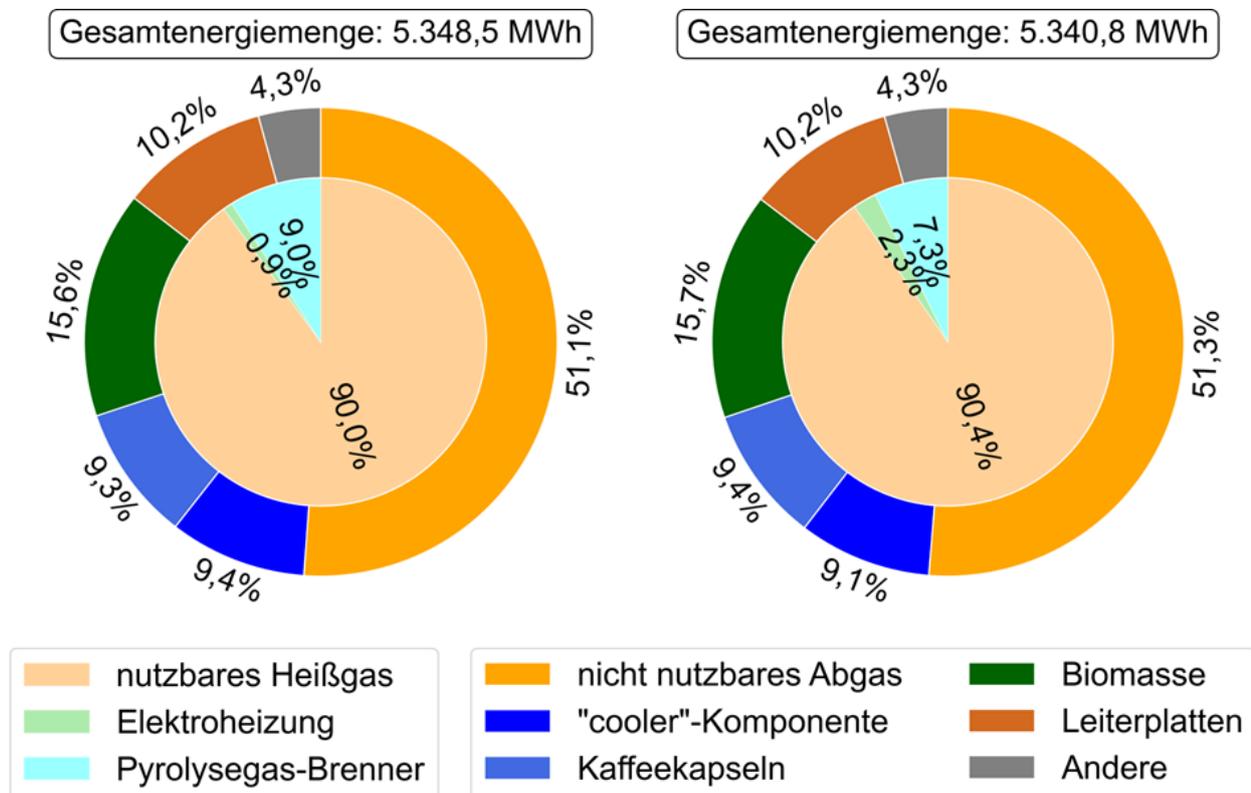


Abbildung 5-28: LSD – Winter: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts)

Der elektrische Stromverbrauch steigt in diesem Szenario um 1,4 %, der Einsatz von Pyrolysegas für die Wärmebereitstellung sinkt um 1,7 %. Die energetische Nutzung des Heißgases steigt um 0,4 %. Bei den Energieverbrauchern (jeweils äußerer Ring) sind nur vernachlässigbare Veränderungen zu beobachten.

Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung

Die Kosten- und Erlöse von Szenario 3 werden in Abbildung 5-29 dargestellt. Der Erlös aus dem Verkauf der Wertstoffe nimmt in beiden Berechnungen dieselben Werte an. Der Erlös aus dem Verkauf von Pyrolysegas steigt in der Optimierung um ca. 7 %. Dadurch, dass weniger Pyrolysegas für die Verbrennung zur Verfügung steht, muss mehr elektrischer Strom hinzugekauft werden. Deshalb steigt auch der Kostenaufwand der Elektrizität um ca. 16 %. Insgesamt wird durch die Optimierung ein Gewinnsteigerungspotential von 2.726 € im betrachteten Monat verzeichnet.

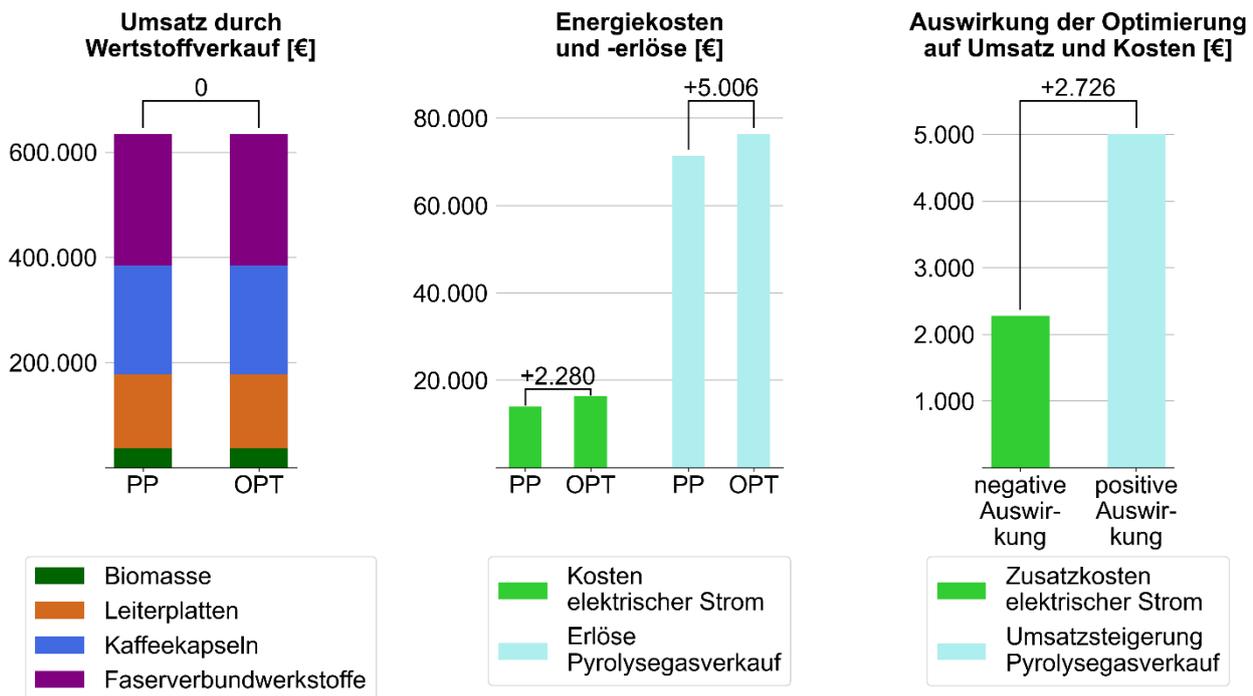


Abbildung 5-29: LSD – Winter: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)

5.6 Szenario 4: LSD – Wartung

Während den Wintermonaten werden thermische Produktionsanlagen (wie bspw. die Zementproduktion) oft gewartet, da in dieser Zeit am wenigsten Produktnachfrage besteht. Aus diesem Grund steht in diesem vierten Szenario für die Pyrolyse kein Heißgas aus einer nebenstehenden Anlage zur Verfügung. Um die Ergebnisse mit dem regulären Betrieb vergleichen zu können, wird dieselbe Anlage und der gleiche Betrachtungszeitraum wie in Szenario 3 untersucht. Auch die Abfallmengen und -parameter werden gleich angegeben, wie in der vorherigen Berechnung. Der Unterschied besteht darin, dass das Prozessgas mit Umgebungstemperatur in das System eingeleitet wird. Auch der Verkauf des Pyrolysegases an die nebenstehende Anlage wird ausgeschlossen. Für die Energiekosten werden die gleichen Verläufe, die in Abbildung 5-21 dargestellt sind, verwendet.

Die Rechendauer vom Start der Berechnung bis zur fertigen Optimierung beträgt (auf dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Gerät) 0,78 Sekunden, wenn der Prozessplan vorgegeben wird, bzw. 25 Minuten, wenn der zeitliche Materialeinsatz vom Optimierer errechnet wird.

Temperaturbetrachtung

Die Temperaturverläufe bei vorgegebenem Prozessplan werden in Abbildung 5-30 dargestellt. Im Unterschied zu Szenario 2 und Szenario 3 ist die Anlage nur bis zum 22. Januar aktiv, da zu diesem Zeitpunkt bereits das gesamte gelagerte Material pyrolysiert wurde. Die Begründung dafür wird im nachstehenden Abschnitt „Energielastgang“ erläutert. Da das Prozessgas auf Umgebungstemperatur in das System eingeleitet wird, wird nur letztere im Verlaufdiagramm dargestellt.

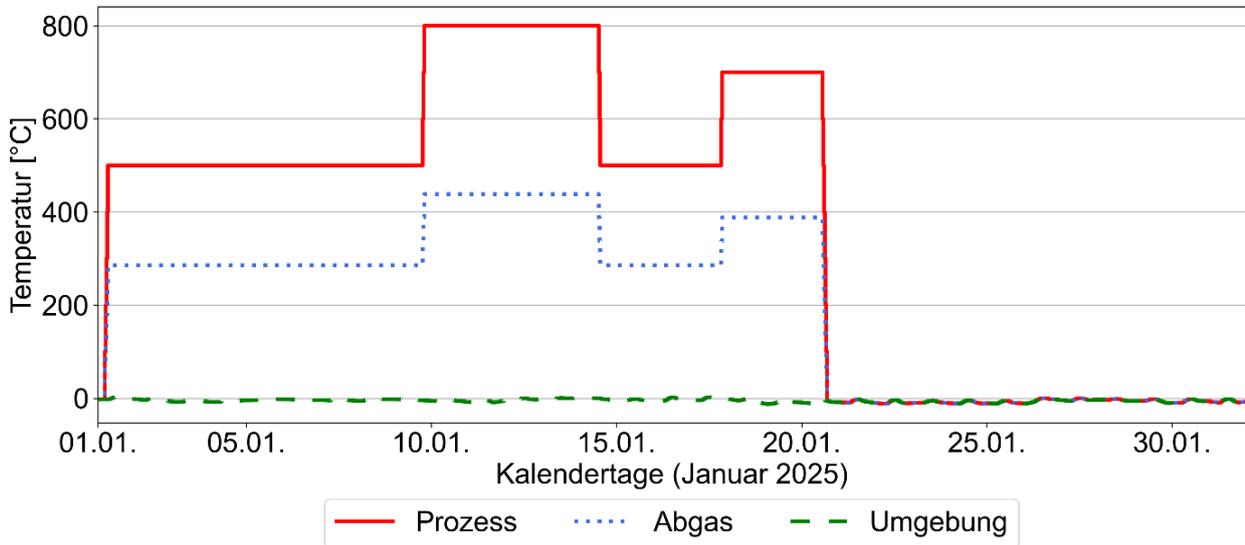


Abbildung 5-30: LSD – Wartung: Temperaturverläufe Prozessplan

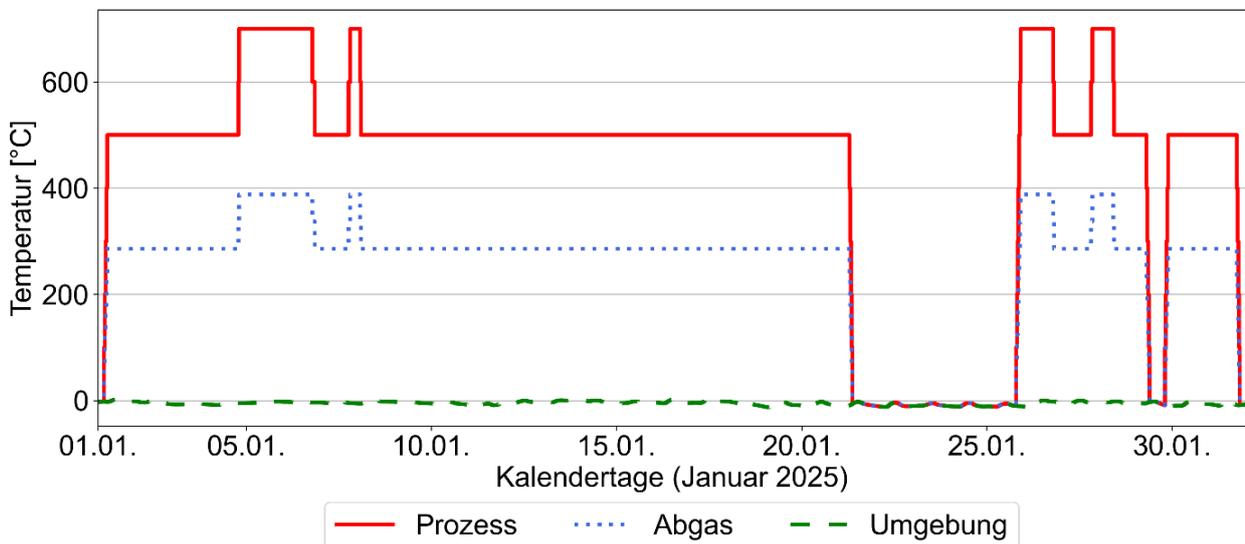


Abbildung 5-31: LSD – Wartung: Temperaturverläufe Optimierung

Der vom Optimierer errechnete zeitliche Temperaturverlauf des Drehrohrofens ist in Abbildung 5-31 dargestellt. Im Unterschied zum Prozessplan ist die Anlage auch am Monatsende aktiv. Weiters ist zu beobachten, dass die Prozesstemperatur nie mehr als 700 °C beträgt. Dies deutet darauf hin, dass keine Biomasse in der Optimierung pyrolysiert wird (Prozesstemperatur für Biomasse beträgt 800 °C).

Materialdurchsatz

Der zeitlich aufgelöste Materialeinsatz bei vorgegebenem Prozessplan wird in Abbildung 5-32 dargestellt. Die Durchsatzbegrenzung der Abfallmenge ist auf 4.000 kg/h gesetzt. Im Vergleich zu den vorherigen Szenarien können die Biomasse und die Leiterplatten mit einem größeren Massendurchsatz verarbeitet werden (bspw. Leiterplatten in Szenario 3 mit ca. 500 kg/h und in diesem Szenario mit ca. 1.300 kg/h). Die Begründung für diese Beobachtung wird im nachstehenden Abschnitt „Energieelastgang“ erläutert.

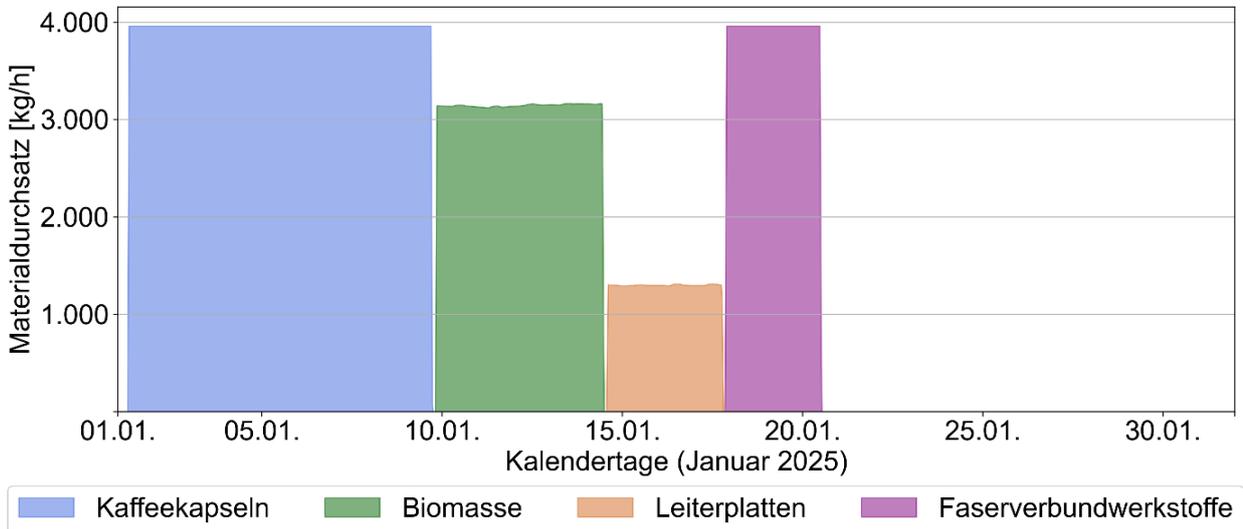


Abbildung 5-32: LSD – Wartung: Materialdurchsatz Prozessplan

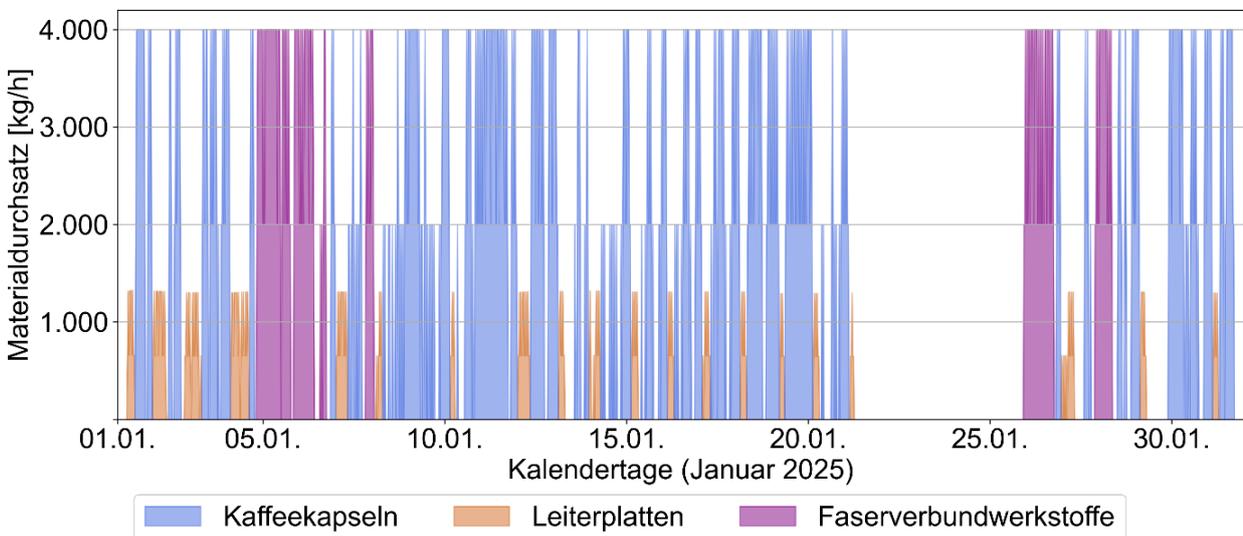


Abbildung 5-33: LSD – Wartung: Materialdurchsatz Optimierung

Der optimale zeitliche Materialdurchsatz wird in Abbildung 5-33 abgebildet. Dabei ist zu beobachten, dass Biomasse in keinem Zeitschritt der Optimierung pyrolysiert wird. Daraus lässt sich schließen, dass die Pyrolyse von Biomasse nicht gewinnbringend ist. Daher sollte diese zu Zeiten, wo keine Abwärme zur Verfügung steht, nicht verarbeitet werden.

Da die Kaffee kapseln und Leiterplatten dasselbe Temperaturniveau des Drehrohres voraussetzen, kann eine kontinuierliche Anpassung der Materialart vorgenommen werden, ohne die Prozesstemperatur zu verändern

(vgl. Abbildung 5-31). Abhängig von den Kostenverläufen der Energiequellen wird das Material ausgewählt, mit dem der größtmögliche Gewinn erzielt werden kann, was die starken Materialwechsel erklärt.

Energielastgang

Der Energielastgang bei vorgegebenem Prozessplan wird in Abbildung 5-34 dargestellt. Den optimalen Energielastgang für den betrachteten Zeitraum zeigt Abbildung 5-35.

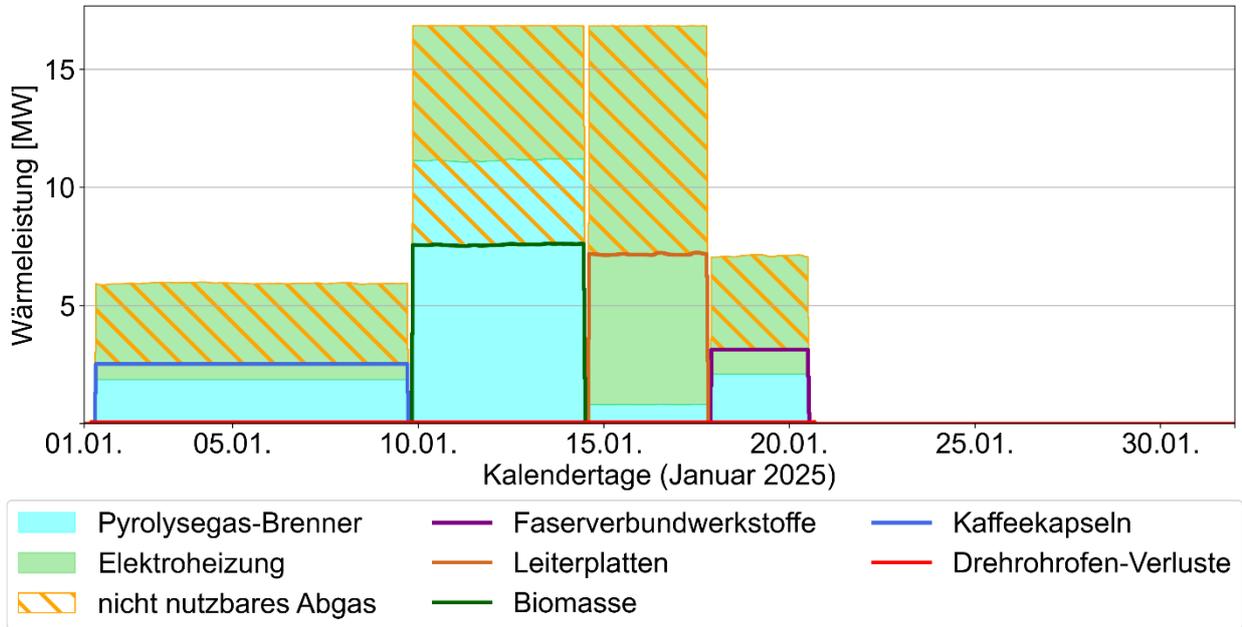


Abbildung 5-34: LSD – Wartung: Energielastgang Prozessplan

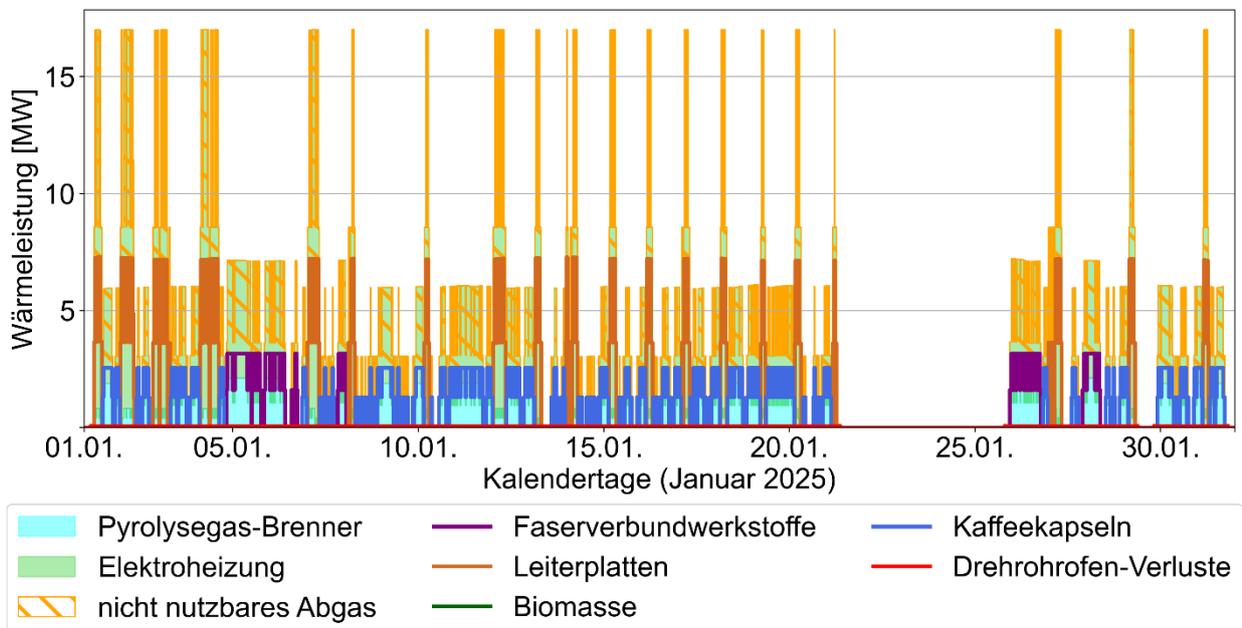


Abbildung 5-35: LSD – Wartung: Energielastgang Optimierung

Der Höchstwert der thermischen Leistung beträgt in beiden Abbildungen 17 MW (vgl. Tabelle 5-2). Deutlich zu erkennen sind bei der Optimierung die Leistungsspitzen bei der Pyrolyse der Leiterplatten. Abhängig von

den vorgegebenen Kostenverläufen werden entweder Leiterplatten (bei geringen Energiekosten) oder Kaffeekapseln (bei höheren Energiekosten) verarbeitet, ohne die Prozesstemperatur zu verändern.

Da die maximal einsetzbare Leistung nicht wie in Szenario 2 und Szenario 3 von dem Heißgas der nebenstehenden Anlage (auf 8 MW) begrenzt wird, können höhere Wärmeleistungen für die Pyrolyse aufgewandt werden. Durch diesen höheren Wärmeeinsatz kann auch mehr Abfall pro Zeitschritt pyrolysiert werden, was den größeren Materialdurchsatz (der Biomasse und der Leiterplatten) erklärt. Dadurch, dass das Prozessgas mit Umgebungstemperatur in das System eintritt, muss es nicht gekühlt werden. Deshalb wird die „cooler“-Komponente in den Abbildungen nicht berücksichtigt.

Gesamtenergiebetrachtung

Die Gesamtenergiemengen von Szenario 4 werden in Abbildung 5-36 dargestellt. Der thermische Energieeinsatz sinkt in der Optimierung um ca. 1.835 MWh im Vergleich zum vorgegebenen Prozessplan. Der Hauptteil dieser Energiereduktion ist darauf zurückzuführen, dass die Biomasse in der Optimierung nicht pyrolysiert wird. Der Energieeinsatz für die Pyrolyse der anderen drei Abfallarten bleibt in beiden Berechnungen gleich. Im Diagramm des Prozessplanes (rechte Grafik in Abbildung 5-36) ist zu erkennen, dass die Drehrohröfen-Verluste einen geringen Anteil von 1 % annehmen.

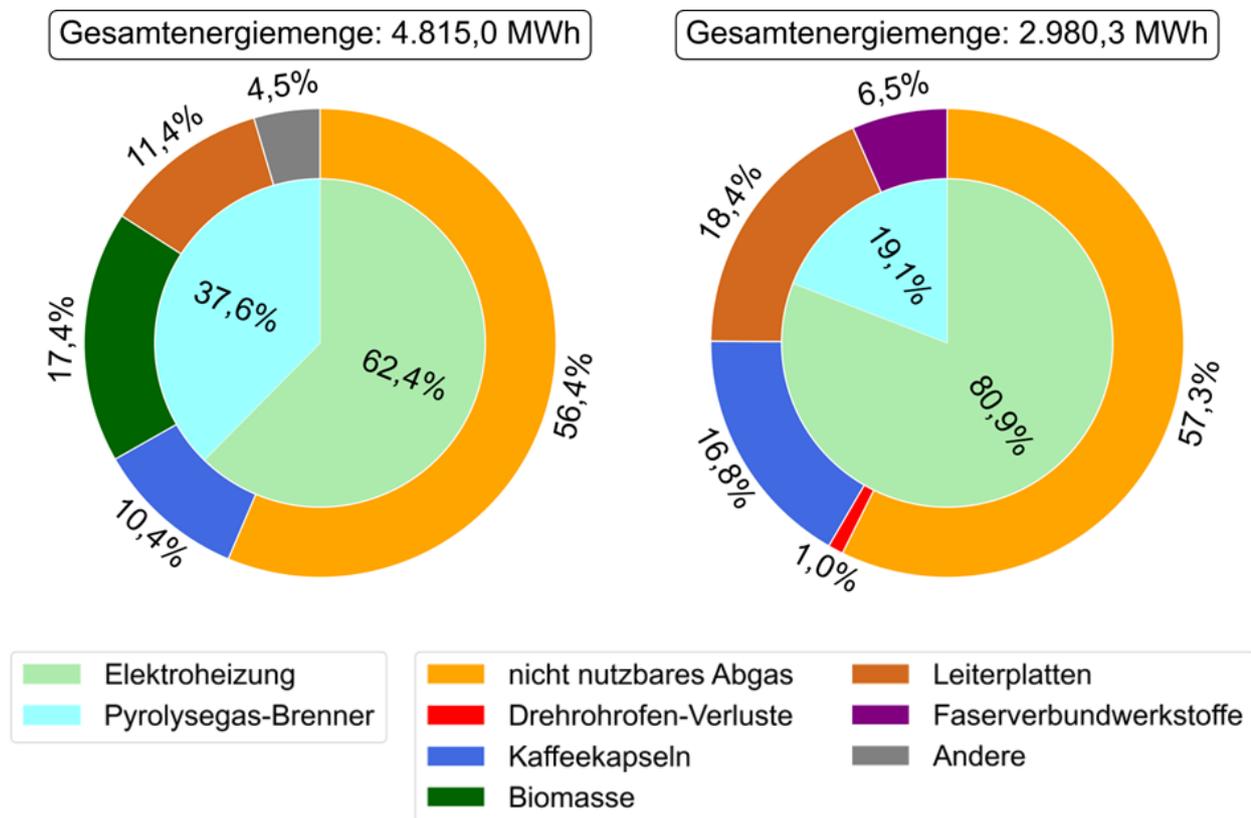


Abbildung 5-36: LSD – Wartung: Gesamtenergiebetrachtung von Prozessplan (links) und Optimierung (rechts)

Der relative elektrische Stromverbrauch steigt um ca. 18 %, folglich sinkt der Einsatz des Pyrolysegas-Brenners um den gleichen Wert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Optimierung für die Pyrolyse der Materialien jene Zeitpunkte auswählt, an denen der elektrische Strompreis im Vergleich zum Gaspreis niedrig ist.

Gewinnsteigerungspotential durch Optimierung

Die Kosten- und Erlösbetrachtung von Szenario 4 wird in Abbildung 5-37 dargestellt. Bei den Verkaufserlösen der Wertstoffe ist zu beobachten, dass beim optimierten Materialeinsatz keine Biomasse pyrolysiert wird. Dadurch wird der Umsatz durch den Wertstoffverkauf um ca. 6 % verringert. Der Verkauf von Pyrolysegas ist nicht zu erkennen. Folglich wird das gesamte entstehende Pyrolysegas in der Nachbrennkammer genutzt, um die benötigte Wärme für den Prozess bereitzustellen. Durch die Optimierung sinken die elektrischen Stromkosten um ca. 37 %. Das Gewinnsteigerungspotential durch die Optimierung beträgt im betrachteten Monat 51.936 €.

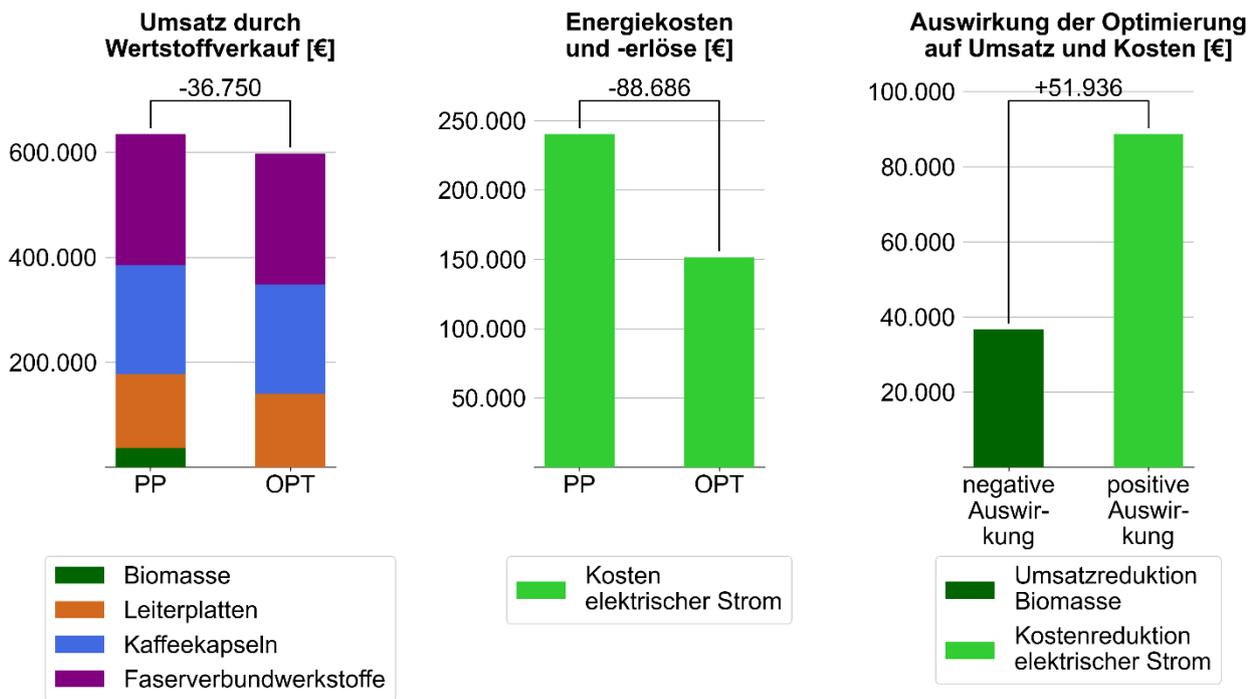


Abbildung 5-37: LSD – Wartung: Umsatz durch Wertstoffverkauf (links), Energiekosten und -erlöse (mittig) und Auswirkung der Optimierung auf Umsatz und Kosten (rechts)

5.7 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der Szenarien zusammengefasst und Vergleiche aufgestellt. In Tabelle 5-4 sind für jedes Szenario die pyrolysierten Materialmengen und Gesamtenergiemengen festgehalten, jeweils für die Simulation bei vorgegebenem Prozessplan („PP“) und bei optimiertem Materialeinsatz („OPT“). Außerdem ist das Gewinnsteigerungspotential für jedes Szenario angegeben.

In den Szenarien, wo keine Abwärme zur Verfügung steht (Szenario 1 und Szenario 4) wird bei den Simulationen mit optimiertem Materialeinsatz nicht die gesamte lagernde Materialmenge pyrolysiert. Dies lässt darauf schließen, dass der Optimierer unwirtschaftliche Abfallarten erkennt und diese nicht aufbereitet, wenn ungünstige Bedingungen vorherrschen. Da die Abwärme in den untersuchten Szenarien als kostenlos angenommen wurde, können in Szenario 2 und Szenario 3 auch die wirtschaftlich ungünstigen Materialien gewinnbringend verarbeitet werden.

Der Vergleich von Szenario 2 (Sommer) mit Szenario 3 (Winter) zeigt, dass für die Aufbereitung derselben Materialmenge im Winter ca. 200 MWh mehr Energie benötigt werden. Dies kann darauf zurückgeführt

werden, dass die Umgebungstemperatur im Winter niedriger ist und die nicht nutzbare Abwärme somit einen größeren Anteil am Verbrauch einnimmt.

Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Szenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
	SSD	LSD – Sommer	LSD – Winter	LSD – Wartung
Materialmenge PP [t]	18	1.500	1.500	1.500
Materialmenge OPT [t]	14,9	1.500	1.500	1.150
Gesamtenergiemenge PP [MWh]	68,40	5.163	5.349	4.815
Gesamtenergiemenge OPT [MWh]	52,30	5.158	5.341	2.980
Gewinnsteigerungspotential [€]	400	3.125	2.726	51.936

Bei dem Gesamtenergievergleich von Szenario 3 mit Szenario 4 ist eine Reduktion der Einsatzenergie von ca. 500 MWh (ca. 10 %) zu erkennen. Dabei werden die beiden Berechnungen mit vorgegebenem Prozessplan („PP“) miteinander verglichen, da der Vergleich der Ergebnisse mit optimiertem Materialeinsatz („OPT“) durch das Fehlen der Biomasse in Szenario 4 erschwert wird. Die geringere Einsatzenergie ist damit zu erklären, dass in Szenario 3 Energie durch die „cooler“-Komponente das System verlässt, damit das Heißgas auf die benötigte Prozesstemperatur abgekühlt wird. In Szenario 4 muss das Prozessgas in keinem Zeitschritt gekühlt werden (da es Umgebungstemperatur besitzt).

Bei einem Vergleich der Kosten und Erlöse von Szenario 2 und Szenario 3 ist zu beobachten, dass die Gewinnsteigerung bei gleichen Materialmengen in den Wintermonaten um ca. 400 € geringer ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strompreis im Winter höher als im Sommer ist und sich deshalb auch die Stromkosten erhöhen. Dadurch wird weniger Gewinn erwirtschaftet.

Um die Gewinnsteigerungspotentiale der Szenarien vergleichen zu können, müssen aus den absoluten Werten relative Werte abgeleitet werden. Hierfür kann eine spezifische Gewinnsteigerung berechnet werden. Für Szenario 2 ergibt sich bspw. eine spezifische Gewinnsteigerung von 0,0021 €/kg ($3.125 \text{ €} / 1.500 \text{ t} \approx 2,1 \text{ €}/\text{t}$). Das bedeutet, durch die Optimierung erhöht sich der Gewinn um ca. 0,2 Cent pro verarbeitetes Kilogramm Material. Werden diese Berechnungen auch für die anderen Szenarien durchgeführt, ergeben sich die Werte 0,025 €/kg für Szenario 1, 0,0018 €/kg für Szenario 3 und 0,04 €/kg für Szenario 4. Beim Vergleich dieser Werte fällt auf, dass der Optimierer vor allem zu Zeiten, wo keine Abwärme aus einer nebenstehenden Anlage zur Verfügung steht, hohe Gewinnsteigerungspotentiale ermittelt.

5.8 Durchschnittliche Energiepreise und Nachnutzung der Drehrohfen-Abgase

In den folgenden Abschnitten werden zwei zusätzliche Faktoren betrachtet, die aus den beschriebenen Szenarien abgeleitet werden können. Dabei beschreibt der erste Abschnitt die Herleitung eines durchschnittlichen Einkaufspreises der bezogenen Energiemengen und der zweite Abschnitt die potentielle Nutzung der Abwärme aus dem Drehrohfen.

Durchschnittlicher Energiepreis

Ein durchschnittlicher Energiepreis kann ein Bewertungskriterium für die Güte der Optimierung darstellen. Da der Optimierer den zeitlichen Energieeinsatz an die Kostenverläufe anpasst, wird auch der durchschnittliche Energiepreis auf ein Minimum reduziert. Dieser kann dadurch erhalten werden, indem die Gesamtkosten der zugekauften Energie über den betrachteten Zeitraum durch die gesamte Energiemenge dividiert wird. In den untersuchten Anlagen muss nur elektrischer Strom hinzugekauft werden (Erdgas wird nicht verwendet).

Die Berechnung der durchschnittlichen Strompreise wird in Tabelle 5-5 für alle Szenarien angeführt. Die Stromkosten werden aus den Simulationsergebnissen der Szenarien 1 bis 4 entnommen und in der Tabelle angeschrieben. Um die Energiemenge des zugekauften elektrischen Stromes zu erhalten (auch Strom für sekundäre Anwendungen wie Elektromotor), muss die Summe der Energieflüsse aus der „el_grid“-Komponente (vgl. Abbildung 4-17) gebildet werden. Dafür werden die Berechnungsergebnisse in Python analysiert und die erhaltenen Werte in die Tabelle eingetragen. Anschließend werden die Durchschnittspreise berechnet und in Tabelle 5-5 eingetragen, indem die Stromkosten durch die jeweiligen Energiemengen geteilt werden.

Tabelle 5-5: Durchschnittliche elektrische Stromkosten der berechneten Szenarien

Bezeichnung Szenario	Stromkosten [€]	Energiemenge [MWh]	Durchschnittspreis [€/MWh]
SSD: Prozessplan	2.014	46,72	43,11
SSD: Optimierung	1.289	41,35	31,17
LSD – Sommer: Prozessplan	11.925	181,5	65,70
LSD – Sommer: Optimierung	13.337	257,7	51,75
LSD – Winter: Prozessplan	14.084	213,7	65,91
LSD – Winter: Optimierung	16.364	277,5	58,97
LSD – Wartung: Prozessplan	240.324	3.170	75,81
LSD – Wartung: Optimierung	151.638	2.548	59,51

In jedem der vier Szenarien ist zu beobachten, dass der Durchschnittspreis des elektrischen Stromes durch die Optimierung gesenkt wird. Bei der Pilotanlage (SSD) wird der Durchschnittspreis um ca. 28 % reduziert. Bei der Großanlage sinkt der Wert im Sommer um ca. 21 %, im Winter um ca. 11 % und während die nebenstehende Anlage gewartet wird um ca. 21 %. Dadurch lassen sich größere Gewinne in den Optimierungen erzielen.

Nachnutzung der Abwärme

Im Drehrohrofen kann nur ein Teil der Heißgas-Energie für den Prozess genutzt werden. Ein großer Teil der Energie verlässt das System jedoch als ungenutzte Abwärme (vgl. Q_{to_env} in Kapitel 4.4.4). Die Temperatur des Abgases am Drehrohrofenausgang beträgt ca. zwischen 250 °C und 450 °C. Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Untersuchung des Nachnutzungspotentiales dieses Abgases. Die detaillierte Untersuchung gehört nicht zum Projektziel. Deshalb wird im Folgenden nur ein Überblick über die mögliche Nachnutzung der Abwärme gegeben.

Das heiße Abgas des Drehrohrofens kann, im Sinne einer kaskadischen Nutzung, für weitere Anwendungen genutzt werden. Je nach Temperaturniveau, kann es bspw. für einen weiteren thermischen Aufbereitungsprozess, die Erzeugung von elektrischem Strom, Wärmeeinspeisung in ein Fernwärmenetz oder die Beheizung von Büroräumlichkeiten verwendet werden. Es werden fünf beispielhafte Temperaturniveaus untersucht, um die Möglichkeiten der Nachnutzung des Heißgases abschätzen zu können.

Analog zu den in Kapitel 4.4 angewandten Formeln, kann auch die Energiemenge bestimmt werden, die dem Abgas des Drehrohrofens entnommen werden kann. Die Berechnung erfolgt wie in Gleichung (5-1) dargestellt. Dabei beschreibt $Q_{Nachnutzung}$ die Energiemenge, die für eine sekundäre Anwendung zur Verfügung steht und Q_{Abgas} die Energiemenge, die das Abgas des Drehrohrofens abgeben kann. Mit T_{Abgas} wird die Gastemperatur am Drehrohrofen-Ausgang und mit $T_{Atmosphäre}$ die Umgebungstemperatur (Referenztemperatur) beschrieben. Die Gleichung muss für jeden Zeitschritt der Berechnungsergebnisse gelöst werden. Die Summe dieser Lösungen ergibt die gesamte Energiemenge, die für die Nachnutzung zur Verfügung steht.

$$Q_{Nachnutzung} = \frac{T_{Abgas} - T_{Nachnutzung}}{T_{Abgas} - T_{Atmosphäre}} * Q_{Abgas} \quad (5-1)$$

Für $T_{Nachnutzung}$ werden fünf beispielhafte Temperaturniveaus angegeben (50 °C bis 250 °C). Diese stehen für die Mindesttemperaturen, die sekundäre Anwendungen voraussetzen. Damit kann eine erste Auswahl der Nachnutzungs-Technologie ermöglicht werden. In Tabelle 5-6 werden die berechneten Ausnutzungsgrade des Abgases aus dem Drehrohrofen, in Abhängigkeit zur Temperaturanforderung der Nachnutzung, angegeben. In der Kopfzeile sind die fünf beispielhaften Mindesttemperaturen angegeben, für welche die Ausnutzungsgrade berechnet werden. Die Werte werden erhalten, wenn $Q_{Nachnutzung}$ durch Q_{Abgas} dividiert wird.

Tabelle 5-6: Ausnutzungsgrad des Drehrohrofen-Abgases in Abhängigkeit zur Temperaturanforderung

Mindesttemperatur	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
SSD: Prozessplan	89%	70%	56%	42%	27%
SSD: Optimierung	87%	71%	52%	37%	21%
LSD – Sommer: Prozessplan	94%	63%	63%	62%	18%
LSD – Sommer: Optimierung	94%	63%	62%	60%	17%
LSD – Winter: Prozessplan	85%	60%	60%	58%	18%
LSD – Winter: Optimierung	86%	60%	59%	56%	17%
LSD – Wartung: Prozessplan	80%	69%	55%	44%	27%
LSD – Wartung: Optimierung	81%	70%	43%	34%	11%

Aus Tabelle 5-6 geht hervor, dass der Ausnutzungsgrad des Abgases sinkt, je höher die Temperaturanforderung für die Nachnutzung ist. So kann bei einer vorausgesetzten Temperatur von 50 °C (bspw. für Bodenheizung in Büroräumen denkbar) über 80 % der im Abgas enthaltenen Energie für die

Nachnutzung verwendet werden. Wenn hohe Temperaturen vorausgesetzt werden, wie bspw. 250 °C, sinkt der Ausnutzungsgrad des Abgases für die betrachteten Berechnungen auf bis zu 10 %. Bei Temperaturen um 150 °C kann noch über 50 % der im Abgas enthaltenen Energie genutzt werden. Wenn diese großen Energiemengen bspw. in ein Fernwärmenetz eingespeist werden, können zusätzliche Erlöse erwirtschaftet werden.

Bei den Werten in Tabelle 5-6 kann beobachtet werden, dass der Unterschied zwischen den Ausnutzungsgraden bei vorgegebenem Prozessplan und bei der Optimierung (jeweils dieselbe Anlage und derselbe Betrachtungszeitraum) sich nur geringfügig verändert. Auffallend ist auch, dass in den Sommermonaten der Ausnutzungsgrad des Abgases erhöhte Werte annimmt.

5.9 Herausforderungen des Optimierungskonzeptes

In den folgenden Abschnitten werden die Herausforderungen und Probleme bei der Erstellung des Modelles und bei der Optimierung zusammengefasst.

Mit der OEMOF-Bibliothek können nur lineare Gleichungssysteme erstellt werden. Dabei werden die Zeitschritte einzeln und unabhängig voneinander gelöst, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Dieser linearen Optimierung sind Grenzen gesetzt, bspw. ist die zusammenhängende Betrachtung der Zeitschritte nur begrenzt möglich. Die Temperaturabhängigkeit des Drehrohrofens lässt sich jedoch nur darstellen, wenn die vor- und nachherigen Zeitschritte voneinander abhängen. Die Erstellung von Randbedingungen, welche die zeitlich abhängige Temperaturänderung ermöglichen und gleichzeitig die Prinzipien der linearen Programmierung einhalten, stellte deshalb eine Herausforderung dar.

Eine weitere Herausforderung war die benötigte Rechendauer der Optimierung. Je mehr Constraints (Zeitschritte, Komponenten und Temperaturniveaus des Drehrohrofens) hinzugefügt wurden, desto länger dauerte die Ermittlung der optimalen Lösung. Nach der Integration komplexer Bedingungen dauerten die Berechnungen oftmals Stunden. Dies erschwerte die Ermittlung des Einflusses einzelner Randbedingungen auf das Ergebnis, weshalb eine Analyse der Rechendauer in Zusammenhang mit der Ergebnislänge durchgeführt wurde. Basierend auf diesen Ergebnissen, wurden für das finale Modell die Randbedingungen so implementiert, dass eine realistische Berechnung ermöglicht wurde und die Rechendauer trotzdem in praktisch möglichen Grenzen blieb.

Die lineare Optimierung betrachtet keinen chronologischen Verlauf, sondern berechnet alle Zeitschritte gleichzeitig. Dieser Effekt wird mit „perfect foresight“ bezeichnet, also perfekte Voraussicht. Das bedeutet, der Massendurchsatz wird von der Optimierung so berechnet, dass zu den günstigsten Zeitschritten am meisten Abfall pyrolysiert wird. Dadurch ergaben sich teilweise starke Schwankungen des Massendurchsatzes im Drehrohr, deren Einhaltung in einer realen Anlage eine große Herausforderung darstellt. Dies ist bspw. in Abbildung 5-33 bei den Kaffeekapseln und Faserverbundwerkstoffen zu beobachten, bei denen der Materialdurchsatz durchgehend zwischen 2.000 kg/h und 4.000 kg/h schwankt. Die Optimierungen geben jedoch die theoretisch möglichen Einsparungspotentiale an, wodurch das Ziel dieser Arbeit erfüllt wurde. [1]

Eine weitere Herausforderung stellte die Beschaffung der benötigten Eingabedaten dar. Nur ein Teil der Parameter konnte von Seccon übermittelt werden, da das Unternehmen bis zum Abschluss der vorliegenden Arbeit die Anlage nur zu Testzwecken betrieb. Somit konnten nur wenige Angaben und Schätzungen für einen zukünftigen kontinuierlichen Betrieb mitgeteilt werden. Die restlichen benötigten Parameter wurden an Literaturwerte angelehnt. Die größte Herausforderung bestand aus der Suche der Prozesseigenschaften der Materialien, da dazu nur wenig wissenschaftliche Literatur zur Verfügung steht. Auch die Kontrolle der

Optimierungsergebnisse durch Realdaten war nur in begrenztem Ausmaß möglich. Die Ergebnisse stimmen jedoch mit den prognostizierten Schätzungen von Seccon überein.

In Szenario 2 und Szenario 3 war zu beobachten, dass das Gewinnsteigerungspotential nur gering ausfällt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auch bei vorgegebenem Prozessplan der Energieeinsatz optimiert wird. Der zeitliche Materialeinsatz ist zwar festgelegt, der Energieeinsatz in den einzelnen Zeitschritten wird jedoch trotzdem so optimiert, dass die wirtschaftlichste Kombination der Energiequellen erhalten wird. Sobald die reale Anlage im regulären Betrieb läuft, können Messungen durchgeführt und mit der Optimierung verglichen werden, um das reale Einsparungspotential zu erhalten.

Eine Herausforderung stellt auch die Beschaffung der Kosten- und Temperaturprofile dar. Für erstere kann bspw. eine Verwendung von Day-Ahead-Preisen oder der aktuelle Strompreis, den das Unternehmen zahlt, angedacht werden. Das Temperaturprofil des Heißgases aus einer nebenstehenden Anlage muss gemessen oder durch den Betreiber der Anlage prognostiziert werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird ein Energiefluss-Modell auf Basis eines Patentes der Seccon GmbH vorgestellt. Das Modell stellt den Pyrolyseprozess in einem Drehrohrofen dar, mit dem Abfallfraktionen durch Nutzung von bestehenden Abwärmepotentialen kosten- und energieeffizient aufbereitet werden. Anhand von vier Szenarien wurden beispielhafte Berechnungen durchgeführt und das Optimierungspotential analysiert. Als Nachteil dieser Modellierung muss die relativ geringe Reduktion der Gesamtenergiemenge (kleiner als 1 %) berücksichtigt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine vorgegebene Abfallmenge auch in der Optimierung eine fixe, nicht veränderbare, Energiemenge benötigt um vollständig pyrolysiert zu werden. Das erhobene Verbesserungspotential der Szenarien ergab sich durch die Gewinnsteigerung.

Zur Erstellung des Energiemodelles wurde die Python-Bibliothek OEMOF genutzt. Dadurch können die Energie-, Emissions- und Kostenverläufe zeitlich aufgelöst dargestellt und optimiert werden. Da das OEMOF-Paket keine Möglichkeit für die temperaturabhängige Betrachtung beinhaltet, wurden neue Randbedingungen, sog. Constraints, entwickelt und dem Modell hinzugefügt, um die Optimierung an den realen Prozess anzunähern. Das Modell wurde generisch erstellt, wodurch eine Optimierung unabhängig von der Anlagengröße, den verarbeiteten Materialmengen, den Drehrohrofenspezifikationen, des Betrachtungszeitraums, der Kostenverläufe und der Verfügbarkeiten der Energiequellen durchgeführt werden kann.

Im Modell sind die wichtigsten Energiequellen und -verbraucher definiert, die einen Einfluss auf den realen Prozess haben. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf den Umgang mit dem Prozessgas gelegt. Wenn ein Heißgas aus einem nebenstehenden thermischen Prozess geliefert werden kann, muss dieses an die Drehrohrofen- und Materialanforderungen angepasst werden. Dafür kann, abhängig von der Eingangstemperatur, das Prozessgas entweder gekühlt oder durch Zugabe von externer Energie erhitzt werden. Zweiteres wird in den betrachteten Szenarien durch eine Elektroheizung und durch eine Nachbrennkammer (für die entstehenden Pyrolysegase) gedeckt. Auf den Einsatz eines Erdgasbrenners wird verzichtet, da der theoretische „CO₂-neutrale“ Prozess untersucht wird.

Die im Prozessgas enthaltene Energie kann für die Pyrolyse der Materialien und für den Ausgleich der Drehrohrofen-Verlustwärme verwendet werden. Abhängig von der Austrittstemperatur des Drehrohrofen-Abgases verlässt ein Teil der enthaltenen Energie den Prozess ungenutzt und wird an die Atmosphäre (oder eine eventuelle Nachnutzung) abgegeben. Wenn mehr Pyrolysegas entsteht, als für die thermische Nutzung im Prozess benötigt wird, kann dieses gewinnbringend verkauft werden. Überschüssige Energie im Prozessgas kann in ein Fernwärmenetz eingespeist werden. Auch die sekundären Energieverbraucher (bspw. Elektromotoren) werden im Modell berücksichtigt.

Da sich die reale Anlage von Seccon zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit noch in der Testphase befindet, konnten nur wenige der benötigten Werte gemessen werden. Ein großer Teil der Eingabedaten wurde deshalb von Seccon abgeschätzt, in Absprache mit dem Projektteam definiert oder an Literaturwerte angelehnt. Für die Kostenverläufe der Energiequellen wurden prognostizierte Werte für das Jahr 2025 verwendet, da in diesem Jahr sowohl der reguläre Betrieb der Pilotanlage, als auch die Inbetriebnahme einer Großanlage erwartet wird. Das nutzbare Heißgas aus einer nebenstehenden Anlage wird als kostenlos angenommen, da Seccon beabsichtigt, eine Geschäftspartnerschaft mit den in Frage kommenden Unternehmen abzuschließen. Dadurch werden diese am Gewinn des Aufbereitungsprozesses beteiligt und können durch die Nachnutzung des Abgases deren Energiebilanz positiv beeinflussen.

Die Optimierung der Pilotanlage (Szenario 1) ergab eine spezifische Gewinnsteigerung von ca. 0,025 €/kg. Dabei sinkt der Gesamtenergieeinsatz um ca. 24 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Optimierung

nicht die gesamte vorgegebene Materialmenge pyrolysiert wird. Der Optimierer wählt, abhängig von der Verfügbarkeit des Heißgases aus einer nebenstehenden Anlage, nur die Abfallfraktionen aus, welche das Betriebsergebnis positiv beeinflussen.

Durch die Optimierung der Großanlage (mit nutzbarem Heißgas) ergaben sich Energieeinsparungspotentiale von ca. 0,08 % (Sommer – Szenario 2) und ca. 0,14 % (Winter – Szenario 3). Die spezifische Gewinnsteigerung kann sowohl im Sommer, als auch im Winter mit ca. 0,002 €/kg beziffert werden. Einen größeren Einfluss hat die Optimierung, wenn die gesamte Prozessenergie zugekauft werden muss (Szenario 4). In diesem Fall ist eine spezifische Gewinnsteigerung von ca. 0,04 €/kg zu beobachten. Abfallfraktionen, welche nicht wirtschaftlich aufbereitet werden können, werden vom Optimierer identifiziert und von deren Verarbeitung kann in der realen Anlage abgesehen werden.

Im Hinblick auf zukünftige Forschungsprojekte können folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Die thermische Nachnutzung des Drehrohren-Abgases wird in dieser Arbeit nur oberflächlich untersucht. Anhand von Messungen an der realen Anlage kann der reale Ausnutzungsgrad des Abgases berechnet werden. Durch den Vergleich der Messergebnisse mit der Optimierung kann die Technologie der Nachnutzung bestimmt werden.
- Ähnlich zur thermischen Nachnutzung der Drehrohren-Abgase kann auch die direkte Nachverarbeitung der pyrolysierten Wertstoffe untersucht werden. Bei Verlassen des Drehrohres besitzen diese ein erhöhtes Temperaturniveau und könnten in einer weiteren Aufbereitungsanlage direkt genutzt werden, ohne sie vorher abzukühlen und wieder zu erhitzen.
- Bei der Aufbereitung der Abfälle entsteht nicht nur Pyrolysegas, sondern auch ein flüssiges Produkt, das sog. Pyrolyseöl. Dieses könnte von den Drehrohren-Produkten abgesondert werden und analog zum Pyrolysegas entweder verkauft oder für die thermische Energieerzeugung verwendet werden.
- Die verursachten Emissionen werden in den betrachteten Szenarien dieser Arbeit nicht behandelt. Mit Hilfe von Messwerten der realen Anlage können dem Modell Emissionsparameter übergeben werden und anhand der Grenzwerte optimiert werden.
- Im realen Prozess wird vor allem für die Aufheizevorgänge fossile Energie verwendet (behördliche Vorgabe aus Genehmigungsbescheid; damit Emissionsgrenzwerte bis zum Erreichen der Betriebstemperatur eingehalten werden). Die detaillierte Betrachtung dieser Aufheizevorgänge kann im Modell für zukünftige Optimierungen implementiert werden.
- Im erstellten Modell wird das entstehende Pyrolysegas direkt verwendet (entweder thermisch verwertet oder verkauft). Dessen Speicherung für die Nutzung zu späteren Zeitpunkten wird nicht betrachtet. Wenn bei zukünftigen realen Anlagen ein Pyrolysegasspeicher angedacht wird, muss dieser dem Modell hinzugefügt werden.
- Parallel zur vorliegenden Arbeit läuft ein Projekt, in dem die physikalischen und chemischen Zusammenhänge des Pyrolyseprozesses untersucht werden. Dafür wird ein Modell in Aspen PLUS erstellt und mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes werden Kennlinien für die Anlage generiert. Diese Ergebnisse können in das hier entwickelte Modell eingefügt und von der Optimierung berücksichtigt werden.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] MÖLLER, C. ; PELS LEUSDEN, C. ; PLEIßNER, F. ; WOLF, J. ; LAUNER, J. ; KÖHLER, S. ; KÖTTER, E.: *oemof_heat Abschlussbericht*. 2020
- [2] SECKLEHNER, Jürgen: *Verfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Recycling-Objekten*. secon e.U. Anmelde nr. A 50619/2017, Österreich. Veröffentlichungsnr. AT 520225 A2 2019-02-15
- [3] SPECHT, E. ; BECKER F.: Drehrohröfen. In: GROTE, K.-H.; BENDER, B.; GÖHLICH, D. (Hrsg.): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Germany : Springer Vieweg, 2018, K7-K15
- [4] NAGEL, Janet: *Optimization of Energy Supply Systems : Modelling, Programming and Analysis*. Cham : Springer International Publishing, 2019 (Lecture Notes in Energy 69)
- [5] HILPERT, S. ; KALDEMEYER, C. ; KRIEN, U. ; GÜNTHER, S. ; WINGENBACH, C. ; PLESSMANN, G.: *The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A New Approach to Facilitate Open Science in Energy System Modelling*. In: *Energy Strategy Reviews* 22 (2018)
- [6] OEMOF-DEVELOPER-GROUP: *oemof.solph Documentation*. URL <https://oemof-solph.readthedocs.io/> – Überprüfungsdatum 2023-09-01
- [7] CERBE, G. ; WILHELMS, G.: *Technische Thermodynamik : Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. 19., überarbeitete Auflage. München : Hanser, 2021
- [8] DAUGAARD, D. E. ; BROWN, R. C.: *Enthalpy for Pyrolysis for Several Types of Biomass*. In: *Energy & Fuels* 17 (2003), Nr. 4
- [9] CRIBB, J. L. ; LANGLEY, P. A. ; SASS, A.: *Simulation of the Heat Transfer Phenomena in a Rotary Kiln*. In: *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 8 (1969), Nr. 4
- [10] BOATENG, A. A. ; BARR, P. V.: *A Thermal Model for the Rotary Kiln Including Heat Transfer Within the Bed*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39 (1996), Nr. 10
- [11] SCHWEIZER, Anton: *Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau : Auslegung von Ventilatoren für die Lüftungstechnik*. URL <https://www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/ventilator.php> – Überprüfungsdatum 2023-12-03
- [12] SIGLOCH, Herbert: *Strömungsmaschinen : Grundlagen und Anwendungen*. 7., aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2021
- [13] ROSEN, M. ; BULUCEA, C. A.: *Using Exergy to Understand and Improve the Efficiency of Electrical Power Technologies*. In: *Entropy* 11 (2009), Nr. 4
- [14] GUROBI OPTIMIZATION LLC: *Gurobi Homepage*. URL <https://www.gurobi.com/> – Überprüfungsdatum 2023-12-18
- [15] LI, X. ; STREZOV, V. ; KAN, T.: *Energy Recovery Potential Analysis of Spent Coffee Grounds Pyrolysis Products*. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 110 (2014)
- [16] GUO, X. ; QIN, F. G. F. ; YANG, X. ; JIANG, R.: *Study on Low-Temperature Pyrolysis of Large-Size Printed Circuit Boards*. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 105 (2014)
- [17] CAO, Y. ; WANG, Y. ; RILEY, J. T. ; PAN, W.-P.: *A Novel Biomass Air Gasification Process for Producing Tar-Free Higher Heating Value Fuel Gas*. In: *Fuel Processing Technology* 87 (2006), Nr. 4

- [18] WONG, K. ; RUDD, C. ; PICKERING, S. ; LIU, X.: *Composites Recycling Solutions for the Aviation Industry*. In: *Science China Technological Sciences* 60 (2017), Nr. 9
- [19] SONG, Y. S. ; YOUN, J. R. ; GUTOWSKI, T. G.: *Life Cycle Energy Analysis of Fiber-Reinforced Composites*. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40 (2009), Nr. 8
- [20] VOCHOZKA, M. ; MAROUŠKOVÁ, A. ; VÁCHAL, J. ; STRAKOVÁ, J.: *Biochar Pricing Hampers Biochar Farming*. In: *Clean Technologies and Environmental Policy* 18 (2016), Nr. 4
- [21] SHEHAB, E. ; MEIRBEKOV, A. ; AMANTAYEVA, A. ; TOKBOLAT, S.: *Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research*. In: *Polymers* 15 (2022), Nr. 1
- [22] *Austria Weather Data : Land Area Weighted, MERRA-2*. URL https://www.renewables.ninja/country_downloads/AT/ninja_weather_country_AT_merra-2_land_area_weighted.csv – Überprüfungsdatum 2023-10-21
- [23] KANTOREK, M. ; JESIONEK, K. ; POLESEK-KARCZEWSKA, S. ; ZIÓŁKOWSKI, P. ; STAJNKE, M. ; BADUR, J.: *Thermal Utilization of Meat-and-Bone Meal Using the Rotary Kiln Pyrolyzer and the Fluidized Bed Boiler : The Performance of Pilot-Scale Installation*. In: *Renewable Energy* 164 (2021)
- [24] ZHANG, M. ; VOGELBACHER, M. ; HAGENMEYER, V. ; ALEKSANDROV, K. ; GEHRMANN, H.-J. ; MATTHES, J.: *3-D Refuse-Derived Fuel Particle Tracking-by-Detection Using a Plenoptic Camera System*. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71 (2022)
- [25] PICHLER, M. ; HADDADI, B. ; JORDAN, C. ; NOROUZI, H. ; HARASEK, M.: *Influence of Particle Residence Time Distribution on the Biomass Pyrolysis in a Rotary Kiln*. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 158 (2021)
- [26] LIU, X. Y. ; SPECHT, E.: *Mean Residence Time and Hold-Up of Solids in Rotary Kilns*. In: *Chemical Engineering Science* 61 (2006), Nr. 15
- [27] BENANTI, E. ; FREDA, C. ; LOREFICE, V. ; BRACCIO, G. ; SHARMA, V.: *Simulation of Olive Pits Pyrolysis in a Rotary Kiln Plant*. In: *Thermal Science* 15 (2011), Nr. 1
- [28] TRAUPMANN, A. ; GREIML, M. ; STEINEGGER, J. ; KÜHBERGER, L. ; KIENBERGER, T.: *Analysing Sector Coupling Technologies for Re-Purposing Coal-Fired Power Plants : Case study for the ENTSO-E grid*. In: *IET Energy Systems Integration* 5 (2023), Nr. 1
- [29] MOSER, S. ; PUSCHNIGG, S. ; RODIN, V.: *Designing the Heat Merit Order to Determine the Value of Industrial Waste Heat for District Heating Systems*. In: *Energy* 200 (2020)
- [30] CZAJCZYŃSKA, D. ; KRZYŻYŃSKA, R. ; JOUHARA, H. ; SPENCER, N.: *Use of Pyrolytic Gas from Waste Tire as a Fuel : A review*. In: *Energy* 134 (2017)
- [31] SPATH, P. L. ; MANN, M. K.: *Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System*. 2000
- [32] DO, K. H. ; CHOI, B.-I. ; HAN, Y.-S. ; KIM, T.: *Experimental Investigation on the Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of a Recuperator with Offset Strip Fins for a Micro Gas Turbine*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103 (2016)
- [33] SHAHIN, H. ; HASSANPOUR, S. ; SABOONCHI, A.: *Thermal Energy Analysis of a Lime Production Process : Rotary kiln, preheater and cooler*. In: *Energy Conversion and Management* 114 (2016)

8 ANHANG

In Tabelle 8-1 werden alle Parameter-Werte angegeben, die im Modell verändert werden können und durch welche die vier Szenarien definiert werden. Für jeden dieser Werte wird eine Kennnummer angegeben, anhand der im folgenden die Quellenangaben und Zusatzinformationen zugeordnet werden können.

Tabelle 8-1: Parameter-Werte für Szenarien

Kennnummer	Parameter	SSD	LSD – Sommer	LSD – Winter	LSD – Wartung
1	number_of_timesteps	1.008	1.488		
2	hourly_interval	10/60 h	30/60 h		
3	start_of_timesteps	01.04.2025	01.07.2025	01.01.2025	01.01.2025
4	solver	Gurobi			
5	solver_verbose	True			
6	mipgap	0,01			
7	rand_seed	0			
8	give_process_plan	pro Szenario: einmal True und einmal False			
9	t_out_is_t_env	False			
10	safe_model	True			
11	flow_hot_input_gas	1			
12	flow_district_heating	0	zufällig		
13	temperature_hot_input_gas	Umgebungs-temperatur	zufällig (ca. 600 °C)		Umgebungs-temperatur
14	temperature_environment	Temperaturaufzeichnungen Österreich 2019			
15	costs_electricity	prognostizierte Strompreise 2025			
16	costs_natural_gas	prognostizierte Gaspreise 2025			
17	rho_hot_input_gas	1,9767 kg/m ³			
18	cp_hot_input_gas	1,1554 kJ/(kg K)			
19	costs_cooling	0 €			
20	costs_district_heating	0 €	-0,0125 €		
21	costs_heat_out	0 €			
22	costs_pyrolysis_gas	0 €	negative prognostizierte Gaspreise 2025		0 €
23	costs_useable_gas	0 €			
24	nomVal_district_heating	0 kW	10.000 kW		
25	nomVal_electricity	1e9 kW			
26	nomVal_natural_gas	0 kW			
27	nomVal_temperature_transformers	1e9 kW			
28	nomVal_useable_gas	1e9 kW	8.000 kW		1e9 kW
29	nomVal_cooler	1e9 kW			
30	nomVal_el_heater	1e9 kW			
31	eta_nat_gas_burner	0,945			
32	eta_pyr_gas_burner	0,945			
33	eta_electric_heater	0,98			

Fortsetzung Tabelle 8-1: Parameter-Werte für Szenarien

Kenn- nummer	Parameter	SSD	LSD – Sommer	LSD – Winter	LSD – Wartung
34	del_p_pipeline	16.667 Pa			
35	del_p_cooler	10.000 Pa			
36	eta_blower	0,6			
37	eta_motor	0,85			
38	max_mass	500 kg/h	4.000 kg/h		
39	max_power	2.000 kW	17.000 kW		
40	residence_time	30 min	60 min		
41	base_consumption	5 kW	50 kW		
42	electrical_consumption	0,8 kW	10 kW		
43	working_hours	6:00 bis 18:00	0:00 bis 24:00		
44	working_days	Montag bis Samstag	Montag bis Sonntag		
45	min_up_time	6	8		
46	process_temperature _levels	[100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800] °C			
47	outlet_temperature_levels	[66, 124, 180, 233, 286, 337, 388, 438] °C			
48	process_plan	abhängig von "give_process_plan"			
49	coffee_capsules	8.000 kg	800.000 kg		
50	biomass	5.000 kg	350.000 kg		
51	circuit_boards	2.000 kg	100.000 kg		
52	FRC	3.000 kg	250.000 kg		

In Tabelle 8-2 werden die Quellenangaben und zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 8-1 aufgelisteten Werte angegeben. Für Werte, deren Kennnummer sich nicht in der folgenden Tabelle befindet, werden Parameter verwendet, die vom Projektpartner Seccon oder in Absprache mit dem Projektteam definiert wurden.

Tabelle 8-2: Quellenangabe und Zusatzinformationen zu Parameter-Werten

Kennnummer	Quellen	Zusatzinformationen
13	[22]	falls Umgebungstemperatur, dann +1e-5 damit Optimierer keinen Fehler ausgibt
14	[22]	Umgebungstemperatur Österreich von Jahr 2019
15	[28]	Negative Strompreise werden auf 0 € gesetzt, damit Stromeinkauf nicht gewinnbringend ist
16	[28]	
17	[7]	Tabelle 2.5: Mittlere Dichte für CO ₂
18	[7]	Tabelle 2.5: Mittlere Wärmekapazität für CO ₂ zwischen 0 °C und 1.200 °C
20	[29]	Nicht höher als Strompreis, damit Fernwärme nicht durch Strom bereitgestellt wird
22	[30]	Heizwert von Pyrolysegas (20-65 MJ/m ³) ungefähr gleich wie der von Erdgas (35-40 MJ/m ³)
24	[29]	Abschätzung anhand vom Wert im Paper (40 MW maximale Fernwärme-Einspeisung)
31	[7]	Beispiel 9.9 d)
32	[7]	Beispiel 9.9 d)
33	[13]	Kapitel 4.5 ("nearly 100%")
34	[31]	Kapitel 3.0: 0,00035 MPa/30 Meter Annahme: 1 km Rohrleitung
35	[32]	Schätzwert anhand Abbildung 6 (a)
36	[12]	Kapitel 8.5.6 Effektiver Wirkungsgrad für Pumpen zwischen 0,4 und 0,85
37	[13]	Tabelle 1: Energetischer Wirkungsgrad zwischen 80% und 87%
39	[23, 24, 33]	Schätzwerte anhand ähnlichen Anlagen
40	[25–27]	Schätzwerte anhand ähnlichen Prozessen
47	[9, 10]	$T^{0,91}$ für T in „process_temperature_levels“ annähernd gültig