

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

16/02/2022

## Projekttitel:

**SINFONIES – Sustainability IN Flexibly  
Operated reNewable Industrial Energy Systems**

Projektnummer: 871673

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

|                                    |                                                         |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Ausschreibung                      | 5. Ausschreibung Energieforschungsprogramm              |
| Projektstart                       | 01/05/2019                                              |
| Projektende                        | 30/09/2021                                              |
| Gesamtprojektdauer<br>(in Monaten) | 29 Monate                                               |
| ProjektnehmerIn<br>(Institution)   | TU Wien – Institut für Energietechnik und Thermodynamik |
| AnsprechpartnerIn                  | René Hofmann                                            |
| Postadresse                        | Getreidemarkt 9/BA                                      |
| Telefon                            | +43 1 58801 302327                                      |
| Fax                                | +43 1 58801 30299                                       |
| E-mail                             | rene.hofmann@tuwien.ac.at                               |
| Website                            | iet.tuwien.ac.at                                        |

# SINFONIES

Sustainability IN Flexibly Operated reNewable Industrial Energy Systems

### **AutorInnen:**

René Hofmann (TUW-IET)

Anton Beck (AIT)

Daniel Halmschlager (TUW-IET)

Sophie Knöttner (AIT)

Lukas Kasper (TUW-IET)

Christian Diendorfer (AIT)

Julian Unterluggauer (AIT)

## 1 Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                         |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Inhaltsverzeichnis.....                                                 | 4  |
| 2     | Einleitung .....                                                        | 5  |
| 2.1   | Zielsetzung .....                                                       | 5  |
| 2.2   | Schwerpunkte des Projektes.....                                         | 8  |
| 2.3   | Einordnung in das Programm .....                                        | 9  |
| 2.4   | Vorgehensweise im Projekt.....                                          | 9  |
| 3     | Inhaltliche Darstellung.....                                            | 12 |
| 3.1   | Datengrundlage.....                                                     | 12 |
| 3.1.1 | Anlagen .....                                                           | 12 |
| 3.1.2 | Energieträger .....                                                     | 14 |
| 3.1.3 | Umgebungsbedingungen .....                                              | 17 |
| 3.1.4 | Prozess .....                                                           | 18 |
| 3.2   | Mathematische Formulierung der individuellen Optimierungsprobleme ..... | 23 |
| 3.2.1 | Unit Commitment .....                                                   | 23 |
| 3.2.2 | Heat Exchanger Network Synthesis .....                                  | 25 |
| 3.2.3 | Scheduling .....                                                        | 27 |
| 3.3   | Kombiniertes Optimierungsproblem .....                                  | 27 |
| 3.3.1 | Schnittstellen der Teilmodelle .....                                    | 28 |
| 3.3.2 | Zusammenführung zum kombinierten Modell .....                           | 29 |
| 3.3.3 | Komplexität & Vereinfachung.....                                        | 30 |
| 3.4   | Evaluierung des kombinierten Ansatzes .....                             | 36 |
| 3.4.1 | Literaturbasierter Referenzprozess.....                                 | 37 |
| 3.4.2 | Industriebasierter Referenzprozess .....                                | 37 |
| 4     | Ergebnisse und Lessons-learned.....                                     | 38 |
| 4.1   | Ergebnisse .....                                                        | 38 |
| 4.1.1 | Literaturbasierter Referenzprozess.....                                 | 39 |
| 4.1.2 | Industriebasierter Referenzprozess .....                                | 45 |
| 4.2   | Lessons learned .....                                                   | 49 |
| 5     | Schlussfolgerungen.....                                                 | 50 |
| 6     | Ausblick und Empfehlungen.....                                          | 51 |
| 7     | Literaturverzeichnis .....                                              | 52 |
| 8     | Kontakt Daten .....                                                     | 54 |

## 2 Einleitung

### 2.1 Zielsetzung

#### Motivation

Im Jahr 2021 erleben wir eine Fortsetzung des Trends, dass die mediale, politische, aber auch gesellschaftliche Aufmerksamkeit für die Relevanz von Maßnahmen, die die Auswirkungen des Klimawandels abschwächen sollen, zunimmt. In einer Vielzahl von Gremien wird gefordert, den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase drastisch zu reduzieren, Nachhaltigkeit zu stärken und die Weichen für die Entwicklung von nachhaltigen Produkten und Prozessen richtig zu stellen. Vorstöße bzw. nennenswerte Zielsetzungen und Maßnahmen in unterschiedlichen Gremien und Regionen, die in den letzten Jahrzehnten nicht in vergleichbarem Ausmaß zu finden sind, sind beispielsweise:

- der **Europäische Green Deal**: Dabei handelt es sich um ein Konzept mit dem Ziel bis 2050 in Europa die Nettoemissionen von Treibhausgasen auf null zu reduzieren und der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Zur Umsetzung wurde von der Europäischen Kommission am 14.7.2021 das „Fit-for-55-Package“ beschlossen, mit bereits umgesetzten und geplanten Paketen und Rahmenwerken in den Bereichen Klima, Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Nahrung, Industrie, Transport und Finanzen. Zu den Rahmenwerken gehören bzw. sind beispielsweise geplant: das *Europäische Klimagesetz* [1], der *Europäische Klimapakt* [2] oder der *Green Deal Investitionsplan*, die *EU-Taxonomy* und der *Carbon Border Adjustment Mechanism*.
- Konkrete Beispiele für zukünftige Maßnahmen aus den letzten Monaten in Österreich sind bspw. der geplante CO<sub>2</sub>-Preis, der von 2022 bis 2025 von 30-55€/t<sub>CO2</sub> ansteigen soll, eine Zusammenfassung liefert u.a. Dolna-Gruber [3].

Das Bewusstsein für die Relevanz solcher Maßnahmen nimmt stetig zu. Immer öfter treten auch in Mitteleuropa gehäuft, vermeintlich sehr seltene (schädliche) Wetterphänomene auf. Einige, zum Zeitpunkt dieses Berichts unmittelbare Beispiele, die in einer Jahreszusammenfassung von der *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* angeführt werden, sind [4]:

- ungewöhnlich großer Hagel speziell im Juni 2021, wobei gleichzeitig einige Kilometer entfernt ein Tornado nahe der österreichischen Grenze in Südschechien entstand.
- Trockenperioden im Frühling und Herbst mit durchschnittlich 7% weniger Niederschlag im Vergleich zu einem durchschnittlichen Jahr, wobei periodenweise auch 40% weniger Niederschlag im Vergleich zum Durchschnitt auftrat
- Obwohl das Jahr 2021 nicht so extrem warm wie die Vorjahre war, gehört es zu den 25 wärmsten der 254-jährigen Messgeschichte, was einen deutlichen Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen in den letzten Jahren unterstreicht.

Darüber hinaus gab es im Jahr 2021 weitere extreme Wetterphänomene in Mitteleuropa, wie bspw. die Flutkatastrophe in Deutschland im Juli 2021. Wissenschaftlern zufolge sind solche Phänomene bedingt durch den Klimawandel jedoch in Zukunft häufiger zu erwarten [5].

Über diese Ereignisse und Entwicklungen hinaus ergibt sich durch die Relevanz des Erhalts der Wettbewerbsfähigkeit und Unabhängigkeit von erdöl- und erdgasfördernden Staaten ein weiterer, externer

Anreiz für Unternehmen Emissionen zu reduzieren und den Anteil Erneuerbarer zu steigern. Allein die Entwicklung von Erdgaspreisen, sowie in weiterer Folge von Strompreisen, die aktuell in Europa durch fossil befeuerte Erzeugungstechnologien bestimmt werden, seit Q2 2021, zeigt auf, dass eine unabhängige, erneuerbare Energieversorgung ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen sein kann.

Vor diesem Hintergrund ist jedoch festzuhalten, dass Änderungsmaßnahmen in produzierenden Unternehmen, oft mit Unsicherheit verbunden sind. Dabei ist unter anderem das Investitionsrisiko, aber auch die verlässliche Abdeckung des Energiebedarfs zu nennen.

Das Projekt SINFONIES setzt genau an diesem Punkt an. Es soll gelingen, mittels mathematischer Optimierung die Einbindung von erneuerbaren Energiequellen und anderen Effizienzmaßnahmen wie Speichern oder Wärmerückgewinnung kostenoptimal zu bewerten.

### Stand der Technik

Die technische Basis, die dem Projekt zugrunde liegt, ist eine mathematische Formulierung der industriellen Investitionsentscheidungen. Die Steigerung der Rechenleistung in den letzten Jahren hat es ermöglicht, immer komplexere Probleme computergestützt zu lösen. Ein Feld, das davon profitiert, sind kombinatorische Optimierungsprobleme. Insbesondere lineare und gemischt-ganzzahlig lineare Optimierungsprobleme können durch gesteigerte Rechenleistung und Weiterentwicklung bei den Lösungsalgorithmen in immer größerem Umfang gelöst werden.

Zu Projektbeginn wird mathematische Optimierung in vielfältiger Weise in Industrieprozessen eingesetzt. Beispiele dafür sind **Scheduling** (die optimale Produktionsplanung anhand verschiedener Ziele und Beschränkungen) und **Unit Commitment** (der optimale Betrieb von Energieversorgungsanlagen zur Deckung eines gegebenen Bedarfs, kurz UC). Daneben gibt es Ansätze zur Designoptimierung. Neben der optimalen Auslegung von Versorgungsanlagen ist hier insbesondere die Wärmeintegration im Prozess ein breit erforschtes Thema. Zentral sind dabei Ansätze für die **Auslegung von Wärmetauschernetzwerken** (Heat Exchanger Network Synthesis, kurz HENS). Für die genannten Beispiele gibt es bereits etablierte Formulierungen als gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme.

Im Industrieinsatz werden diese Optimierungsprobleme jedoch im Regelfall isoliert voneinander betrachtet und gelöst. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es zwar einige Beiträge, die verschiedene Probleme gemeinsam betrachten, dies passiert jedoch meist aus der Perspektive eines konkreten Anwendungsfalls.

Eine kombinierte Betrachtung von industriellen Produktionsprozessen, die diese verschiedenen Subprobleme der Energieversorgung sowie schwankende Energie- und Strompreise berücksichtigt, fehlt bislang. Insbesondere im Sinne einer kosteneffizienten Einbindung von erneuerbaren Energieträgern erscheint es jedoch wichtig, die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilproblemen in Zukunft zu berücksichtigen.

### Konkrete Zielsetzung

Die im Stand der Technik angeführten Optimierungsansätze liefern jeweils optimale Lösungen für die einzelnen Optimierungsprobleme (Unit Commitment, HENS, Scheduling). Durch intelligente Koppelung dieser Ansätze wurde erwartet zusätzliche Potentiale erschließen und Kosten reduzieren zu können. Aus diesem Grund wurden im Projekt SINFONIES methodische Ansätze entwickelt, die step-by-step

Investitionsmaßnahmen für den Übergang hin zu einem nachhaltigen, erneuerbaren Versorgungskonzept für industrielle Betriebe aufzeigen können und dabei sowohl physikalisch als auch ökonomisch realisierbar sind.

**Übergeordnetes Ziel:** Abbau von Hindernissen bei Investitionsentscheidungen zur Erhöhung des Anteils erneuerbaren Energieträger im Industrieunternehmen

Konkretisiert wird das übergeordnete Ziel bei der Aufteilung auf die folgenden **Subziele**:

1. Entwicklung des SINFONIES-Ansatzes, der es erlaubt für Industrieunternehmen Retrofitmaßnahmen hin zu einem erneuerbaren Versorgungssystem abzuleiten
2. Schnittstellen für SINFONIES-Ansatz im Hinblick auf Erweiterbarkeit der Optimierungsmodelle für zukünftige Entwicklungen wie z.B. Wasserstofftechnologie oder Elektromobilität
3. Lösung der kombinierten Optimierungsprobleme in vertretbarer Zeit (Zeithorizont je nach Problemgröße bis zu mehreren Tagen)
4. Liste notwendiger und optionaler Daten für den SINFONIES-Ansatz, um den Einsatz des SINFONIES-Ansatzes in potentiellen zukünftigen IF- und EE-Projekten zu vereinfachen
5. Verbesserungen (monetär, energetisch) durch den SINFONIES-Ansatz im Vergleich zu bestehenden Ansätzen unter Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen zu quantifizieren



Abbildung 1 - Darstellung der Kriterien zur Zielerreichung im SINFONIES-Ansatz

Ad 1) Es wurde ein innovativer, ganzheitlicher Ansatz (in der Folge SINFONIES-Ansatz genannt) entwickelt, der es ermöglicht entweder regelmäßig oder zu bestimmten Ereignissen (z.B. Ende der Nutzungsdauer bestehender Versorgungsanlagen, Änderung der Produktionsanforderungen, ...) für Industrieunternehmen kosteneffiziente Maßnahmen für einen Übergang zu einem erneuerbaren Energiesystem abzuleiten. Dazu wurden bestehende Formulierungen zur Lösung von Optimierungsproblemen gekoppelt und erweitert.

Ad 2) Um eine einfache Erweiterbarkeit des SINFONIES-Ansatzes um neue Technologien gewährleisten zu können, mussten Schnittstellen zwischen den einzelnen Formulierungen (Scheduling, HENS, UC; Versorgungskomponenten) identifiziert/definiert werden.

Ad 3) Damit der SINFONIES-Ansatz sinnvoll eingesetzt werden kann, musste die Komplexität der Optimierungsprobleme bezüglich der verfügbaren Rechenkapazitäten angepasst und durch geeignete Vereinfachungen reduziert werden.

Ad 4) Der SINFONIES-Ansatz wird künftig Unternehmen helfen ihr Energiesystem nachhaltig zu verbessern. Dafür ist es notwendig die benötigte Datengrundlage klar zu definieren. Dies zeigt für Unternehmen auch im Hinblick auf die fortlaufende Digitalisierung der industriellen Prozesse auf, welche Daten erhoben und systematisch aufbereitet werden sollen.

Ad 5) Um das Potential des SINFONIES-Ansatzes zu bestimmen, werden die Kriterien aus Abbildung 1 zur Kontrolle der Zielerreichung herangezogen. Qualitativ werden Energieeffizienz, Kosteneffizienz sowie der Anteil erneuerbarer Energieträger im System erhöht. Eine quantitative Bewertung wurde anhand eines Referenzprozesses durchgeführt.

**Nichtziel** dieses Projekts war die Entwicklung von *neuen* Lösungsalgorithmen (z.B. MILP-Solver). Es sollten vielmehr bestehende Formulierungen für Optimierungsprobleme verknüpft werden, um bessere Ergebnisse zu erhalten. Ebenso wurden Technologien, die eine grundlegende Änderung des Prozesses bedingen – wie z.B. eine vollständige Prozessumstellung durch Elektrifizierung oder Energieumwandlungs- und -speichertechnologien für Wasserstoff – im Rahmen dieses Projektes nicht berücksichtigt.

## 2.2 Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte im Projekt SINFONIES liegen auf mehreren Ebenen. Grundsätzliches Ziel der zu erarbeitenden Methoden ist die Unterstützung von **Investitionsentscheidungen**. Dies geschieht durch die Identifikation eines **kostenoptimalen Energieversorgungssystems** für industrielle Produktionsprozesse. Eine wichtige Voraussetzung, die im Projekt durchgehend berücksichtigt wird, ist eine **modulare Entwicklung**. Die erarbeiteten Modelle sollen nicht nur auf einen Prozess maßgeschneidert sein, sondern flexibel anwend- und anpassbar gestaltet werden. Der Ansatz soll nicht nur für Greenfield-Berechnungen eingesetzt werden können, sondern auch **Retrofit-Szenarien** unterstützen. Zusätzlich soll die Abbildung in verschiedenen Detaillierungsgraden (sowohl bezogen auf die zeitliche Auflösung als auch auf den Umfang der Optimierung) ermöglicht werden und Klarheit über die dementsprechend notwendigen Daten geschaffen werden.

Ein zentraler Fokus des Projekts lag auch darin, dass das Modell kosteneffiziente Wege für einen Übergang zur Versorgung durch **erneuerbare Energieträger** aufzeigen soll und so zur Dekarbonisierung von Industrieprozessen beitragen kann. Daher wurden eher Prozesse mit niedrigeren Temperaturniveaus betrachtet, da die möglichen erneuerbaren Versorgungsoptionen für Hochtemperaturprozesse ohne direkten Eingriff in den Prozess beschränkt sind.

### 2.3 Einordnung in das Programm

Im Projekt **SINFONIES** wurden im Rahmen der Entwicklung von **Methoden und Anwendung von Optimierungsalgorithmen für die Abstimmung des Energiebedarfs von industriellen Anlagen und deren Energieversorgung aus fluktuierenden Erneuerbaren** folgende Ausschreibungsziele der 5. Ausschreibung der Energieforschung adressiert:

#### **Adressierte Grand Challenges** (entsprechend dem Wortlaut in der Ausschreibung)

##### **Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen**

Forschung, Technologieentwicklung und Innovation können maßgeblich zur Lösung der aktuellen großen gesellschaftlichen Herausforderungen beitragen: Klimaschutz und Ressourceneffizienz, wirtschaftliche Entwicklung und Wohlstand, sozialer Zusammenhalt, Sicherheit, Gesundheit und demografischer Wandel.

##### **Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich**

Eine erfolgreiche Standortentwicklung und die Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit sind wichtige Ziele für die Wirtschaftsperspektive Österreichs.

Das Projekt **SINFONIES** trägt durch das Entwickeln einer Methode, die Unternehmen bei der Umstellung auf kostenoptimale, erneuerbare Energieversorgungslösungen unterstützen soll, zu folgenden Punkten bei: Klimaschutz, Ressourceneffizienz, Unterstützung für wettbewerbsfähige Maßnahme, Entwickeln von innovativen Energiebereitstellungskonzepten für österreichische Unternehmen.

Dieses Projekt wurde als Grundlagenforschungsprojekt durchgeführt. Ziel war es die technologische Reife der gegenständlichen Methode (Kombination von unterschiedlichen Optimierungsmethoden) von Technology-Readiness-Level (TRL)<sup>1</sup> 1 auf TRL 2-3 anzuheben. Weitere Entwicklungen, wie die Umsetzung und Maßnahmenableitung für reale industrielle Standorte oder das Aufsetzen eines umfassenden Tools (Software) sind über das Projektende hinaus konkrete Anknüpfungspunkte zur weiteren Erhöhung des TRLs.

### 2.4 Vorgehensweise im Projekt

Für die vorgestellten Ziele und Schwerpunkte fehlten zu Projektbeginn die dazu notwendigen methodischen Ansätze. Diese sollte im Rahmen des Projekts SINFONIES erarbeitet werden. Als Rahmen für die Erarbeitung wurden folgende Forschungsfragen definiert:

#### **Forschungsfragen:**

- Wie sieht eine nachhaltige Energieversorgung für konkrete Industrieunternehmen aus?
- Wie kann ein ökonomischer Übergang dorthin systematisch ermittelt werden?

<sup>1</sup> Gemäß Europäischer Kommission (Link: [LexUriServ.do.europa.eu](http://LexUriServ.do.europa.eu)): TRL 1 = Grundprinzip beobachtet; TRL 2 = Konzept formuliert; TRL 3 = Experimenteller Nachweis

- Welche Formulierungen von Optimierungsproblemen zur Effizienzsteigerung und Integration erneuerbarer Technologien lassen sich koppeln?
- Welche Schnittstellen sind dafür nötig?
- Welche Potentiale, die durch diese Koppelung frei werden, können aufgezeigt werden?
- Welche Modellvereinfachungen sind für die Kopplung von bestehenden Formulierungen nötig/zulässig/möglich?

Im Verlauf des Projekts wurden die im Stand der Technik vorgestellten **Optimierungsprobleme** (Scheduling, HENS, UC) **implementiert**, im Umfang **erweitert** (z.B. Integration von erneuerbaren Versorgungskomponenten, Einsatz in Retrofit-Szenarios) und schließlich **kombiniert**. Durch diese Kombination wurden anhand von Referenzprozessen schrittweise Maßnahmen abgeleitet, die kurz- oder mittelfristig ökonomisch sinnvoll umsetzbar sind.

Die energierelevanten Bereiche eines Industriebetriebes wurden dazu in drei Ebenen betrachtet. Dazu gehören:

- I. Produktionsprozess mit allen Verbrauchern woraus sich der Energiebedarf ergibt
- II. Lokales Energieversorgungssystem (innerbetriebliche Versorgungsebene) zur Deckung des Energiebedarfs
- III. Netz-Ebene zur Deckung des Energiebedarfs

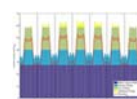
In bisherigen Optimierungsansätzen wurde meist nur **eine dieser Ebenen betrachtet**. Die Schnittstellen zu anderen Ebenen wurden oft als feste Randbedingungen berücksichtigt, wodurch **Synergien nicht optimal genutzt** wurden und **Ergebnisse nicht immer realistisch/realisierbar** waren (z.B. technische Restriktionen werden unzureichend berücksichtigt).

Für **HENS** wurden beispielsweise meist folgenden Annahmen getroffen:

- Versorgung kann beliebige Laständerungsrampen erfüllen
- Fixe spezifische Energiekosten
- Vernachlässigung von Schwankungen von Wirkungsgraden bei Teillastbetrieb der Energieversorgungsanlagen und damit verbundene Mehrkosten



Im Gegensatz dazu wird beim **Unit-Commitment**-Problem ein optimaler Betrieb für ein vorgegebenes lokales Energieversorgungssystem gesucht. Die Integration von Energieversorgungskomponenten ist üblicherweise nicht möglich. Der Energiebedarf ist außerdem meist vordefiniert (kein Scheduling).



Durch den entwickelten kombinierten Ansatz werden alle drei energierelevanten Ebenen eines Industrieprozesses integriert betrachtet und damit bisher ungenutzte Synergien aufgedeckt und genutzt. Im Projektablauf teilte sich die Erarbeitung des Ansatzes auf sechs Arbeitspakete auf. In Abbildung 2 ist dargestellt, wie die einzelnen Teile des Projekts zusammenspielen, bzw. welche Inhalte in welchem Arbeitspaket erarbeitet wurden. Im AP2 wurden Prozessdaten und Parameter identifiziert und letztendlich Referenzprozesse definiert, auf die in weiterer Folge die Optimierungsansätze angewendet wurden. Kern

des AP3 war die Implementierung der einzelnen Teilmodelle Scheduling, HENS und UC unter Berücksichtigung der Modularität und geplanten Erweiterbarkeit. Bereits dabei wurden zentrale Aspekte des Projekts, wie die Einbindung erneuerbarer Versorgungsanlagen und die optimale Dimensionierung von Versorgungsanlageninvestitionen berücksichtigt. Im AP4 wurden Schnittstellen zwischen den Teilmodellen identifiziert und die Modelle verknüpft. Wichtige Schritte waren dabei Anpassungen bzw. Erweiterungen an den Teilmodellen, um die Verknüpfung zu ermöglichen (z.B. „Scheduling Extension“ in HENS, wie beschrieben in [6], oder die Übergabe zwischen Wärmerückgewinnung und Energiebereitstellung auf vordefinierten Temperaturniveaus) und Vereinfachungen, um die Problemkomplexität gering zu halten.

Das AP5 widmete sich dann der Erprobung der entwickelten Modelle. Auf Basis der Referenzprozesse wurden die getrennten Formulierungen und der kombinierte Ansatz eingesetzt und gegenübergestellt. Begleitend dazu liefen AP1 für das Projektmanagement und AP6 für die Dissemination der gewonnenen Erkenntnisse.

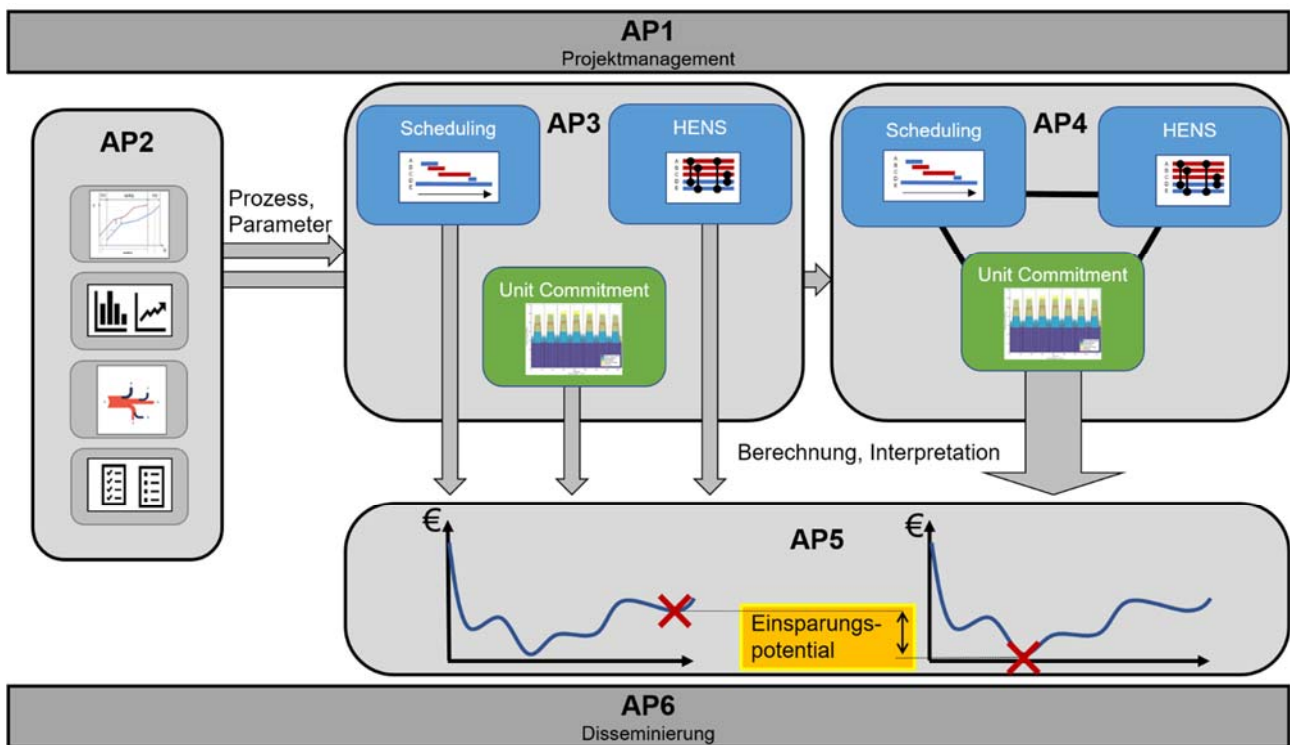


Abbildung 2 – Inhaltliche Schnittstellen der Arbeitspakete im Projekt SINFONIES

## 3 Inhaltliche Darstellung

In den folgenden Abschnitten werden die für das Gesamtergebnis notwendigen Projektoutputs einzeln dargestellt.

### 3.1 Datengrundlage

#### 3.1.1 Anlagen

##### Beschreibung der Anlagen (wirtschaftlich/technisch)

Um möglichst vielfältige Versorgungssysteme abbilden zu können, wurden relevanten Daten für verschiedene Versorgungsanlagen ermittelt. Diese inkludieren typische technische Spezifikationen und Betriebsbeschränkungen sowie anzusetzende Investitionskosten.

Im Folgenden sind Anlagentypen zusammengefasst aufgelistet, wie sie für die betrachteten Referenzprozesse in Frage kommen. Konkret sind das Anlagengrößen im Bereich bis 5 MW<sub>th</sub> für Erzeugungsanlagen und bis 50 MWh für Speicher, wobei für den industriebasierten Referenzprozess die Beschränkungen für Anlagengrößen etwas kleiner gewählt wurden. Details dazu sind in der Publikation [6] dargestellt.

Zur ersten Gruppe der grundsätzlich mögliche Versorgungsanlagen zählen reine wärmebereitstellende Anlagen, wie **gas-** oder **biomassebefeuerte Dampferzeuger** und **Elektrodenheizkessel**.

Diese nutzen einen Energieträger (Brennstoff oder Strom) ausschließlich, um Wärme (meist in Form von Dampf) bereitzustellen. Befeuerte Dampferzeuger sind konstruktionsbedingt im Betrieb unflexibel. Neben einer minimalen Teillast (typisch im Bereich 30-40% der Nennleistung) sind auch die Laständerungsgeschwindigkeiten beschränkt. Gasbefeuerte Dampferzeuger in der genannten Größenordnung können ihre Last im Regelfall innerhalb einiger Minuten ändern (typisch sind etwa 10% Laständerung pro Minute), während biomassebefeuerte Kessel deutlich langsamer sind (typisch etwa 1% Laständerung pro Minute). Elektrodenheizkessel sind dagegen sehr flexibel im Betrieb und können ihre Last innerhalb kürzester Zeit zwischen 0 und 100% der Nennleistung variieren [7].

Neben den reinen Wärmeerzeugern gibt es auch Anlagen zur **Kraft-Wärme-Kopplung**. In der betrachteten Größenordnung sind das typischerweise **Blockheizkraftwerke** mit Gasmotoren, die sowohl Strom als auch Wärme bereitstellen. Auch diese haben Beschränkungen der minimalen Teillast und der maximalen Laständerungsgeschwindigkeit ähnlich den gasbefeueren Dampferzeugern.

Eine vergleichsweise jüngere Alternative zur Wärmebereitstellung sind **Wärmepumpen**. Diese wurden im Projekt in verschiedenen Ausprägungen berücksichtigt. Einerseits können bestehende Niedertemperaturwärmequellen mit einer **Hochtemperaturwärmepumpe** auf besser nutzbare Temperaturniveaus gehoben werden, andererseits kann Wärme aus der Umgebung genutzt werden, wie z.B. Erwärme durch **Geothermiewärmepumpen** oder einfach die Außenluft durch **Umgebungsluftwärmepumpen**. Alle betrachteten Wärmepumpen haben gemeinsam, dass diese zwar durch eine minimale Teillast (typisch im Bereich 20%-50%) beschränkt sind, ihre Last aber relativ schnell ändern können (typisch 50% pro Minute). Unterschiede gibt es in den Investitionskosten: (zum Teil mehrstufige) Hochtemperaturwärmepumpen sind teurer in der Anschaffung, für Geothermie sind auch die Kosten der Tiefenbohrung zu berücksichtigen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Wärmepumpen die

eingesetzte elektrische Energie umso effizienter nutzen können, je geringer der notwendige Temperaturhub ist.

Bei **Sonnenkollektoren** gibt es zwei grundlegende Typen: **Photovoltaik** wandelt Sonnenenergie in elektrischen Strom um, während **Solarthermie** Wärme bereitstellt. Die Investitionskosten je Fläche liegen für beide mittlerweile in ähnlichen Größenordnungen. Solarthermie hat zwar einen mehrfach höheren maximalen Wirkungsgrad von oft über 80%, dieser wird aber bei hohen Temperaturunterschieden und/oder niedriger Einstrahlungsintensität durch Verluste stark reduziert. Photovoltaik hat einen deutlich geringeren Wirkungsgrad (bei modernen Modulen etwas über 20%), dieser wird aber durch die Umgebungsbedingungen weniger stark eingeschränkt. Außerdem ist Strom als Energieträger in weiterer Folge flexibler einsetzbar (z.B. in Kombination mit einer Wärmepumpe).

Bei den **thermischen Speichern** wurden in den Referenzprozessen wasserbasierte Speicher vorgesehen. Für niedrige Temperaturen unter 100°C kommen einfache **Heißwasserspeicher** in Frage, darüber können **druckbeaufschlagte Heißwasserspeicher** eine Alternative sein. Für deutlich höhere Temperaturniveaus bieten sich dann **Ruths-Dampfspeicher** an. Generell kann gesagt werden, dass mit höheren Temperaturen durch höheren konstruktiven Aufwand die Investitionskosten steigen und auch die Speicherverluste zunehmen.

**Elektrische Speicher** in Form von Batteriespeichern sind in der Energiebereitstellung für Industrieprozesse noch eine vergleichsweise neue Erscheinung. Als Besonderheit im betrachteten Referenzprozess ist dabei anzumerken, dass die Investitionskosten sowohl mit der Speicherkapazität als auch mit der maximalen Lade- bzw. Entladeleistung steigen.

Die Investitionskosten für die Anlagen können im Einzelfall stark schwanken, wobei die Gründe dafür vielfältig sind. Neben den konkreten Anforderungen und Spezifikationen an die Anlagen und verschiedenen angenommenen Umfängen, tragen auch wechselnde Marktverhältnisse und lokale Gegebenheiten zu den Abweichungen bei. Für tatsächliche Investitionsentscheidungen sind für den jeweiligen Anwender passende Kosten anzusetzen.

Nichtsdestotrotz sind Richtwerte für Kosten ein sehr hilfreiches Mittel für erste Abschätzungen.

Für den literaturbasierten Referenzprozess wurden möglichst allgemeine Investitionskosten für eine Reihe von Versorgungsanlagen (Energieversorgung und -speicherung) ermittelt und in Halmschlager et al. [6] publiziert. Für den angewandten linearen Optimierungsansatz war es auch notwendig, dass diese Investitionskosten in Form eines linearen Modells abgebildet werden. Ein Überblick über die gewählten Kostenmodelle ist in Tabelle 1 dargestellt. Der fixe Anteil der Investitionskosten ist dabei nicht als echte „Fixkosten“ zu verstehen, sondern dient im linearen Modell dazu, die spezifischen Kosten von der installierten Anlagengröße abhängig zu machen. Damit kostet z.B. ein biomassebefuerter Dampferzeuger mit 1 MW<sub>th</sub> 400.000 €/MW<sub>th</sub>, eine Anlage mit 5 MW<sub>th</sub> jedoch nur 320.000 €/MW<sub>th</sub>.

Für den industriebasierten Referenzprozess wurden diese Werte teilweise übernommen, teilweise aber auch der konkreten lokalen Situation angepasst. Details sind in Beck et al. [8] publiziert.

Tabelle 1 – Überblick über die im literaturbasierten Referenzprozess berücksichtigen Anlageninvestitionskosten

| Anlage                          | Referenzgröße    | Investitionskosten                     |
|---------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| Biomassebefuerter Dampferzeuger | MW <sub>th</sub> | 100.000 € + 300.000 €/MW <sub>th</sub> |
| Elektrodenheizkessel            | MW <sub>th</sub> | 100.000 €/MW <sub>th</sub>             |

|                                                      |                                      |                                                                                |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| (Bio)gasbefeuerte KWK-Anlage<br>(Blockheizkraftwerk) | MW <sub>th</sub>                     | 100.000 € + 720.000 €/MW <sub>th</sub>                                         |
| Hochtemperaturwärmepumpe                             | MW <sub>th</sub>                     | 30.000 € + 564.000 €/MW <sub>th</sub>                                          |
| Geothermiewärmepumpe                                 | MW <sub>th</sub>                     | 25.000 € + 1.120.000 €/MW <sub>th</sub>                                        |
| Umgebungsluftwärmepumpe                              | MW <sub>th</sub>                     | 35.000 € + 550.000 €/MW <sub>th</sub>                                          |
| Photovoltaik                                         | m <sup>2</sup>                       | 5.000 € + 460 €/m <sup>2</sup>                                                 |
| Solarthermie                                         | m <sup>2</sup>                       | 20.000 € + 315 €/m <sup>2</sup>                                                |
| Ruths-Dampfspeicher                                  | MWh <sub>th</sub>                    | 20.000 € + 70.000 €/MW <sub>th</sub>                                           |
| Druckbeaufschlagter<br>Wasserspeicher                | MWh <sub>th</sub>                    | 10.000 € + 10.000 €/MW <sub>th</sub>                                           |
| Warmwasserspeicher                                   | MWh <sub>th</sub>                    | 2.500 € + 4.500 €/MW <sub>th</sub> oder<br>28.000 € + 1.200 €/MW <sub>th</sub> |
| Batteriespeicher                                     | MWh <sub>el</sub> & MW <sub>el</sub> | 2.000 € + 327.000 €/MWh <sub>el</sub><br>+ 272.000 €/MW <sub>el</sub>          |

## Szenarien Investitionspreise (allgemein)

Für die Ableitung von zukünftigen Investitionsschritten sind nicht nur die aktuellen, sondern auch zukünftige Preise und Anlagenparameter von großer Bedeutung. Aus Sicht des Projektkonsortiums ist davon auszugehen, dass die Investitionskosten für ausgereifte Anlagen zumindest im Rahmen der allgemeinen Inflation steigen werden. Für neuere Technologien (insbesondere Photovoltaik, Batteriespeicher und Wärmepumpen) werden jedoch durch die größere Verbreitung und weitere technologische Verbesserungen deutliche Kostensenkungen bei gleichzeitig besseren Wirkungsgraden erwartet. Dadurch werden diese im Vergleich zu konventionellen Technologien in Zukunft noch deutlich attraktiver werden.

### 3.1.2 Energieträger

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die im Projekt berücksichtigten Energieträger und deren Eigenschaften. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3 in welcher Größenordnung die Kostenanteile für die kostenbehafteten Energieträger im literaturbasierten Referenzprozess gewählt wurden. Eine detaillierte Aufschlüsselung wie sich diese Werte ergeben ist in unserer Publikation Halmschlager et al. [6] angeführt.

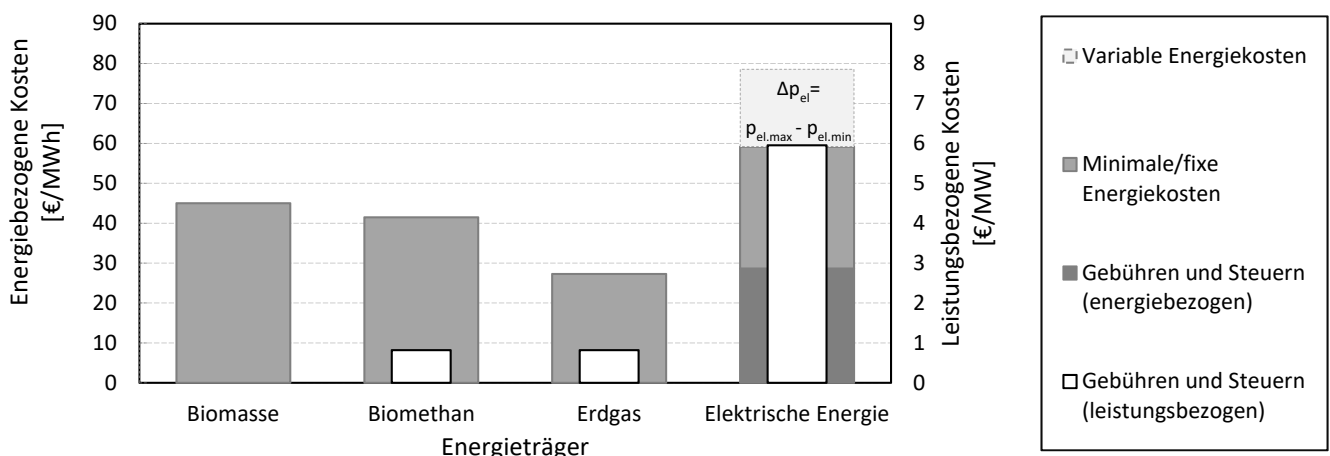


Abbildung 3 – Überblick über die verschiedenen Kostenanteile der kostenpflichtigen Energieträger für alle Rechnungen des literaturbasierten Referenzprozesses

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 2 – Überblick über die im Projekt berücksichtigten Energieträger und Kostenanteile

| Berücksichtigte Energieträger | Annahmen zur Verfügbarkeit                                                    | Energiebezogene Kosten (OPEX) und Kostenanteile                                                                                                                                                                                                           | Leistungsbezogene Kosten (OPEX) und Kostenanteile                                                   | Anmerkung                                                                           |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Elektrische Energie</b>    | Unlimitiert oder. limitiert durch Netzanschluss-Leistung, Preise fluktuierend | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Energiepreis (fluktuierend, Basis: Strombörse Österreich EXAA 2019)</li> <li>Netznutzungs- und Netzverlustentgelt</li> <li>Ökostromförderung (für Energie und Verluste)</li> <li>Elektrizitätsabgabe</li> </ul> | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Netznutzungsentgelt</li> <li>Ökostromförderung</li> </ul> | Keine Berücksichtigung von Ökostrompauschale (fixer Betrag/Jahr) und Mehrwertsteuer |
| <b>Erdgas</b>                 | Nicht limitiert                                                               | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Energiepreis (Basis: CEGH 2019)</li> <li>Netznutzungsentgelt</li> <li>Erdgassteuer</li> <li>CO<sub>2</sub> Steuer</li> </ul>                                                                                    | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Netznutzungsentgelt</li> </ul>                            | Keine Berücksichtigung von Mehrwertsteuer                                           |
| <b>Biomethan</b>              | Nicht limitiert (da vergleichsweise kleine Jahresverbräuche angenommen)       | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Energiepreis (Basis: abgeschätzt)</li> <li>Netznutzungsentgelt</li> </ul>                                                                                                                                       | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Netznutzungsentgelt</li> </ul>                            | ---                                                                                 |
| <b>Biomasse</b>               | Nicht limitiert                                                               | Ja <ul style="list-style-type: none"> <li>Energiepreis (Basis: abgeschätzt)</li> </ul>                                                                                                                                                                    | Nein                                                                                                | ---                                                                                 |
| <b>Umgebungs-luft</b>         | Zeitliches Temperatur-Profil limitiert verfügbare Energie                     | Nein                                                                                                                                                                                                                                                      | Nein                                                                                                | ---                                                                                 |
| <b>Geothermie</b>             | Fixe Temperatur vorgegeben                                                    | Nein                                                                                                                                                                                                                                                      | Nein                                                                                                | ---                                                                                 |
| <b>Sonnen-einstrahlung</b>    | Zeitliches Einstrahlungs-Profil limitiert verfügbare Energie                  | Nein                                                                                                                                                                                                                                                      | Nein                                                                                                | ---                                                                                 |
| <b>Industrielle Abwärme</b>   | Durch Prozess vorgegeben                                                      | Nein                                                                                                                                                                                                                                                      | Nein                                                                                                | ---                                                                                 |

Wie in Tabelle 2 bzw. in Abbildung 3 bereits veranschaulicht, sind die reinen Energiekosten für elektrischen Strom in dieser Arbeit nicht als konstanter Wert angenommen, sondern mit einem Verlauf, der repräsentativ für elektrische Kurzfrismärkte, in diesem Fall der Day-Ahead Markt, wo Stundenprodukte-Gebote am Vortag der Lieferung im Rahmen eines Clearingverfahrens Zuschläge erhalten können. Ein solcher Verlauf, der auch im Projekt angenommen wurde, ist in Abbildung 4 dargestellt.

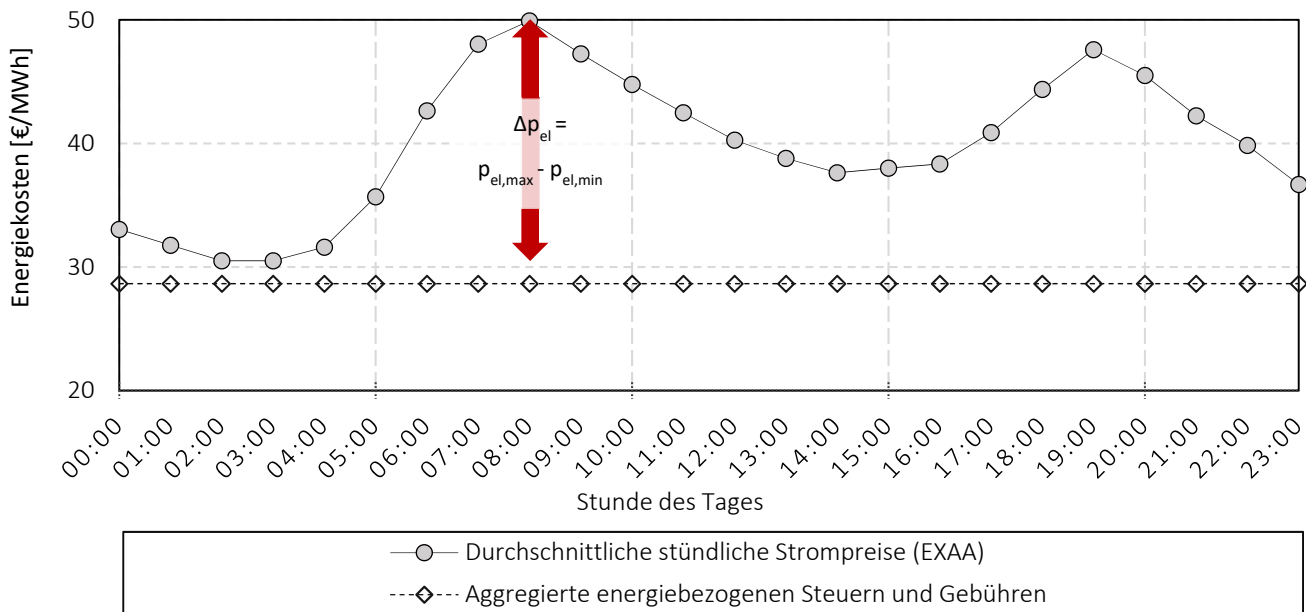


Abbildung 4 – Durchschnittlicher, stündlicher Strombedarf angewandt im Literaturbasierten Referenzprozess (Datengrundlage hier, aber auch für den Industriebasierten Referenzprozess und in Halmschlager et al. [6]: historische Daten Energy Exchange Austria für eine Aprilwoche in 2019 [9])

## Szenarien Energiekosten

Die zuvor beschriebenen Kosten wurden vor allem zum Testen der entwickelten Optimierungsformulierung, für einzelne aber auch kombiniert gelöste Problemstellungen herangezogen. Für die Ableitung von Investitionspfaden war ein Blick in die Zukunft mit entsprechenden Prognosen für Zertifikats- und Energieträgerpreise erforderlich. Dazu wurden Prognosewerte berücksichtigt, die von Energy Brainpool 2019 veröffentlicht wurden und in Abbildung 5 visualisiert sind [10]. Allerdings können auch andere Entwicklungen stattfinden, wie ein Vergleich vom Forecast von Energy Brainpool aus dem Jahr 2019 für 2020-2050 in  $\text{€}_{2018}$  mit tatsächlichen Werten für diese drei Größen im November 2021, siehe Abbildung 6. Um diesen Änderungen und laufenden Entwicklungen gerecht zu werden, veröffentlicht Energy Brainpool in der Regel jährlich neue Prognosen. Das neueste Update wurde im Juni 2021 veröffentlicht und berücksichtigt bereits den in Abbildung 6 adressierten Anstieg für alle drei Faktoren [11]. Da die Laufzeit des Projekts aber im Zeitraum von 2019 bis 2021 lag, wurden in den Berechnungen im Rahmen des Projekts die Prognosedaten, die 2019 von Energy Brainpool veröffentlicht wurden, herangezogen. Neuere Daten konnten nicht mehr berücksichtigt werden.

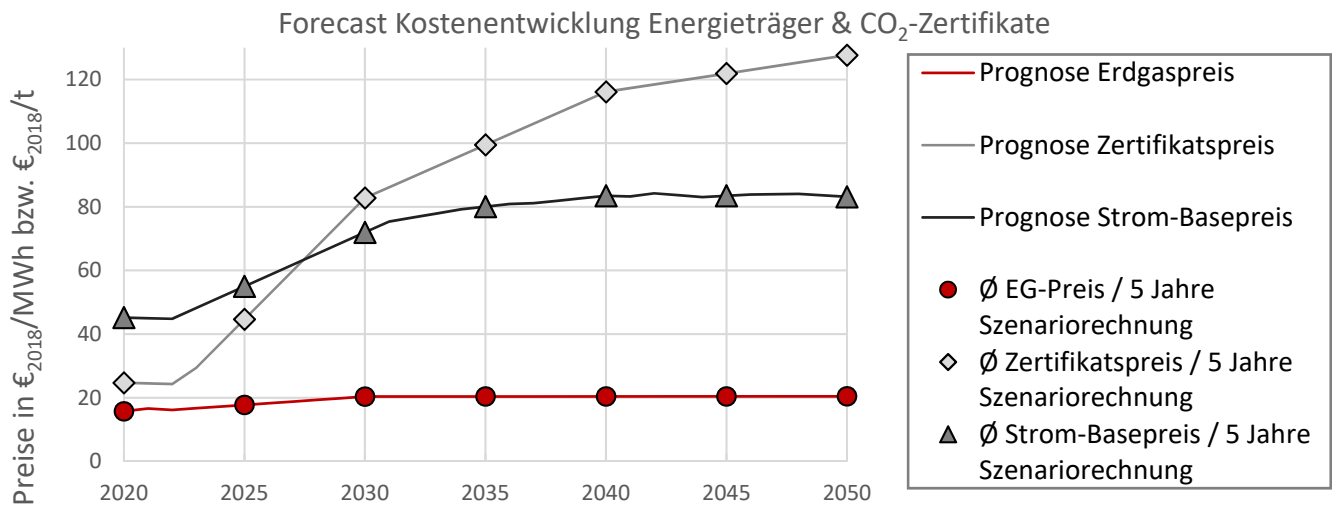


Abbildung 5 – Prognosen für Gas- und Strom- sowie Zertifikatspreise (durchgezogene Linien) gemäß [10]. Die Markierungen entsprechen den angenommenen Werten in der punktuellen Szenarienrechnung für jeweils einen Zeitraum von fünf Jahren, z.B. Punkt bei 2020 für [2020; 2025]

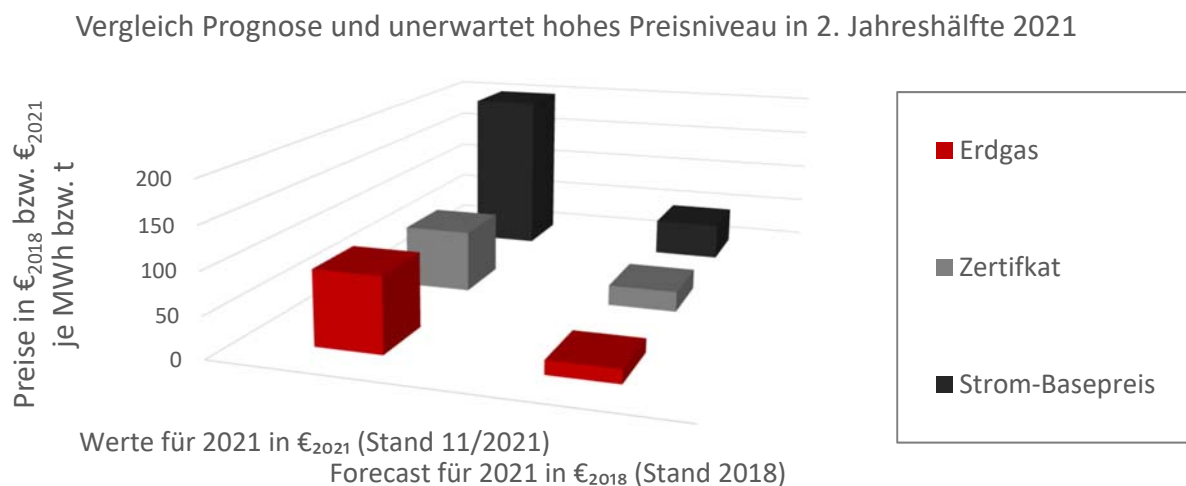


Abbildung 6 – Vergleich des Forecasts für 2021 in €<sub>2018</sub> von Energy Brainpool mit tatsächlichen Daten für November 2021 in €<sub>2021</sub> (Quellen: Homepage Central European Gas Hub (CEGH) [12] und European Energy Exchange (EEX) für Spotmarkt-DA-Preise und Zertifikatspreise [13,14])

### 3.1.3 Umgebungsbedingungen

Zur Berechnung von Versorgungsanlagen, deren Funktionsweise von Umwelteinflüssen abhängt, sind entsprechende Daten notwendig. Dies betrifft insbesondere die solare Einstrahlung für Photovoltaik und Solarthermie, sowie die Umgebungstemperatur für Umgebungsluftwärmepumpen.

Für den literaturbasierten Referenzprozess wurden diese Umgebungsbedingungen aus den veröffentlichten Messwerten der Wetterwarte der Universität für Bodenkultur Wien [15] ermittelt. Um repräsentative Werte für einen „Simulationstag“ zu erhalten, wurden jeweils für eine Woche (Mo-Fr) die Werte stundenweise gemittelt (so wurden z.B. alle Messwerte zwischen 08 und 09 Uhr aus der Woche zu einem 08-09-Uhr-Wert zusammengeführt).

Für den literaturbasierten Referenzprozess wurde dabei konkret die Werte aus der Kalenderwoche 14 des Jahres 2019 (1. bis 5. April) herangezogen.

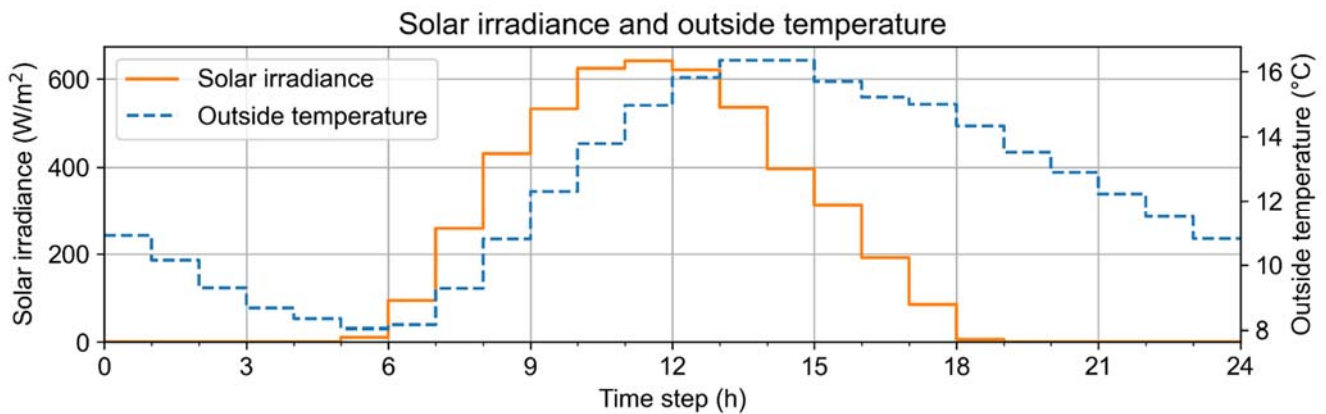


Abbildung 7 – Solare Einstrahlung und Umgebungstemperatur für den Referenztag im literaturbasierten Referenzprozess  
(Quelle: Halmschlager et al.[6])

Im industriebasierten Referenzprozess wurden die Werte analog ermittelt, jedoch der Zeitraum entsprechend der jeweiligen Saison gewählt.

### 3.1.4 Prozess

Zur Erprobung des Optimierungsansatzes war es notwendig, einen Referenzprozess zu definieren. Das Projektkonsortium hat sich hierbei für eine Kombination aus zwei verschiedenen Referenzprozessen („literaturbasiert“ und „industriebasiert“) entschieden. Hintergrund dafür ist die Feststellung, dass ein einzelner Prozess sehr komplex sein müsste, um alle für das Projekt relevanten Aspekte abzubilden. Das wiederum würde zu prohibitiv langen Rechenzeiten und reduzierter Interpretierbarkeit der Ergebnisse führen. Mit der Wahl von zwei verschiedenen Prozessen konnte dieses Problem umgangen werden und gleichzeitig die flexible Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes gezeigt werden.

Der literaturbasierte Referenzprozess basiert, wie der Name sagt, im Kern auf einem klassischen Literaturbeispiel für die Wärmeintegration und wurde im Rahmen des Projekts um die Versorgungsseite und Flexibilität in der zeitlichen Abfolge der Prozessschritte erweitert. Dieser Prozess stellt durch die hohe Anzahl an Prozessströmen hohe Ansprüche an das Wärmeübertragernetzwerk und zeigt durch die Vielzahl an möglichen Versorgungsanlagen die Flexibilität des Ansatzes. Durch den kurzen Simulationshorizont ist die Anwendbarkeit auf tatsächliche Industrieanlagen aber limitiert.

Der industriebasierte Referenzprozess ist an eine real existierende Industrieanlage (Brauprozess) angelehnt und beinhaltet insbesondere einen längeren Simulationshorizont, saisonale Effekte und andere mittelfristige Aspekte des Energiesystems (z.B. Speicherung über längere Zeiträume).

Beide Prozesse werden im Folgenden detaillierter erklärt.

### Literaturbasierter Referenzprozess

Der literaturbasierte Referenzprozess ist im Detail in Halmschlager et al. [6] beschrieben und wird im Folgenden verkürzt dargestellt. Als Kern für den Prozess dient ein Fallbeispiel von Zhao et al. [16] mit insgesamt 17 heißen und kalten Prozessströmen in einem Betrachtungszeitraum von 24h. Die Prozessströme sind in Tabelle 3 und Abbildung 8 dargestellt. Während in den publizierten Fallbeispielen die Prozessströme zeitlich fixiert sind, können diese auch mit variablen Startzeitpunkten angenommen werden, wenn eine Optimierung durch Scheduling zum Einsatz kommen soll.

Tabelle 3 – Überblick über die Prozessströme im literaturbasierten Referenzprozess (Quelle: Halmschlager et al. [6])

| Stream number | T <sub>in</sub> (°C) | T <sub>out</sub> (°C) | CP (kW/K) |
|---------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| 1             | 35                   | 20                    | 70.0      |
| 2             | 100                  | 42                    | 7.5       |
| 3             | 100                  | 99                    | 301.0     |
| 4             | 100                  | 60                    | 2.5       |
| 5             | 100                  | 90                    | 214.0     |
| 6             | 110                  | 20                    | 2.0       |
| 7             | 85                   | 20                    | 2.0       |
| 8             | 45                   | 20                    | 2.0       |
| 9             | 45                   | 44                    | 113.0     |
| 10            | 15                   | 50                    | 25.0      |
| 11            | 25                   | 140                   | 8.0       |
| 12            | 40                   | 60                    | 7.5       |
| 13            | 25                   | 150                   | 4.5       |
| 14            | 40                   | 60                    | 4.0       |
| 15            | 60                   | 95                    | 9.0       |
| 16            | 15                   | 220                   | 4.5       |
| 17            | 15                   | 125                   | 23.5      |

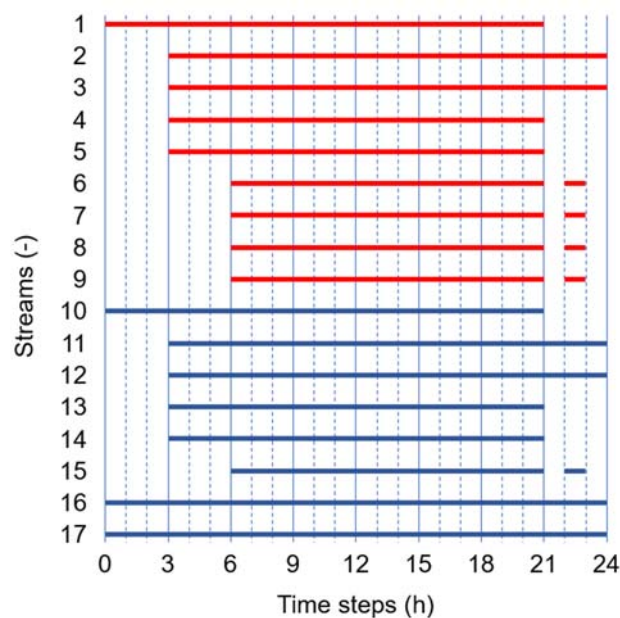


Abbildung 8 – Zeitliche Abfolge der einzelnen Prozessströme im literaturbasierten Referenzprozess (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Um auf dieser Basis einen Referenzprozess für dieses Projekt zu erstellen, musste diese Fallstudie jedoch deutlich erweitert werden. Neben dem Heiz- und Kühlbedarf der Prozessströme wurde zusätzlich ein elektrischer Strombedarf definiert. Dieser ist zeitlich variabel und basiert auf einem Industrie-Standardlastprofil. Der Verlauf ist in Abbildung 9 dargestellt.

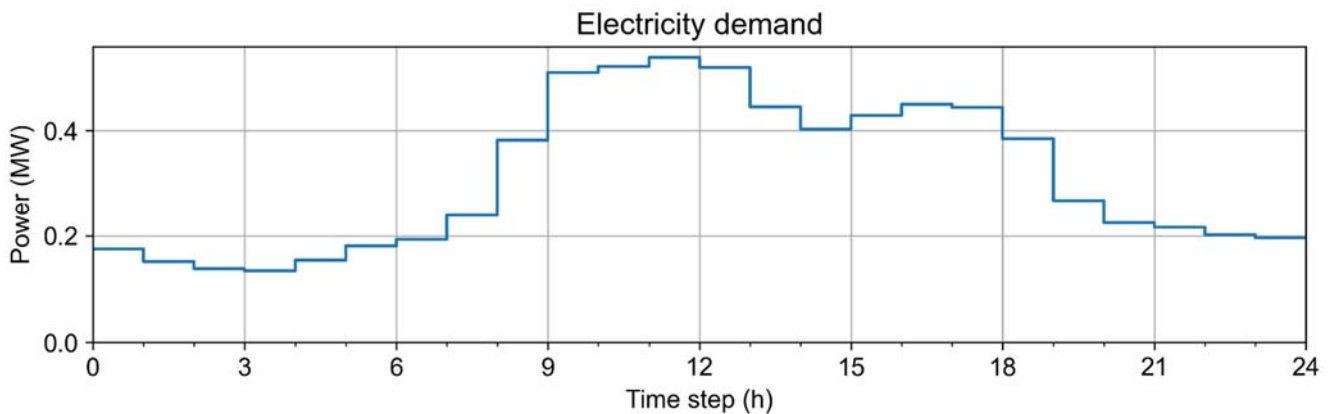


Abbildung 9 – Elektrischer Strombedarf im literaturbasierten Referenzprozess (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Zur Bereitstellung des thermischen und elektrischen Bedarfs wurde eine Superstructure aus den weiter oben beschriebenen Anlagen aufgebaut, aus der im Rahmen der Optimierung die tatsächlich zu errichtenden Anlagen ausgewählt werden. Zur Verknüpfung zwischen Versorgungsseite und den einzelnen Prozessströmen wurden drei Energieträger vorgesehen: Dampf mit 250 °C, druckbeaufschlagtes Heißwasser mit 150 °C und Warmwasser mit 70 °C. Zur Kühlung von Prozessströmen existiert Kühlwasser mit einer Temperatur von 10 °C. Die Superstructure ist in Abbildung 10 dargestellt.

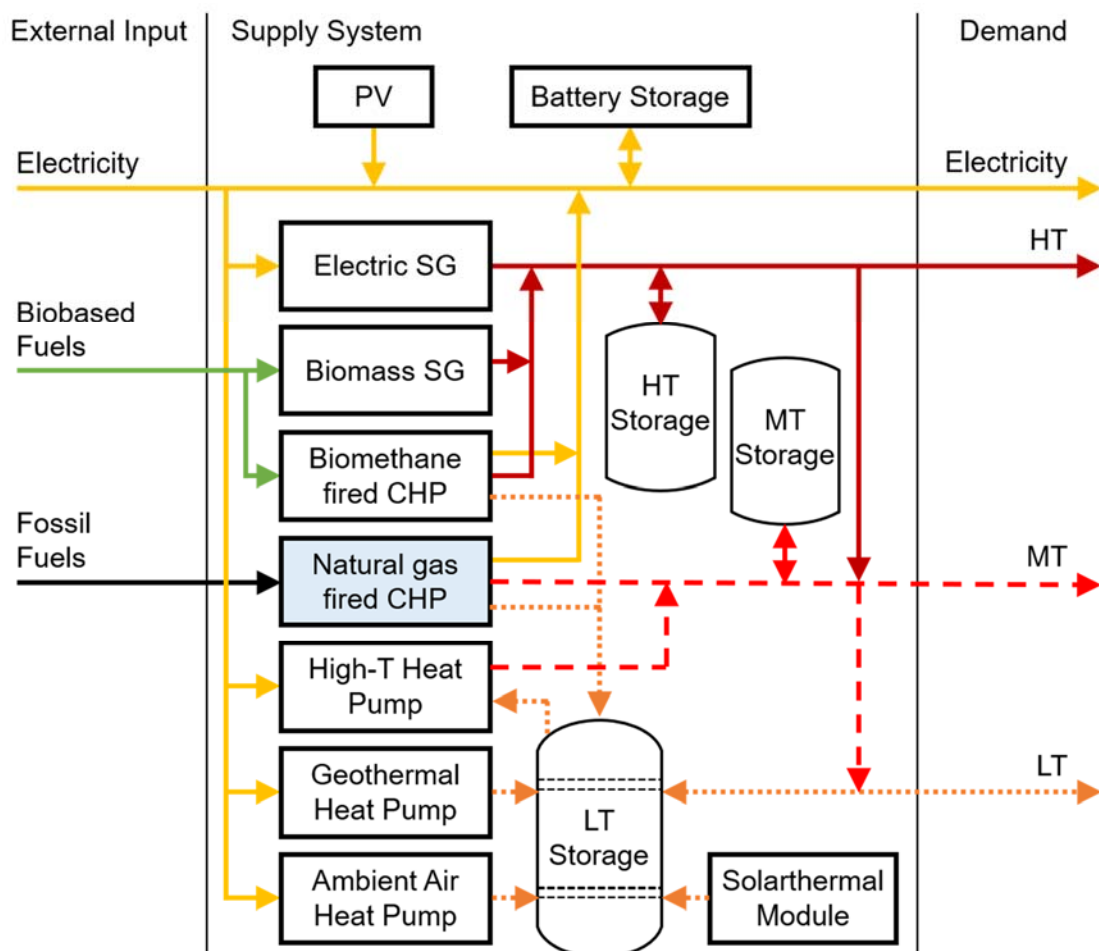


Abbildung 10 – Superstructure des Versorgungssystems im literaturbasierten Referenzprozess (Quelle: Halmschlager et al. [6])

## Industriebasierter Referenzprozess

Darüber hinaus wurde auch ein Fallbeispiel, das an einen realen industriellen Prozess angelehnt war, als Use Case aufbereitet und im Folgenden als *industriebasierter Referenzprozess* bezeichnet. Dazu wurde ein Batchprozess, nämlich das Brauen von Bier in einer kleinen Privatbrauerei, ausgewählt. Die Datengrundlage für die Modellierung des Prozessenergiebedarfs bestand aus Informationen, die vom realen Produktionsstandort zur Verfügung gestellt wurden, ergänzt durch Daten aus der Literatur.

Der Brauprozess erfordert Strom und Wärme bei 80 °C (Annahme für Cleaning-in-Place (CIP)) und 120 °C (Maischen und Würzekochen). Durch den Anfall von Abwärme bei der Kältebereitstellung für die Gärung (Fermentation) und das Reifen (Conditioning) gibt es einen aktuell ungenützten Wärmestrom bei 40 °C (Annahme). Gegenwärtig wird die Wärme durch einen Gaskessel erzeugt, während der Strom aus dem elektrischen Netz bezogen wird. In Abbildung 11 wird prozessseitig ein Überblick über die (energie-)relevantesten Teilprozesse des Brauprozesses sowie der Kühlung gegeben. Energiebereitstellungsseitig wird die Superstructure gezeigt, die für den industriebasierten Referenzprozess entwickelt wurde.

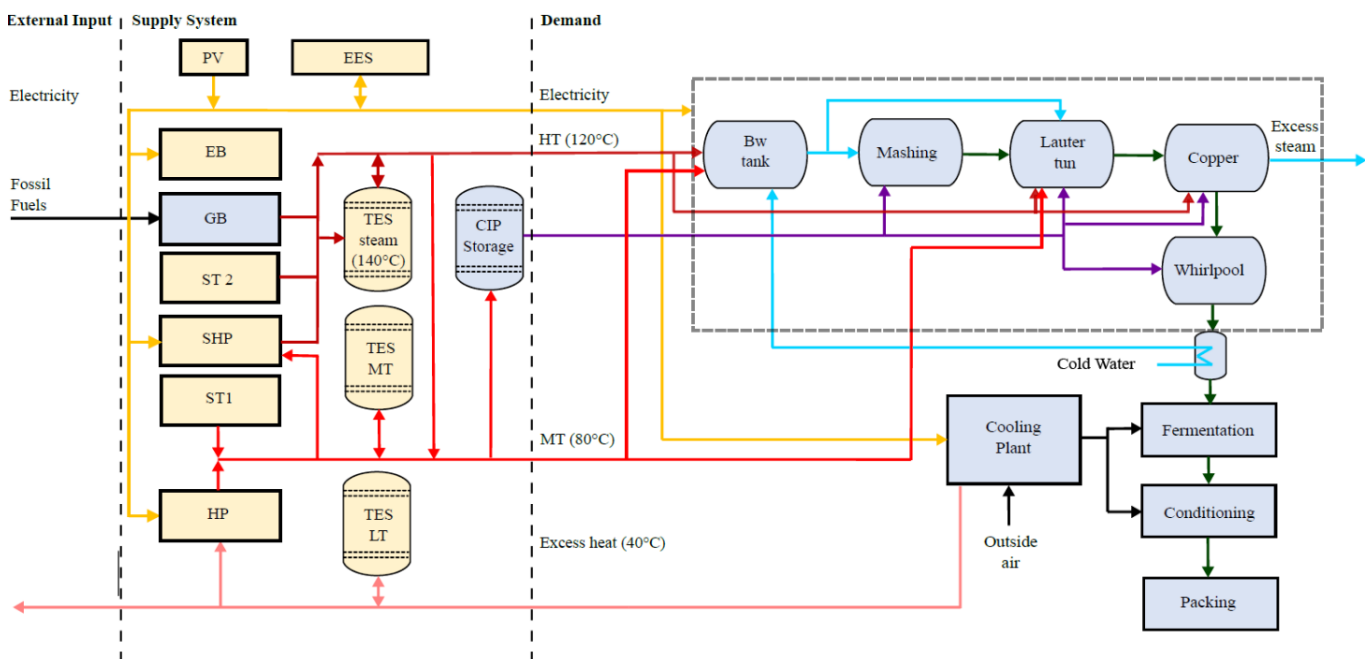


Abbildung 11 – Prozessschritte im Brauprozess (Demand) und in diesem Referenzprozess vorgeschlagene Superstructure für das Energieversorgungssystem (Supply System) mit Photovoltaik (PV), Elektroboiler (EB), Gaskessel (GB), Solarthermie (ST), dampferzeugende Wärmepumpe (SHP), Wärmepumpe (HP), thermischer Speicher (TES) für Niedertemperatur (NT) und Mitteltemperatur (MT) und elektrischen Speicher (EES)

Der Brauprozess besteht aus einigen Teilschritten sowie Hilfsprozessen, die mitunter in Abbildung 11 abgebildet und in Tabelle 4 beschrieben sind.

Tabelle 4 – Teilschritte des Brauprozesses und Hilfsprozesse, eine detaillierte Beschreibung der energierelevanten Prozessschritte findet man u.a. bei Sturm et al. [17]

| Prozessschritt<br>(dt. & engl.<br>Bezeichnung)     | Kurzbeschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Malz schroten</b>                               | Malzkörner werden durch den Einsatz von elektrischer Energie zerkleinert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Maischen<br/>(Mashing)</b>                      | Das geschrotete Malz wird mit warmen Brauwasser aus dem Brauwassertank vermischt. Die entstehende Maische durchläuft, realisiert durch Beheizung in einem Tank, einen definierten Aufheizvorgang mit Haltepunkten. So sollen Nährstoffe aus dem Malz gelöst werden und ins Brauwasser übergehen. Die Prozessdauer liegt im Bereich von ca. einer Stunde.                                             |
| <b>Läutern<br/>(Lautering /<br/>Lauter tun)</b>    | Beim Läutern werden warme Maische und Brauwasser in einem weiteren Tank mit Hilfe von elektrischen Antrieben ohne die Zufuhr von zusätzlicher thermischer Energie gemischt. Die Prozessdauer beträgt mehrere Stunden. Zu Prozessende werden Feststoffe (sog. Treber) abgeschieden und die entstandene Würze dem nächsten Prozessschritt zugeführt.                                                   |
| <b>Würzekochen<br/>(Wort Cooking /<br/>Cooper)</b> | Es wird Hopfen beigegeben und die Würze zum Sieden gebracht. Dabei wird das Volumen der Würze durch Aufheizen, Kochen und teilweise Verdampfen (bis zu 10%) reduziert. Die gesamte Prozessdauer beträgt mehrere Stunden.                                                                                                                                                                             |
| <b>Whirlpool<br/>(Whirlpool)</b>                   | Im Whirlpool wird wiederum durch den Einsatz von elektrischer Energie für die Abscheidung von Trüb- und Feststoffen nach dem Würzekochen gesorgt.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Kühlung<br/>(Heat<br/>Exchanger)</b>            | Anschließend muss der heiße Produktstrom von knapp 100°C in sehr kurzer Zeit auf knapp unter 10°C abgekühlt werden. Dabei wird die Abwärme oft und auch in diesem Referenzprozess genutzt, um Brauwasser für nachfolgende Brauvorgänge bereits aufzuwärmen.                                                                                                                                          |
| <b>Gärung<br/>(Fermentation)</b>                   | Nach der Beigabe der Hefe wird das Zwischenprodukt für die Dauer der Gärung (Fermentation) gekühlt, die einige (ca. 4-7) Tage dauert. Dabei werden Zuckermoleküle (aus dem Malz) in Alkohol und CO <sub>2</sub> umgewandelt. Je nach Hefestamm (ober- oder untergärig) bestimmt sich die Fermentationstemperatur (in der Regel 5-18°C).                                                              |
| <b>Reifung<br/>(Conditioning)</b>                  | Nach Abschluss der Gärung wird das Bier für mehrere Wochen weiter gekühlt, was in Kühlräumen oder gekühlten Behältern erfolgen kann.                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Abfüllen<br/>(Packaging)</b>                    | Der letzte Prozessschritt umfasst die Abfüllung des fertigen Produkts in Flaschen oder Fässer.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>CIP</b>                                         | Die Brautanks werden durch Spülung mit Reinigungswasser sowie basischen und sauren Lösungen gereinigt. Die basische Lösung wird dabei auf einem Temperaturniveau von 80°C bereitgestellt. Es wurde in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass die Lösung an jedem Brautag einmal von 50°C auf 80°C gewärmt wird und für jeden weiteren Reinigungsvorgang von 75°C auf 80°C wieder aufgewärmt wird. |

## Ergänzungen zur Umsetzung im Optimierungsmodell

Der *thermische Energiebedarf* in Form von Warmwasser oder Dampf für Maischen, Würzekochen, Brauwasser wärmen und CIP wurde als Cold-Stream implementiert. Das Würzekühlen wurde als Hot-Stream implementiert. Für den *elektrischer Energiebedarf* für Malz schroten, Läutern und Whirlpool wurde angenommen, dass dieser Bedarf in den zur Verfügung gestellten und aufbereiteten elektrischen Energiebedarfsprofilen enthalten ist. *Abwärmeseitig* wurde der Anfall von Abwärme in den Kältemaschinen, beeinflusst. In der Rechnung wurde der Abwärmeeinfall mithilfe des abgeschätzten und

abgeleiteten Kältebedarfsprofil von Gärung und Reifung ermittelt. Es wurde zudem angenommen, dass die Abwärme auf einem Temperaturniveau von 40°C anfällt.

Folgende Informationen wurden vom Industriebetrieb selbst bereitgestellt:

- Anzahl der Sude pro Jahr (siehe auch Beschreibung zur Vereinfachung in Abschnitt 3.3.3)
- Produktmenge je Sud in Hektoliter
- Flüssigkeitsvolumen bei vorgelagerten Schritten Maischen & Würzekochen (inkl. Anteil der Schwadenbildung)
- Maischdiagramm (zeitl. Temperaturverlauf für Teilmassenströme)
- Art der vorhandenen Energieversorgungsanlagen
- Messung der bezogenen elektrischen Leistung für 2018 und 2019 in Viertelstundenauflösung

Weiters wurden folgende Werte mittels Literaturrecherchen ermittelt beziehungsweise berechnet und abgeschätzt:

- Verhältnis Malzmenge zu Würze-Flüssigkeitsvolumen ( $0,125\text{--}0,25 \text{ kg/l}_{\text{Würze}}$ ), aus [17]
- Spezifische Wärmekapazität von Malz ( $1,7 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ), z.B. aus [18]
- Für die Modellierung eingesetzter Wert für Anteil Treber zu Malz (65%), Anteil Hopfen zu Malz (0,5%) und Anteil Trübstoffe Whirlpool zu Malz (25%), aus [17]
- Zeitlicher Temperaturverlauf beim Würzekochen
- Typischer Temperaturverlauf und Energiebedarf für die Kühlung bei der Gärung ( $0,324 \text{ kWh/hl}$ , bzw.  $556 \text{ kJ/kg}_{\text{Extrakt}}$ , abgeleitet aus [19] bzw. [20])
- Energiebedarf für die Kühlung bei der Reifung (Abschätzung durchschnittliche Jahresleistung  $25 \text{ kW}_{\text{el}}$ , vgl. branchenspezifische Kenngrößen zum Anteil der elektrischen Energie der für Kühlung in Brauereien aufgewandt wird [21])

### 3.2 Mathematische Formulierung der individuellen Optimierungsprobleme

Im Folgenden werden die mathematischen Formulierungen der einzelnen Optimierungs(teil)probleme dargestellt. Der Fokus in diesem Bericht liegt auf der Erklärung der grundsätzlichen Funktionsweise und der Ein- und Ausgabewerte. Für Details und weiterführende Informationen wird jeweils auf relevante Publikationen und einschlägige Literatur verwiesen.

#### 3.2.1 Unit Commitment

Im Zuge des Projektes wurde ein Framework zur Design- und Betriebsoptimierung von Energieversorgungssystemen erarbeitet. Diese Formulierung geht über das klassische Unit Commitment hinaus, da nicht nur der Betrieb bestehender Anlagen optimiert wird. Die vorgestellte Formulierung erlaubt darüber hinaus auch, die gemäß des definierten Zielkriteriums optimale Integration von neuen Energieversorgungsanlagen und kann somit einen Beitrag für Retrofittingansätze oder Investitionen zur Dekarbonisierung liefern. Das Versorgungssystem kann dementsprechend Bestands- und / oder Neuanlagen beinhalten. Die Modellierung erfolgt mit einer endlichen Anzahl von zeitlich diskreten, üblicherweise äquidistanten Schritten.

### Modellbeschreibung, Zielfunktion und Constraints

Für das Modell wird ein **leistungsbasierter Ansatz**, wie er von Morales-España et al. [22] und Gentile et al. [23] für reine Betriebsoptimierungsfragestellungen beschrieben wurde, verwendet. Das bedeutet, dass zu Beginn und am Ende eines jeden Zeitschritts Einschränkungen für die Variablen der Erzeugungs- bzw. Umwandlungsanlagen festgelegt werden, wie z. B. die Erfüllung des vorgegebenen Leistungsbedarfes. In Halmschlager et al. [6] wurde diese leistungsbasierte Formulierung auf gekoppelte Betriebs- und Designoptimierungsfragestellungen erweitert. Eine Gasturbine wird bspw. durch die aktuelle Leistung zu Beginn und am Ende eines Zeitschritts charakterisiert und nicht durch die während eines Zeitschritts abgegebene Energie. Außerdem gibt es für jeden Zeitschritt zwei Zustände: einen zu Beginn und einen am Ende. Für Einheiten, die in der Lage sind ihre Last in Bezug auf die zeitliche Auflösung im Modell schnell zu ändern (z. B. Elektrodenheizkessel), sind Lastsprünge an den Zeitschrittgrenzen zulässig, wie sie auch im Wärme- und Strombedarf auftreten können. Für alle anderen Energieumwandlungsanlagen wird die erzeugte Wärme- und Stromleistung am Ende eines Zeitschrittes mit dem Wert zu Beginn des nächsten Zeitschrittes verknüpft.

Für die **Optimierung des Betriebs** werden zudem Beschränkungen berücksichtigt, die mithilfe der definierten Entscheidungsvariablen und linearen Gleichungen modelliert werden, wie z. B.:

- Betrieb innerhalb fixer Leistungsgrenzen (minimale Teillast und Volllast)
- Ein- und Ausschaltdauern
- Mindestlauf- und -abschaltzeiten,
- Maximale Lastrampen und Grenzen für die Lastzustände vor dem An- und Abschalten,

Solche Betriebsbeschränkungen können nicht nur kontinuierliche, sondern auch binäre Entscheidungsvariablen erfordern. Insbesondere Letztere erhöhen die Modellkomplexität. Darüber hinaus werden folgende Aspekte im Modell berücksichtigt. **Wirkungsgradverläufe** (Abfall im Teillastbereich) werden modelliert indem angenommen wird, dass der Wirkungsgrad linear von der aktuellen relativen Last im Verhältnis zur installierten Leistung abhängt. Für Wärmepumpen wird der elektrische Wirkungsgrad (Coefficient of Performance) auf der Grundlage des Carnot-Wirkungsgrads berechnet. Energiespeicher werden durch ihren aktuellen Ladezustand modelliert. Verluste beim Laden und Entladen werden durch entsprechende Wirkungsgrade berücksichtigt. Ladezustand, Aufladung und Entladung sind durch Energiebilanzgleichungen mit Erzeugungsanlagen und Energieverbrauchern sowie miteinander verknüpft.

Auch für **Designfragestellungen** werden die Einheiten im Versorgungssystem durch eine Kombination aus kontinuierlichen und binären Entscheidungsvariablen modelliert. Für alle Einheiten werden binäre Variablen verwendet, die angeben, ob eine Einheit in der Lösung existiert. Eine kontinuierliche Variable legt die Größe bzw. Kapazität der Einheit fest. Nebenbedingungen im Optimierungsmodell (Constraints) gewährleisten, dass diese Kapazität einer Einheit innerhalb bestimmter, vordefinierter Grenzen liegt. Bei den meisten Versorgungseinheiten ist die Kapazität durch die maximale Wärmeleistung der Einheit definiert. Für solarthermische Kollektoren und Photovoltaik, wird die installierte Größe als Fläche definiert, während bei Energiespeichern der maximale Ladezustand verwendet wird. Für Retrofit-Szenarien können bestehende Einheiten spezifiziert werden, indem die Binärvariable gleich eins und Kapazität auf einen fixen Wert, nämlich dem Wert, der der Größe der Bestandsanlage entspricht, gesetzt werden.

Für alle Einheiten werden die Investitionskosten für Neuanlagen, die im Zuge der Designoptimierung integriert werden, auf Basis von sprungfixen und variablen Kosten ermittelt. Sprungfixe Kosten fallen an, sobald die Einheit in der Lösung existiert. Variable Kosten hängen linear von der Größe der Einheit ab. In die **Zielfunktion** werden sowohl Betriebskosten (z.B. Brennstoffe oder Elektrizitätsbezug vom Netz), als auch die Investitionskosten (neue Anlagen) berücksichtigt. Um diese beiden Teile in eine gemeinsame Kostenfunktion zusammenzuführen wurden alle auf eine Dauer von einem Jahr normiert. Demnach wurden die Betriebskosten so angenommen als wenn der Bedarf ein ganzes Jahr so gegeben wäre und die Investitionskosten wurden in jährliche Abschreibungen übergeführt.

### Superstructure und Parameter

Kernelement der gekoppelten Design- und Betriebsoptimierung stellt im Projekt SINFONIES das Konzept einer Energieversorgungs-Superstructure dar. Dabei werden in der Formulierung des Optimierungsproblems alle Energieversorgungsanlagen abgebildet, miteinander verknüpft und parametrisiert (z.B. durch technische Betriebs- aber auch Kostenparameter), die gemäß einer Voranalyse ein Potential für die Versorgung des Prozesses darstellen. Im Rahmen der Voranalyse werden u.a. Anforderungen von den Verbrauchern (Temperatur, Medium, etc.) und die Verhältnisse (z.B. Platz aber auch externe Rahmenbedingungen wie Netzanschlüsse) am Standort berücksichtigt. Ein Beispiel für eine entwickelte Superstructure ist u.a. in Kapitel 3.1.4 in Abbildung 11 für den industriebasierten Referenzprozess zu sehen.

### 3.2.2 Heat Exchanger Network Synthesis

Das Modell für die Optimierung des Wärmerückgewinnungssystem basiert auf der Arbeit von Yee und Grossman [23]. Dabei wird eine Superstructure verwendet, die eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten zur Platzierung von Wärmeübertragern abbildet. Diese ist für ein einfaches Beispiel bestehend aus zwei heißen Prozessströmen (Kühlbedarf) und zwei kalten Prozessströmen (Heizbedarf) mit zwei sogenannten Temperatur-„Stages“ in Abbildung 12 (a) dargestellt. In jeder Stage kann jeder heiße mit jedem kalten Prozessstrom mit einem Wärmeübertrager kombiniert werden. In einer unserer früheren Arbeiten [26] wurde eine linearisierte Variante dieser Superstructure-Formulierung vorgestellt. Ein wichtiger Aspekt dieses Linearisierungsansatzes ist, dass die Wärmetauscherfläche nicht explizit modelliert wird, sondern die abgezinste Wärmetauscherfläche linearisiert wird, die bereits Skaleneffekte berücksichtigt. Für Details zur Implementierung wird auf [26] verwiesen. Erweiterungen für den Superstructure-Ansatz für die Integration von thermischen Energiespeichern (Abbildung 12 (b)) sowie für die Integration von Wärmepumpen (Abbildung 12 c)) wurden in SINFONIES verwendet, um die Wärmerückgewinnungspotentiale weiter zu heben. Die kombinatorische Komplexität der Formulierung steigt durch die mögliche Einbindung dieser Technologien aber sichtbar.

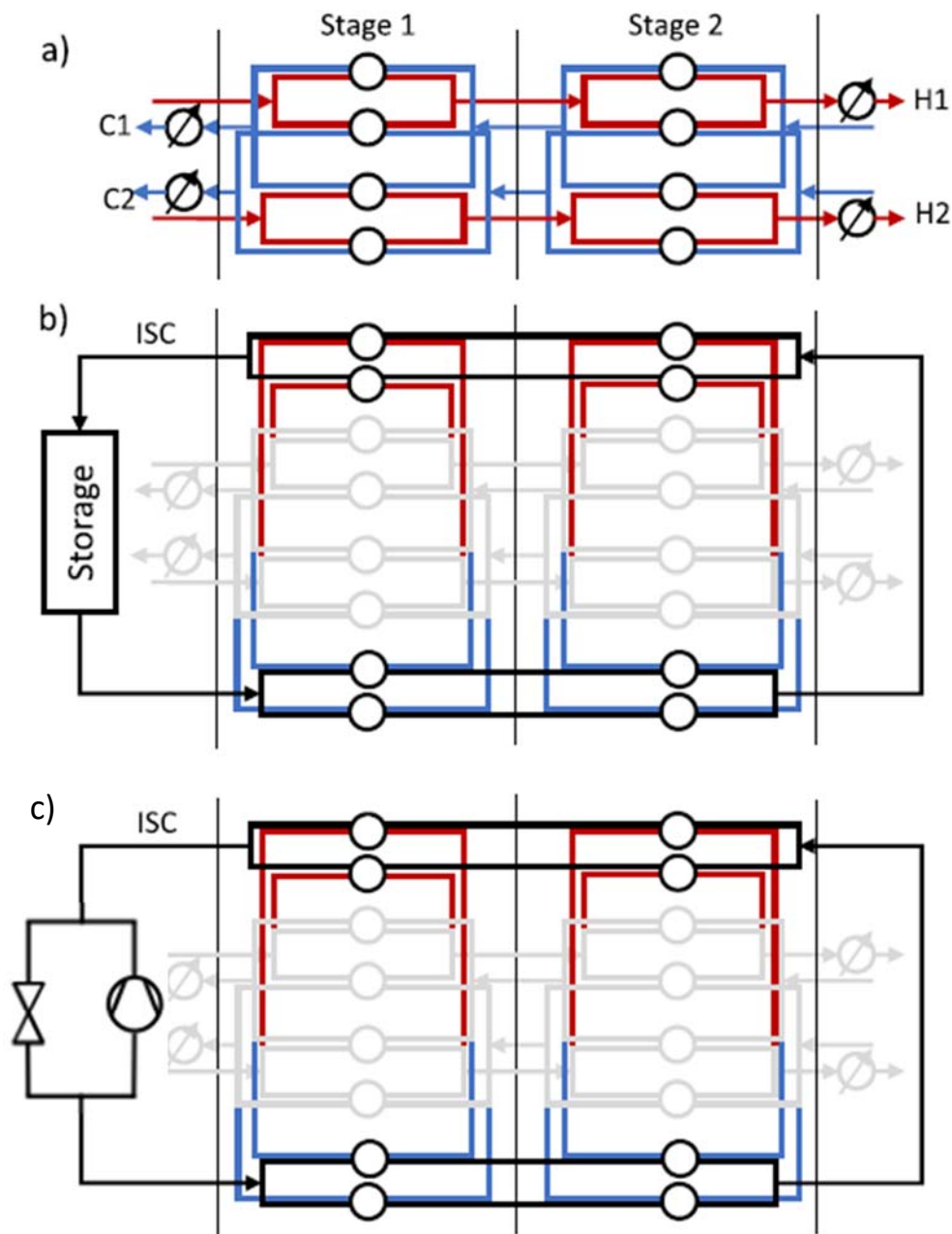


Abbildung 12 – Superstructure des HENS-Modells, Grundform und Erweiterungen (Adaptiert von Beck und Hofmann [24])

Eine Modifikation des erwähnten linearisierten HEX (Heat exchanger) -Aufbaus erlaubt es, Retrofit-Szenarien unter Berücksichtigung der folgenden Änderungen des bestehenden HEN (Heat exchanger network) zu behandeln (siehe Abbildung 13):

- Wiederverwendung des bestehenden HEX an einer anderen Stelle des Netzes,
- Hinzufügung einer Wärmeübertragungsfläche zum bestehenden HEX,
- Herausnahme bestehender HEX aus dem Netz ohne Wiederverwendung,
- Einbindung neuer HEX.

Um neue Zuordnungen von bereits bestehenden HEX vorzunehmen, wird eine Matrix aus Binärvariablen eingeführt. Die Zeilen bzw. Spalten dieser Matrix stehen für den Ort der bereits vorhandenen HEX bzw. für den Ort aller potenziellen Positionen. Für eine Neuordnung wird eine zusätzliche Binärvariable

eingeführt, die die Verfügbarkeit der bestehenden HEX abbildet. Wird diese auf 1 gesetzt, so kann der HEX an einer anderen Stelle im Netzwerk positioniert, oder aber aus dem System entfernt werden.

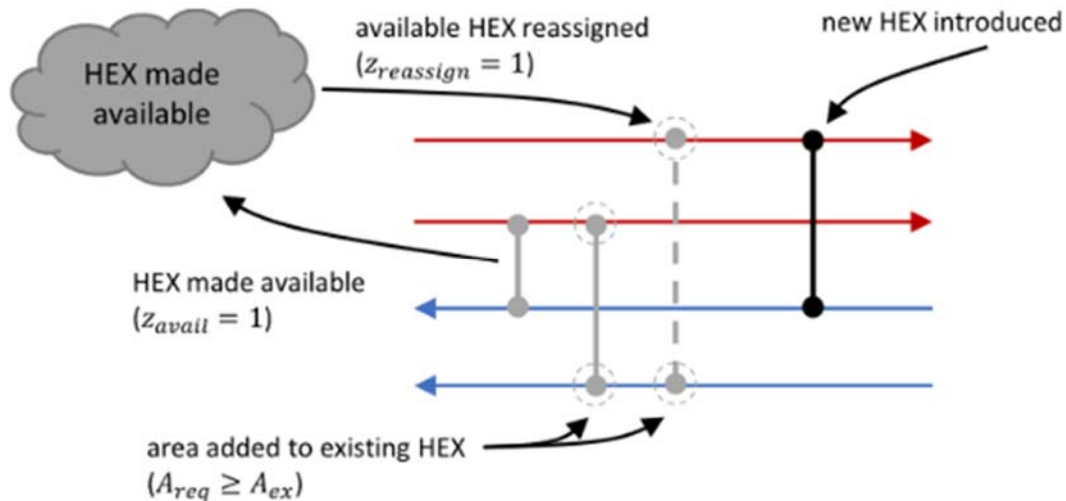


Abbildung 13 – Möglichkeiten für Retrofit im HEN (Quelle: Halmschlager et al. [6])

### 3.2.3 Scheduling

Für die Formulierung der Prozessablaufplanung („Scheduling“) wurde ein zeitpunktbasiertes Modell gewählt. Dabei wird der Startzeitpunkt von einzelnen Prozessschritten mit dem zugehörigen thermischen und elektrischen Energiebedarf auf einem fest definierten „Zeitgitter“ platziert. Um Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten abzubilden, wurden so genannte Bucket-Variablen eingeführt, die zum Beispiel als notwendige Inputfaktoren für einen Prozessschritt, oder auch als Platz für das Ergebnis des Prozessschritts verstanden werden können. Mit diesen Hilfsvariablen lassen sich nahezu beliebige Abhängigkeiten einfach abbilden. Die mathematische Formulierung des Scheduling-Ansatzes ist in Beck et al. [8] beschrieben.

## 3.3 Kombiniertes Optimierungsproblem

Die zentrale Forschungsfrage und eine wesentliche Herausforderung im Projekt SINFONIES stellte die Kopplung der zuvor in Abschnitt 3.2 vorgestellten individuellen Optimierungsansätze dar. Der im Projekt entwickelte Ansatz ist in Abbildung 14 visualisiert. Dabei werden die individuellen Formulierungen im kombinierten Ansatz über die Energiebedarfe gekoppelt. Sowohl der Scheduling als auch der HENS-Ansatz tauschen mit der Unit-Commitment-Formulierung den (aus der Lösung der Subprobleme) resultierenden Energiebedarf aus. Dieser resultierende Bedarf wird durch die Energieversorgungsanlagen gedeckt, wobei deren Betrieb und Design wiederum im Rahmen des Unit Commitments optimiert werden.

Der resultierende Wärmebedarf, und in weitere Folge durch das Scheduling auch der zeitlich festgelegte Strombedarf, resultieren ihrerseits jedoch aus einem Wechselspiel und der kombinierten Optimierung von

Scheduling und HENS. Der nach Wärmerückgewinnung verbleibende Bedarf Heiz- bzw. Kühlbedarf muss durch die Einheiten des Versorgungssystems für den gesamten simulierten Zeitrahmen gedeckt werden. Da es keine weitere direkte Verbindung zwischen den beiden Teilen gibt, können unterschiedliche Zeitschritt-Auflösungen für Wärmerückgewinnung/Scheduling und Energieversorgung gewählt werden. Ein Zeitschritt der Prozessseite kann mehrere Zeitschritte des Versorgungssystems umfassen. Das Gegenteil ist nicht möglich, da dies leistungsmäßig zu unzureichender Versorgung führen könnte.

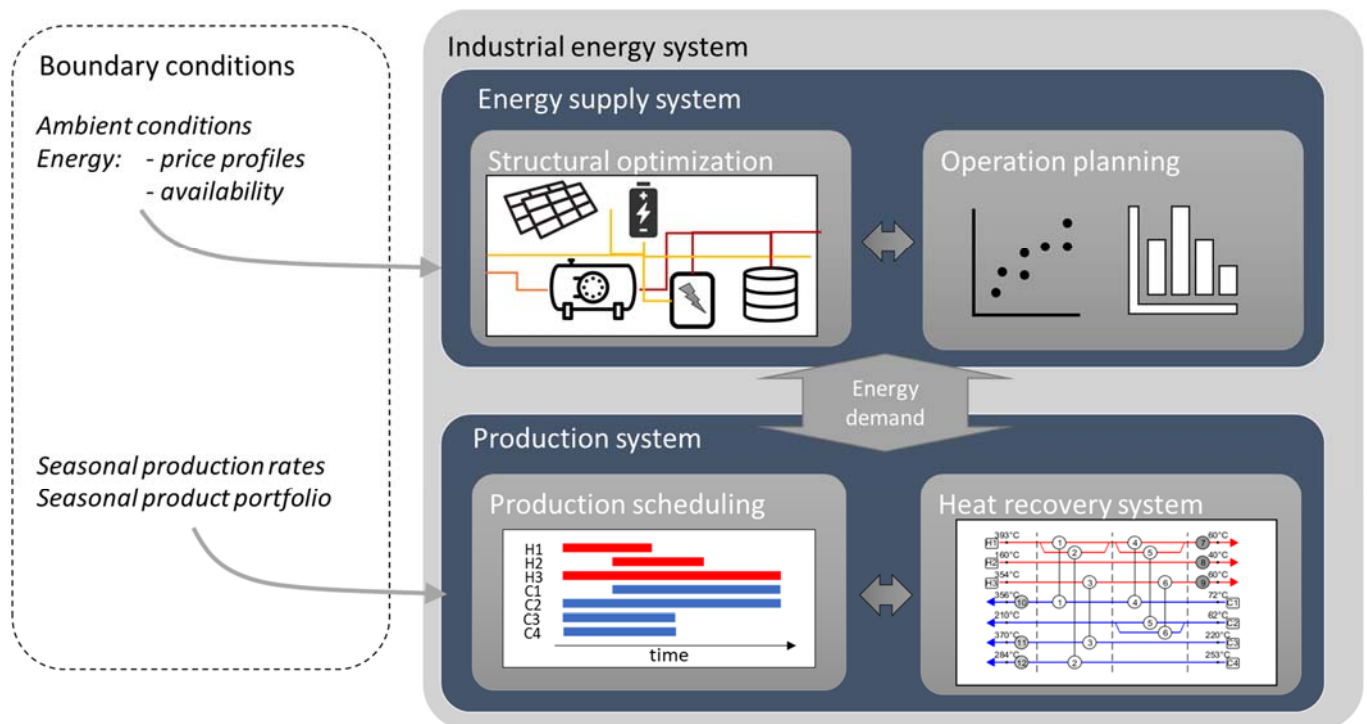


Abbildung 14 - Visualisierung der Schnittstellen der individuellen Optimierungsansätze zur kombinierten Lösung, Abbildung nach Beck et al. [8]

### 3.3.1 Schnittstellen der Teilmodelle

Ein zentraler Aspekt bei der Umsetzung des kombinierten Problems waren die Schnittstellen der Einzelmodelle. Letztendlich sollte der kombinierte Ansatz nicht komplett neu implementiert werden, sondern durch eine Verknüpfung der Einzelmodelle geschehen. Eine klare Definition der Schnittstellen (Parameter, Eingabe- und Ausgabewerte) der Teilmodelle ist daher unumgänglich.

In Abbildung 15 sind die vollständigen im Projekt berücksichtigten Definitionen von Eingabe, Parametern und Ausgabe der einzelnen Teilmodelle illustriert. Hierbei wird zwischen Eingabewerten und Parametern unterschieden. Im resultierenden mathematischen Optimierungsmodell werden zwar beide in Parameter in der Zielfunktion und in Beschränkungen übergeführt, aus logischer Sicht erscheint eine Trennung aber sinnvoll. „Eingabe“ beschreibt hierbei den Kern des Prozesses/der Anlagen, während „Parameter“ externe Einflussfaktoren wie z.B. Energiepreise darstellen.

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

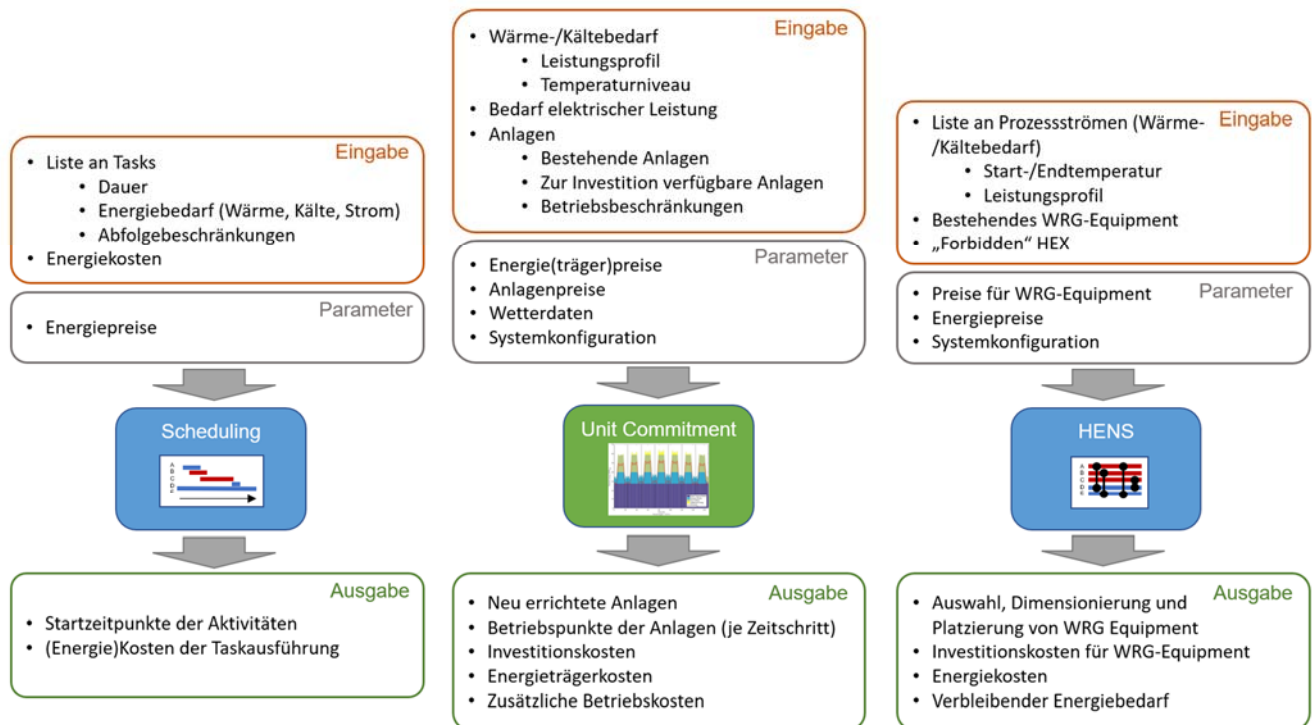


Abbildung 15 - Eingabe, Parameter und Ausgabe in den Einzelproblemen

## 3.3.2 Zusammenführung zum kombinierten Modell

Durch die Kombination der Einzelmodelle an den gegebenen Schnittstellen fallen notwendige Definitionen weg. Diese müssen nicht mehr explizit definiert werden, sondern werden intern im kombinierten Modell berücksichtigt. Überblicksmäßig ist diese Verknüpfung der Einzelprobleme in Abbildung 16 dargestellt. Hier ist kenntlich gemacht, welche Definitionen wegfallen.

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

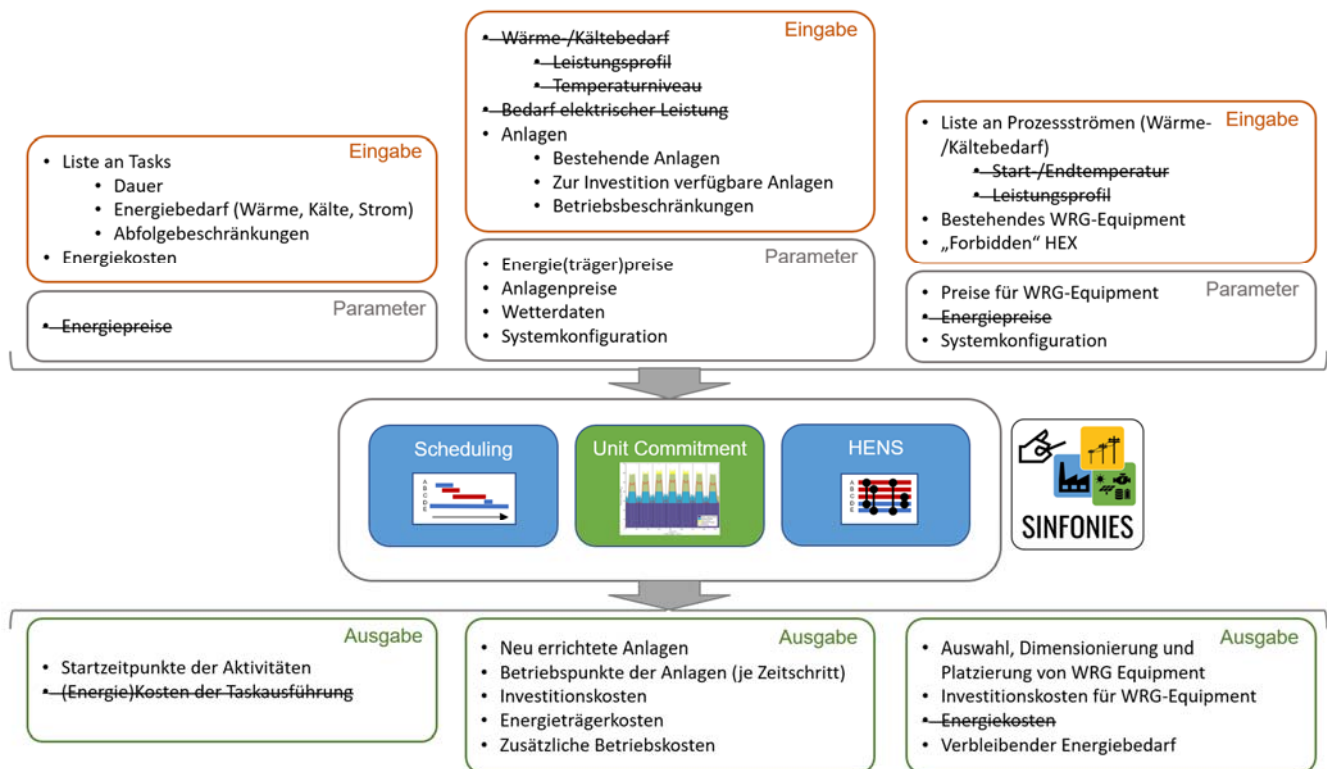


Abbildung 16 - Verknüpfung der einzelnen Optimierungsprobleme zum kombinierten Optimierungsproblem

## 3.3.3 Komplexität & Vereinfachung

Grundsätzlich sind kombinatorische Optimierungsprobleme, welche auch die in diesem Projekt eingesetzten MILP-Probleme umfassen, schwer zu lösen. Die theoretische Lösungszeit wächst exponentiell mit der Anzahl der kombinatorischen/ganzzahligen Variablen. Moderne Solver können durch intelligente Lösungsansätze mittlerweile in der Praxis auch sehr große Probleme gut lösen, aber der grundsätzliche Zusammenhang bleibt bestehen: bei einer steigenden Anzahl an Variablen wächst die Lösungskomplexität drastisch.

In diesem Projekt wurde die Kopplung der Einzelmodelle durch Zusammenführung in einem kombinierten Modell erreicht. Das bedeutet aber zwangsläufig, dass statt mehrere kleinerer Optimierungsprobleme nun ein größeres gelöst werden muss, was ungleich komplexer ist.

Zusätzlich bringen die für die Kopplung erforderlichen Änderungen an den Teilmodellen weitere Komplexität mit sich. Dies betrifft insbesondere die Schnittstelle Scheduling–HENS:

In der klassischen Superstructure-Formulierung für die Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken sind die Heiz- und Kühlbedarfe direkt über Modellparameter vorgegeben. Ebenso sind auch bei Multi-Period-Problemen die Start- und Zieltemperaturen der Prozessströme fix vorgegeben. Durch die Schaffung einer Schnittstelle zur Schedulingformulierung fallen diese Vorgaben jedoch weg und müssen durch zusätzliche Variablen und Hilfsvariablen abgebildet werden. Damit keine Nichtlinearitäten in Kauf genommen werden müssen, werden sogenannte "big-M"-Formulierungen verwendet, um mit Hilfe von Binärvariablen auf Seite des Schedulingmoduls die Aktivität und damit die Temperaturniveaus und Leistungen zu definieren. Im Vergleich zur klassischen Formulierung ist dieser Ansatz jedoch deutlich

weniger "tight" und bedeutet, dass der Solver beim Lösen des Problems einen deutlich größeren Duality Gap schließen muss.

Insgesamt ergibt sich die Anzahl der Variablen im Optimierungsmodell des kombinierten Ansatzes aus der Summe der Variablen der einzelnen Teilmodelle. Im Folgenden ist das Skalierungsverhalten dieser Teilmodelle beschrieben:

### **Scheduling**

Die Haupttreiber der Komplexität im Scheduling-Modell sind die Anzahl der Zeitintervalle und die Anzahl der definierten Prozessschritte. Die Anzahl der Binärvariablen ergibt sich also als Multiplikation dieser beiden Dimensionen. Die weiteren Variablen des Scheduling-Modells sind kontinuierliche Hilfsvariablen, die zu einem großen Teil bereits im Presolve-Schritt eliminiert werden können.

### **UC (Energieversorgung)**

Auch in der Modellierung des Versorgungssystems ist die Anzahl der Zeitschritte ein Komplexitätstreiber. Zusätzlich kommt aber hier hinzu, dass die Anzahl an Binärvariablen vom Anlagentyp abhängt. Anlagen ohne Beschränkung der minimalen Teillast können rein durch kontinuierliche Variablen je Zeitschritt abgebildet werden. Für beschränkte Anlagen sind jedoch je nach Art der Beschränkung (nur minimale Teillast, Startup- und/oder Shutdown-Beschränkungen) eine oder mehrere Binärvariablen je Zeitschritt erforderlich.

Für die Investmententscheidung sind zusätzlich Binärvariablen erforderlich, die die Existenz einer Anlage beschreiben, diese treten aber nur einmal pro Anlage und nicht je Zeitschritt auf.

### **HENS (Wärmerückgewinnung)**

Bei der Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken mittels Superstructureformulierungen skaliert die Variablenanzahl in Abhängigkeit von

- Anzahl der Temperaturstages
- Anzahl der Zeitintervalle
- Anzahl der Prozessströme
- Anzahl der Utilities, Wärmepumpen und Speicher.

Wesentlich für die Modellkomplexität sowie die schlechte Skalierbarkeit des Problems sind zwei Effekte:

- Binärvariablen für die Existenz von Wärmeübertragern skalieren mit dem Produkt aus der Anzahl von kalten Prozessströmen mal der Anzahl von heißen Prozessströmen mal der Anzahl von Temperaturstages.
- Die kombinatorische Komplexität des Problems skaliert exponentiell mit der Anzahl der Binärvariablen für die Existenz von Wärmeübertragern.

Erlaubt man, dass existierende Wärmeübertrager während jedes Zeitintervalls auch (teilweise) gebypassed werden dürfen, kommt auch die Anzahl der Zeitintervalle noch multiplikativ für die Anzahl der Binärvariablen hinzu.

Die Rechendauer für diese Klasse von Problemen lässt sich a priori bzw. Anhand der Anzahl an Variablen nicht festmachen, da auch die Parametrierung des Problems insbesondere der Kostenfunktion essentiell für die effiziente Abarbeitung des Lösungsraumes ist.

Grob lässt sich sagen, dass für kontinuierliche Probleme mittlerer Größe (ca. 10 heiße und ca. 10 kalte Prozessströme) mit Rechenzeiten von bis zu mehreren Stunden für die Identifikation des globalen Optimums zu rechnen ist.

## Getroffene Vereinfachungsmaßnahmen

Um die für die Lösung des kombinierten Problems benötigte Zeit im vertretbaren Rahmen zu halten, waren einige Vereinfachungsmaßnahmen erforderlich. Diese sind in Tabelle 5 überblicksmäßig aufgelistet und in weiterer Folge detaillierter beschrieben.

Tabelle 5 – Überblick über getroffene Vereinfachungsmaßnahmen

| Zweck                                          | Beschreibung (Literatur) | Bezug zum Projekt                                                |
|------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Linearisierung der HENS-Superstructure         | Beck und Hofmann [25]    | Vor Projektstart erarbeitet, im Projekt erweitert                |
| Linearisierung des Wärmepumpen-Modells in HENS | Beck et al. [26]         | Getrennt von diesem Projekt erarbeitet, im Projekt integriert    |
| Linearisierung des Retrofit-Ansatzes           | Halmschlager et al. [6]  | Im Projekt neu erarbeitet                                        |
| Unterschiedliche Zeitschritte für Teilmodelle  | Hofmann et al. [7]       | Im Vorfeld des Projekts erarbeitet, im Projekt neu implementiert |
| Zusätzliche HENS-Einschränkungen               | Beck et al. [27]         | Vor Projektstart erarbeitet, im Projekt neu implementiert        |

### – Strikt lineare Formulierung des Optimierungsproblems

Eine lineare Formulierung aller Teilprobleme ist Voraussetzung, dass das resultierende kombinierte Problem linear ist. Für einige, eigentlich nichtlineare Aspekte wurden im Umfeld von SINFONIES neue, linearisierte Formulierungen erarbeitet und implementiert.

#### o Linearisierung der HENS-Superstructure

Das linearisierte HENS-Modell ist zentraler Teil des Modells zum Design des Wärmerückgewinnungssystems. Es wurde von Teilen des Projektteams vor Projektstart entwickelt und ist im Detail in Beck et al. [25] beschrieben. Im Rahmen von SINFONIES wurde es neu implementiert und erweitert.

#### o Linearisierung des Wärmepumpenmodells in HENS

Ein linearisiertes Modell für die Wärmepumpenintegration in HENS wurde parallel in einem anderen Forschungsprojekt entwickelt und in SINFONIES integriert. Details dazu werden in Beck et al. [26] vorgestellt.

#### o Linearisierter Retrofit-Ansatz

Die Erweiterung des linearen HENS-Modells um die Möglichkeit, Retrofit-Fälle zu bearbeiten wurde in SINFONIES neu erarbeitet und implementiert. Details sind in Halmschlager et al. [6] beschrieben.

## – Verschiedene Zeitschritte

Im Vorfeld des Projekts wurde eine Methode erarbeitet, wie unterschiedliche Zeitschritte in den einzelnen Teilproblemen zusammengeführt werden können. Diese wurde in SINFONIES leicht überarbeitet und neu implementiert. Details sind in Hofmann et al. [7] beschrieben.

HENS/Scheduling – UC.

## – Im HENS-Teilproblem wurden weitere Vereinfachungsmaßnahmen getroffen:

- o Es ist nicht erlaubt Wärmetauscher in einzelnen Zeitschritten zu by-passen. Dadurch reduziert sich die Anzahl an Binärvariablen erheblich, in Spezialfällen sinkt jedoch das Wärmerückgewinnungspotential geringfügig.
- o Maßnahmen für das „tightening“ der HENS Superstructure Formulierung wurde entwickelt. Das bedeutet, dass der Lösungsraum sinnvoll eingeschränkt werden kann, ohne dabei gültige Lösungen auszuschließen und so die Rechenzeit verkürzt wird. Details sind in Beck et al. [27] zu finden.
- o Wärmeübertragerkonfigurationen, die zwar in der mathematischen Formulierung unterschiedlich erscheinen (Wärmeübertrager sind in unterschiedlichen Temperatur Stages angeordnet), physikalisch aber ident sind, wurden auf eine einzige Konfigurationsmöglichkeit beschränkt.
- o Für jede Stream-Kombination wird nur ein Wärmeübertrager erlaubt. Das bedeutet, dass beispielsweise ein heißer Prozessstrom nicht zuerst Wärme an den kalten Prozessstrom C1, dann an den Prozessstrom C2 und dann wieder an den Prozessstrom C1 abgeben kann. Diese Vereinfachung ist vor Allem in Kombination mit dem Linearisierungsansatz wichtig, da dadurch verhindert wird, dass anstatt eines großen Wärmeübertragers mehrere kleine in Serie geschaltet werden.

## – Reduzierung auf repräsentative Tage

Ein typischer Ansatz, um die Komplexität in der Designoptimierung zu reduzieren, ist die Wahl repräsentativer Tage. Dabei wird statt dem gesamten relevanten Zeitraum (z.B. ein Kalenderjahr) nur eine begrenzte Anzahl an Tagen ausgewählt, die für diesen Zeitraum möglichst repräsentativ sind. So wird die, für die Rechenzeit oft sehr kritische, Anzahl an Zeitschritten deutlich reduziert während gleichzeitig sehr ähnliche Ergebnisse der Optimierung zu erwarten sind.

Die überwiegende Mehrheit der derzeitigen Ansätze zur Auswahl einer repräsentativen Anzahl von Tagen beruht entweder auf einfachen Heuristiken oder Clustering-Algorithmen. In den letzten Jahren wurden auch Optimierungsansätze entwickelt, die repräsentative Tage wählen, um den Fehler zwischen reduzierten und originalen Problem zu minimieren. [28–30]

## – Abbildung zeitlicher Unterschiede im „Industriebasierten Referenzfall“

Ein abweichender Ansatz wurde für den Referenzprozess gewählt, der an einen realen Industrieprozess angepasst ist. Da hier die Anzahl an Produktionstagen  $N$  (mit je einem Produktionszyklus) im Vorhinein bekannt war, wurden grundsätzlich auf Betriebsseite drei unterschiedliche Arten von Tagen unterschieden:

- o Werktage mit Produktion
- o Werktage ohne Produktion
- o Wochenendtage

Aus dem Strombezugsprofil wurden jene  $N$  Tage herausgefiltert, die den höchsten Tagesstrombezug hatten. Für diese Produktionstage wurde die optimale Wärmerückgewinnung zwischen Hot- und Cold-Streams des Prozesses einmalig ausgelegt. Dazu wurde die Annahme getroffen, dass der industrielle thermische Energiebedarf im Prozess selbst, ohne nachgelagerte Kühlprozesse im Tages- und Wochenbereich, keinerlei saisonale Einflüsse aufweist. Diese Tage, allesamt Werktage, wurden als Produktionstage definiert. Der stündliche Strombedarf wurde für jeden dieser drei Tagestypen durch durchschnittliche stündliche Mittelwerte aller Produktionstage, Nicht-Produktions-Werktage und Wochenendtage ermittelt.

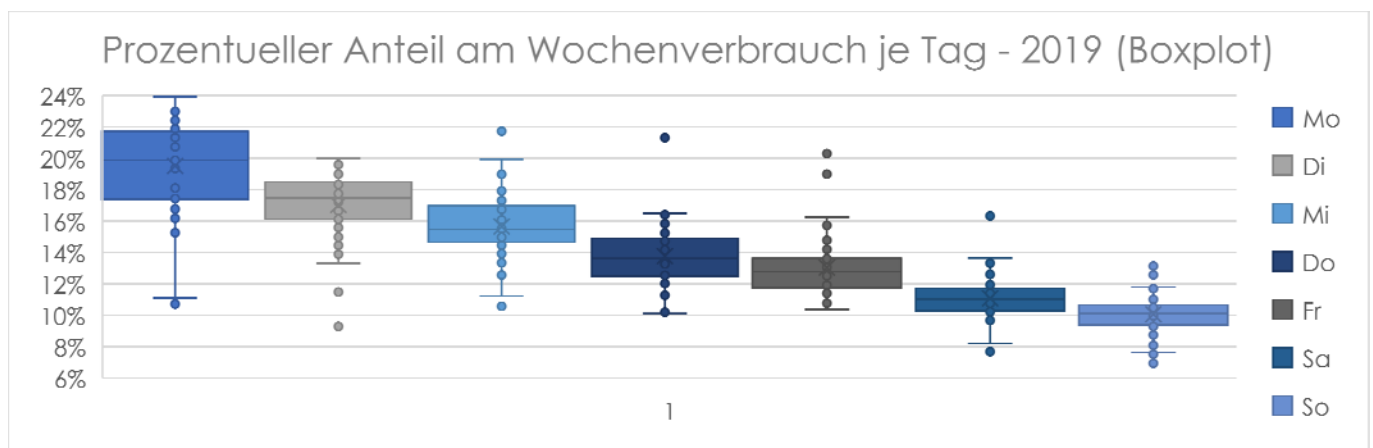


Abbildung 17 – Statistische Analyse des täglichen Energieeinsatzes bezogen auf den Wochenenergieeinsatz im Jahr 2019, eigene Auswertung

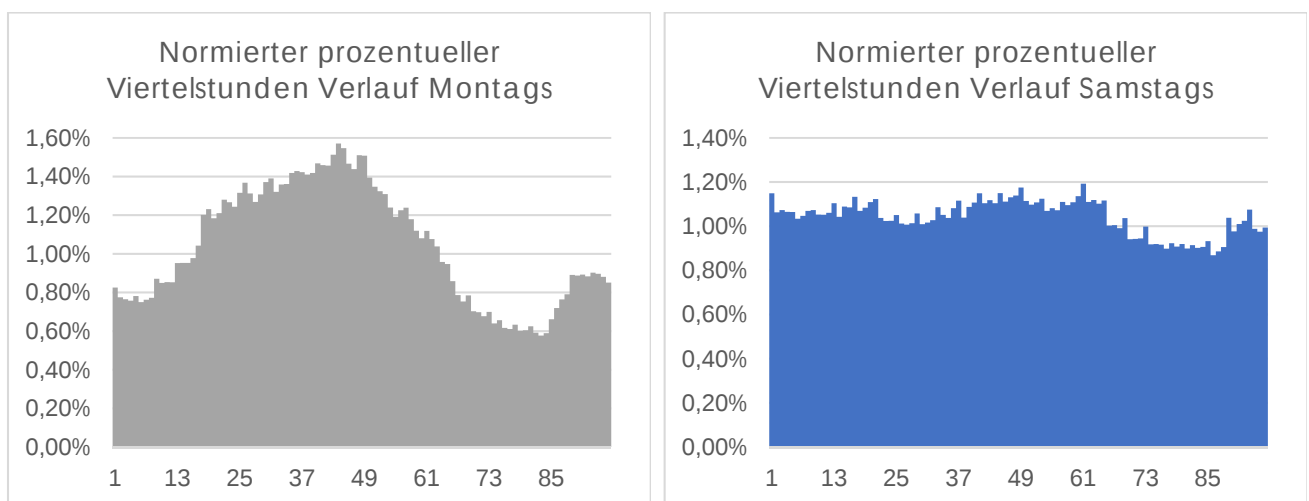


Abbildung 18 – Durchschnittlicher, normierter (Tagesenergiebedarf) Viertelstundenverlauf des elektrischen Leistungsbezugs an Montagen und Samstagen, eigene Auswertung und Darstellung

Fluktuation weiterer Parameter, wie Energiepreise (Strom), Außentemperaturen und Solare Einstrahlung wurden charakteristisch für jedes Monat einmal ermittelt. Für Klimadaten wurden dazu die Mittelwerte in jeder Stunde gebildet aus den Stundenwerte für jeden Tag des entsprechenden Monats aus den Jahren 2017-2019<sup>2</sup>. Als Datengrundlage wurden Klimadaten für den Standort Wien in 10-Minuten Auflösung herangezogen [15]. Für die reinen elektrischen Energiepreise wurden die Preise am Day-Ahead Markt für das Jahr 2019 [9], herangezogen und ebenfalls für jedes Monat Stundenmittelwerte gebildet. Ein gesamtes Jahr wurde aus der Kombination jedes Monats mit jedem der drei typischen Tage auf Produktionsseite nachgebildet. Die einzelnen Kombinationen trugen mit unterschiedlicher Gewichtung zum Gesamtjahr bei. Eine Schwierigkeit bei der Reduzierung des Designoptimierungsproblems auf repräsentative Tage ist der Umgang mit Speichern, deren Charakteristik nicht auf einzelne Tage reduziert werden kann. Die korrekte Integration von Speichersystemen über die gesamte Laufzeit, war ein herausfordernder Aspekt, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

### Simple Period Storage Model

Im Zuge von SINFONIES wurde ein Speichermodell erarbeitet, das eine untertägige Speicherung ermöglicht, ohne dass die Speicherkapazität für jeden Zeitraum des Jahres speziell modelliert werden muss. Dieses Modell basiert auf bestehenden Ansätzen in der Literatur, u.a. van der Heijde et al. [28] und Kotzur et al. [31]. Die adaptierte Formulierung wird in Beck et al. [8] vorgestellt und ist in Abbildung 19 dargestellt.

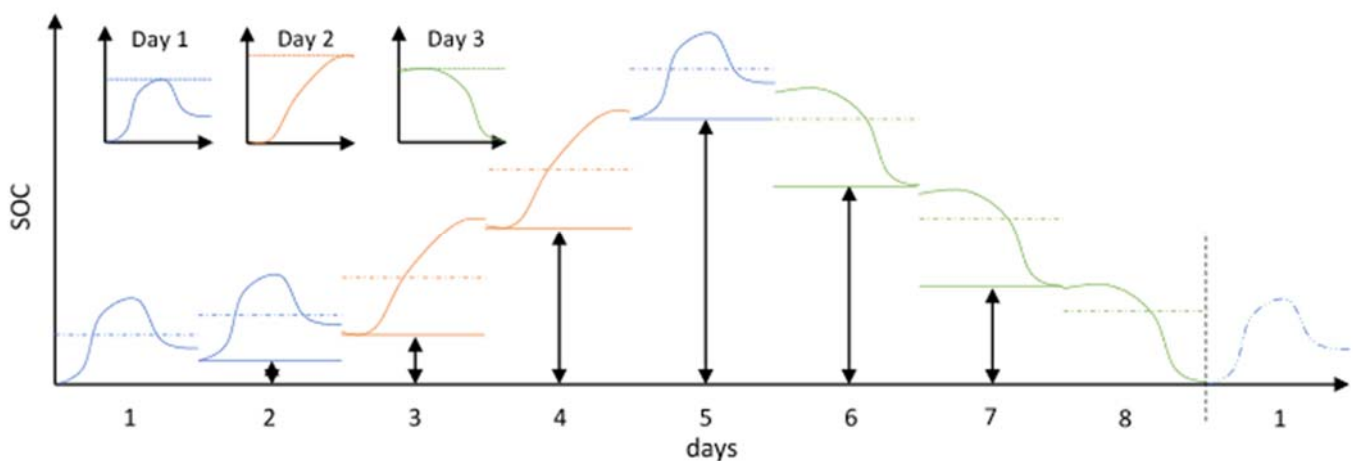


Abbildung 19 - Visualisierung des Mappings und der Speicherbewirtschaftung durch die Formulierung des Simple Period Storage Models (Abbildung gemäß [8])

Wesentlich ist dabei, dass für repräsentative Tage nicht zwingend gefordert wird, dass der Speicherfüllstand zu Beginn und am Ende des Tages ident sein muss. Dieses Kriterium muss jedoch über den gesamten Betrachtungszeitraum (hier ein Jahr) erfüllt sein. Die SOC-Profile für jeden Tag werden so verknüpft, dass der SOC am Ende eines Tages gleich oder größer ist als der SOC zu Beginn des darauffolgenden Tages. Dies bedeutet, dass der Speicher zum Tageswechsel Energie entladen darf. Dies verleiht dem Speicher eine zusätzliche Flexibilität.

<sup>2</sup> Beispiel: für April 02:00-03:00 wurden 3x30 Werte für diese Stunde gemittelt (aus drei Jahren je dreißig Tage im April)

Um die maximale Kapazität des Speichers zu definieren, wird die Differenz des SOC zwischen dem Beginn und dem Ende des Tages für jeden repräsentativen Tag berechnet und über die Reihe von Tagen, die den gesamten Betrachtungszeitraum abbilden, akkumuliert. Der kumulierte SOC zu Beginn des Tages wird zum maximalen SOC des einzelnen Tages addiert (siehe Abbildung unten). Verluste werden auf der Grundlage des durchschnittlichen Tages-SOC berücksichtigt und innerhalb des Tageswechsels vom Speicher-SOC abgezogen.

## 3.4 Evaluierung des kombinierten Ansatzes

Für die Evaluierung des kombinierten Ansatzes wurde ein literaturbasierter Ansatz und ein industriebasierter Ansatz herangezogen, die in Abschnitt 3.1.4 beschrieben wurden.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die wesentlichen Unterschiede bei den zwei gewählten Referenzprozessen, die in den folgenden Abschnitten noch kurz beschrieben werden.

*Tabelle 6 - Überblick über Unterschiede zwischen literaturbasiertem und industriebasiertem Referenzprozess*

|                                                      | Literaturbasiert                                                                                     | Industriebasiert                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Schwerpunkt bzw. berücksichtigte Teilprobleme</b> | HENS und Unit Commitment + Design-Optimierung, Retrofit                                              | Abbildung realer Prozess, zeitlich variable Produktionsmenge, Dekarbonisierung Scheduling, HENS und Unit Commitment               |
| <b>Herausforderung</b>                               | Hohe Komplexität und Rechendauer durch hohe Anzahl an möglichen Kombinationen für Wärmerückgewinnung | Einbindung der Prozesscharakteristika in Form für die Optimierung                                                                 |
| <b>Lösungsansatz</b>                                 | Vereinfachung des Jahres auf einen Tag, für den hohe Komplexität berücksichtigt wird                 | Vereinfachung der realen Prozesse auf das Format, das einem Streamtable für HENS entspricht                                       |
| <b>Durchgerechneter Zeitraum</b>                     | 1 Jahr aus einem Tag nachgebildet                                                                    | 1 Jahr aus Kombination von 1 Produktionstag + je Monat zwei verschiedene äußere Bedingungen nachgebildet                          |
| <b>Zahl der Zeitschritte</b>                         | Gesamt: 24 <ul style="list-style-type: none"> <li>Unit Commitment: 24</li> <li>HENS: 6</li> </ul>    | Gesamt: 8760 vereinfacht: <ul style="list-style-type: none"> <li>Unit Commitment: 3x24x12</li> <li>HENS: 24</li> </ul>            |
| <b>Charakteristika der Prozesse</b>                  | Hohes Wärmerückgewinnungs-Potential durch unterschiedliche Kombination von Hot & Cold Streams        | Batchprozess, zeitliche Flexibilität, hohes Potential für Einbindung von erneuerbaren Technologien und Hochtemperatur-Wärmepumpen |

### 3.4.1 Literaturbasierter Referenzprozess

Beim literaturbasierten Referenzprozess liegt der Fokus darauf, die Features der Teilmodelle für die Synthese des Wärmerückgewinnungssystems und des Energieversorgungssystems umfassend zu demonstrieren. Dementsprechend wurde ein Literaturbeispiel mit einem komplexen Satz an Prozessströmen gewählt. Die Superstructure für das Energieversorgungssystem wurde dazu passend, wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, mit einem Fokus auf erneuerbare Energieträger ergänzt. Ein Kernaspekt des literaturbasierten Referenzprozesses ist auch die Ausgestaltung als Retrofit-Fall. Sowohl das Wärmerückgewinnungssystem als auch das Energieversorgungssystem muss aufbauend auf bestehendem Equipment optimiert werden. Um realitätsnahe Rahmenbedingungen zu bieten, wurden auch Investitionskosten und Betriebsparameter der Versorgungsanlagen sorgfältig recherchiert, wie im Abschnitt 3.1.1 beschrieben.

### 3.4.2 Industriebasierter Referenzprozess

Das kombinierte Modell für den industriebasierten Referenzprozess umfasst, wie auch in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, die Prozessplanung, die Synthese des Wärmerückgewinnungsnetzwerks (Wärmetauscher) und die Synthese des Energieversorgungssystems. Im Vergleich zu Abschnitt 3.4.1 ist ein stärkerer Fokus auf saisonale Änderungen der wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen gelegt. Der Gesamtbetrachtungszeitraum von einem Jahr war deutlich länger gewählt, wodurch auch weitere Maßnahmen zur Vereinfachung der Komplexität notwendig sind (vgl.: repräsentative Tage in Abschnitt 3.3.3). Auch werden zeitliche Änderungen der Produktionshäufigkeit berücksichtigt, da es im Modell Produktionstage, Werktage ohne Produktion und Wochenendtage gibt. Zusätzlich wurden im Vergleich zum zuvor vorgestellten literaturbasierten Referenzprozess bei dem industriebasierten Referenzprozess beim Aufsetzen und Formulieren des Problems folgende Aspekte stärker berücksichtigt, was durch die Charakteristik und Besonderheit des realen Prozesses selbst notwendig wurde:

- Fokus auf thermodynamische realisierbare Integrationspunkte für neue Technologien, wie Dampfspeicher, Wärmepumpen, Geothermie oder Solarthermie
- Erfassen und korrekte Abbildung von komplexen, realen Zusammenhängen und Energieversorgungsinstallationen (z.B. existierende komplexe Ausgangslage für existierende Wärmetauscher in beheizten Behältern)
- Einbindung von Scheduling mit verschiedenen Ansätzen (Planung der einzelnen Prozessschritte mit den zugehörigen Prozessströmen; Beladung von Heißwasserspeicher für Cleaning-in-Place direkt über Scheduling)

## 4 Ergebnisse und Lessons-learned

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse für die zwei betrachteten Referenzprozesse und die Lehren aus dem Projekt dargestellt.

### 4.1 Ergebnisse

Als grundlagenorientiertes Forschungsprojekt war es für das Konsortium wichtig, (Zwischen)Ergebnisse zeitnah zu disseminieren. Dies geschah im Rahmen von Journalpublikationen, Konferenzen und Fachtagungen. Der Fokus lag dabei auf der Vorstellung des kombinierten Optimierungsproblems bzw. von Teilen davon und auf der Darstellung von Anwendungsfällen für die Industrie.

Im Rahmen der Arbeit von Hofmann et al. [7] konnten bereits relevante Erkenntnisse zur Kopplung der Submodelle HENS und Unit Commitment gewonnen werden. In SINFONIES gelang es, das kombinierte Optimierungsmodell bzw. die individuellen Modelle für HENS und Unit Commitment nicht nur um für die Industrie wesentliche Retrofit-Ansätze zu ergänzen, sondern auch die Schedulingformulierung zu integrieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei war eine Formulierung zu wählen, die sowohl als eigenständiges Problem als auch als Teil des kombinierten Optimierungsmodells gelöst werden kann.

Im Folgenden sind die im Rahmen des Projekts entstandenen Publikationen aufgelistet.

#### Journalpublikationen

- Hofmann, R., Panuschka, S., & Beck, A. (2019). A simultaneous optimization approach for efficiency measures regarding design and operation of industrial energy systems. *Computers & Chemical Engineering*, 128, 246-260.
- Halmschlager, D., Beck, A., Knöttner, S., Koller, M., & Hofmann, R. (2022). Combined optimization for retrofitting of heat recovery and thermal energy supply in industrial systems. *Applied Energy*, 305, 117820.
- Beck, A., Knöttner, S., Unterluggauer J., Halmschlager, D., & Hofmann, R. (2022). One-step MILP model for industrial energy system retrofit including process scheduling, heat recovery and energy supply system synthesis. *Energies* (submitted)

#### Konferenzen & Tagungen

- Halmschlager, D., Beck, A., Knöttner, S., Koller, M., & Hofmann, R. (2020). Combined Optimization for Retrofitting of Heat Recovery and Thermal Energy Supply in Industrial Systems. *Energy Proceedings, Volume 08: Proceedings of Applied Energy Symposium: MIT A+B*, United States, 2020.
- Beck, A. (2020). *Einsatz von Optimierungsmodellen zur kostenoptimalen Wärmepumpenintegration*. Chillventa, online.
- Knöttner, S., Beck, A., Halmschlager, D., & Hofmann, R. (2020). *Betriebsoptimierung+ – Wie gekoppelte Optimierungsansätze Flexibilität aufzeigen & Effizienzpotentiale nutzbar machen*. Webinar „Dekarbonisierung der Industrie“, online.

- Inhalte von SINFONIES wurden im Rahmen der Aktivitäten des Annex 15: Industrielle Abwärme der IEA dem TCP IETS disseminiert. So erfolgten internationale Diskussionsschwerpunkte zum Thema Betriebsoptimierung und gekoppelte Optimierungsprobleme im Sub-task 3 des Annex 15 – Task3. Diese können dem internationalen Endbericht des Annex 15-Task 3 nach Veröffentlichung entnommen werden ([www.iea-industry.org](http://www.iea-industry.org)).

### 4.1.1 Literaturbasierter Referenzprozess

Der literaturbasierte Referenzprozess diente im Rahmen von SINFONIES als Basis, um den kombinierten Optimierungsansatz mit einem vergleichsweise umfangreichen Satz von Prozessströmen und Anlagenoptionen im Versorgungssystem zu testen und dabei den Einsatz für Retrofitszenarien aufzuzeigen. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen, war es notwendig, die Parameter des Optimierungsmodells sorgfältig auszuwählen. Dies inkludiert insbesondere Investitionskosten für Wärmerückgewinnungsequipment und Versorgungsanlagen, sowie Effizienzen und Betriebsbeschränkungen der Versorgungsanlagen. Mit dieser Datenbasis als Grundlage wurde aufgezeigt, wie für die Energieversorgung des Referenzprozesses ein Übergang zu (größtenteils) erneuerbaren Energieträgern kosteneffizient möglich ist.

Detaillierte Ergebnisse wurden in Applied Energy [6] publiziert, im Folgenden sind werden ausgewählte Inhalte zusammengefasst. Als Ausgangsbasis wurde ein Versorgungssystem auf Basis Erdgas gewählt, wie es für Industriebetriebe mit einem Energiebedarf in dieser Größenordnung heutzutage typisch ist (siehe Abbildung 20). Dies wurde ergänzt durch ein suboptimales Wärmerückgewinnungssystem (Abbildung 21), das bereits durchgeführte erste Wärmerückgewinnungsmaßnahmen repräsentiert.

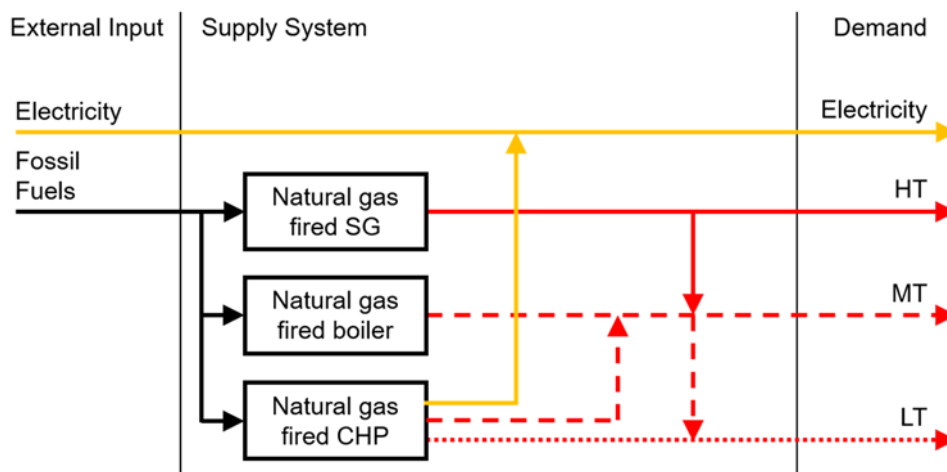


Abbildung 20 – Versorgungssystem des literaturbasierten Referenzprozesses vor Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

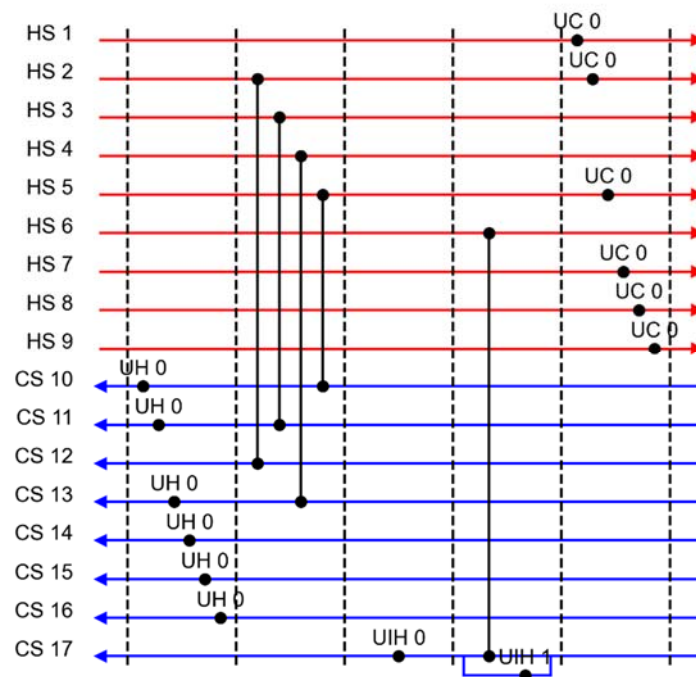


Abbildung 21 – Wärmerückgewinnungssystem des literaturbasierten Referenzprozesses vor Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Die mit diesem Energiesystem kostenoptimale Deckung des Wärme- und Strombedarfs für den literaturbasierten Referenzprozess (siehe Abschnitt 3) ist in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Blockheizkraftwerk (Gas engine CHP) stromgeführt betrieben wird und der Großteil des Wärmebedarfs durch den gasbefeuerten Dampferzeuger bzw. Gaskessel gedeckt wird. Das Fallbeispiel nimmt an, dass diese beiden Aggregate das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und ausgetauscht werden müssen.

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

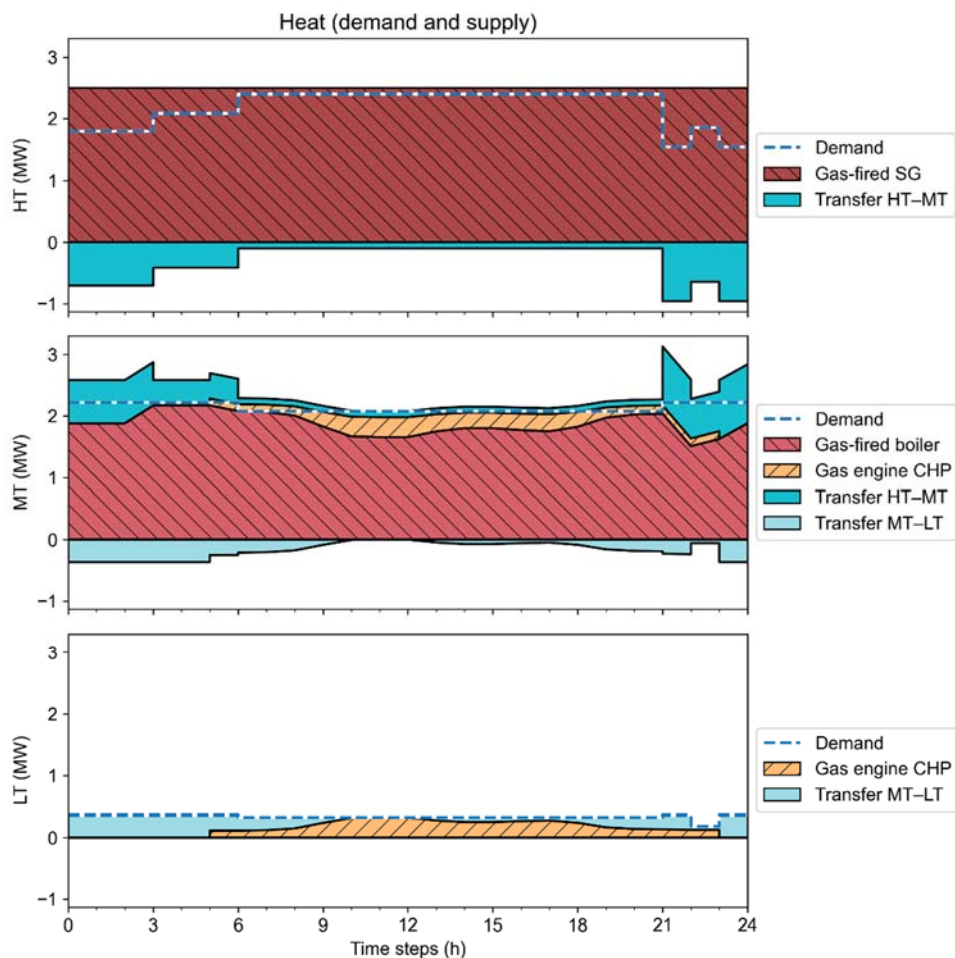


Abbildung 22 – Deckung des Wärmebedarfs des literaturbasierten Referenzprozesses vor Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

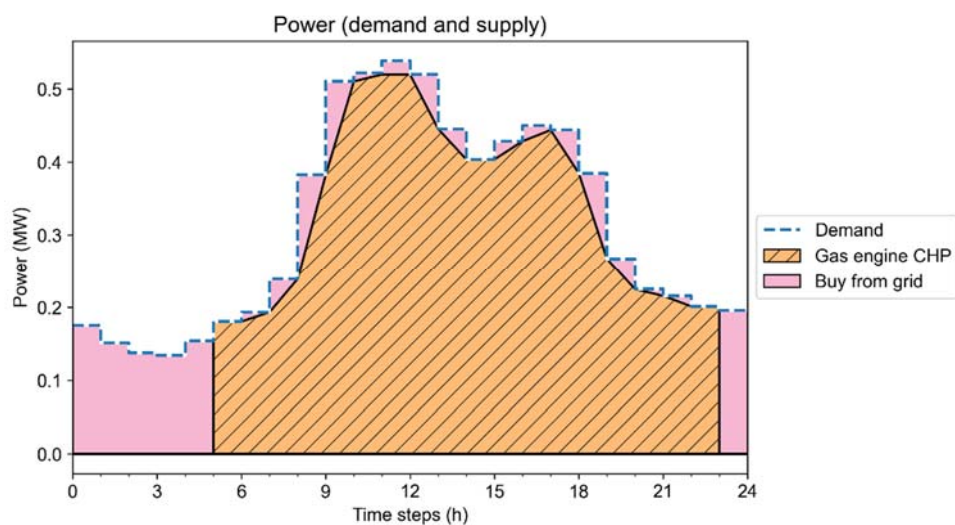


Abbildung 23 – Deckung des Strombedarfs des literaturbasierten Referenzprozesses vor Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Mit dem SINFONIES Ansatz wurde auf Basis der in Abschnitt 3 gezeigten Superstructure die optimale Struktur der neuen Versorgungsanlagen errechnet. Diese sind in Abbildung 24 gelb hervorgehoben. Die jeweils gewählte Anlagengröße ist in Tabelle 7 aufgelistet. Hier zeigt sich, dass neben einigen kleineren Anlagen zur Deckung der Spitzen des Hochtemperaturbedarfs (Elektrodenheizkessel, biomassegefeuerter Dampferzeuger) vor allem die beiden großen Wärmepumpen hervorstechen. Um den dadurch erhöhten Strombedarf zu decken, kommt ein neues Biomethan-Blockheizkraftwerk zum Einsatz und die verfügbare Fläche von 5000 m<sup>2</sup> wird vollständig durch Photovoltaik genutzt.

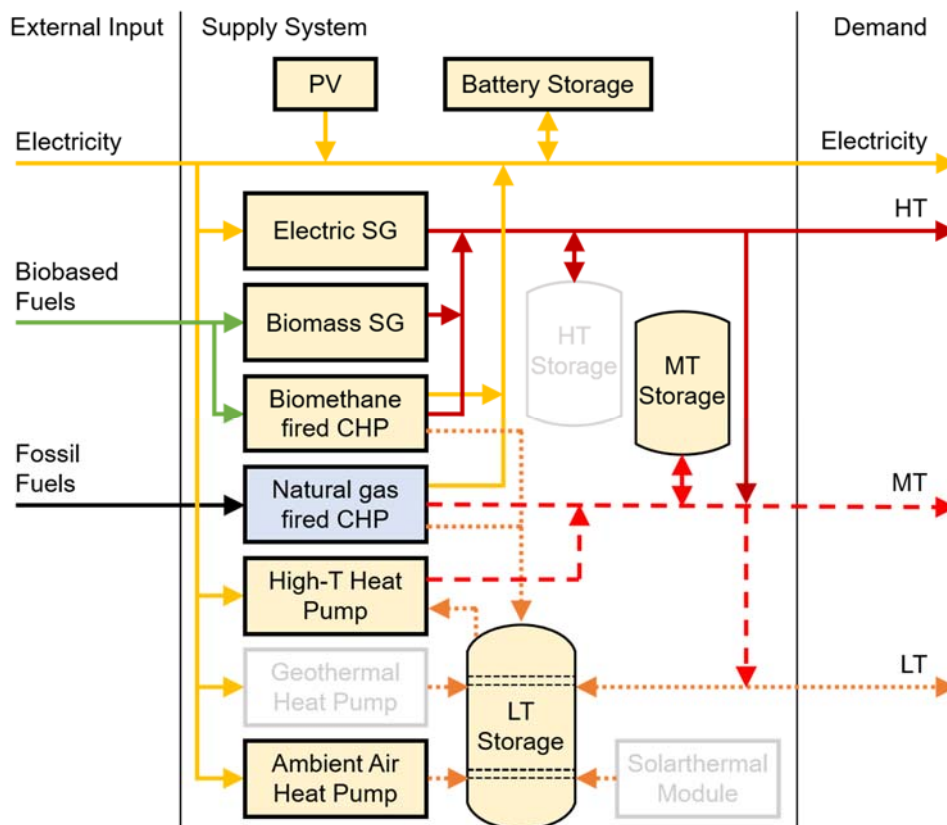


Abbildung 24 – Versorgungssystem des literaturbasierten Referenzprozesses nach Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Tabelle 7 – Überblick über neuen Versorgungsanlagen nach Retrofit im literaturbasierten Referenzprozess

| Anlage                                 | Größe                |
|----------------------------------------|----------------------|
| Biomassegefeuerter Dampferzeuger       | 0,147 MW             |
| Biomethan-Blockheizkraftwerk           | 0,645 MW             |
| Hochtemperatur-Wärmepumpe              | 1,767 MW             |
| Umgebungsluftwärmepumpe                | 0,850 MW             |
| Elektrodenheizkessel                   | 0,1 MW               |
| Photovoltaik                           | 5.000 m <sup>2</sup> |
| Druckbeaufschlagter Heißwasserspeicher | 5,896 MWh            |
| Heißwasserspeicher                     | 0,802 MWh            |
| Elektrischer Batteriespeicher          | 0,087 MWh            |

Das Wärmerückgewinnungssystem (siehe Abbildung 25) wurde deutlich erweitert. Neben der Weiterverwendung von im Bestandsystem vorhandenen Wärmetauschern (5 von 14 Utility-Wärmetauschern und 5 von 5 Prozessstromwärmetauschern) wurden 6 neue Utility-Wärmetauscher und 10 neue Prozessstromwärmetauscher installiert.

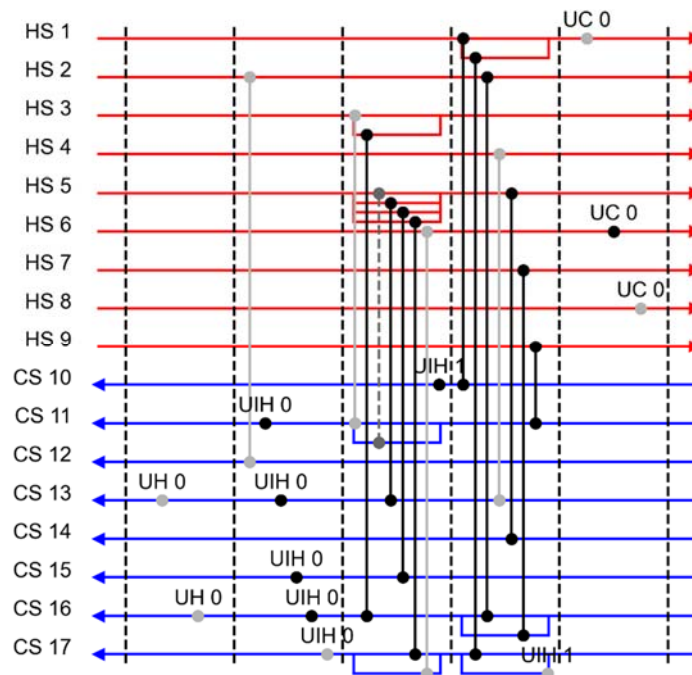


Abbildung 25 – Wärmerückgewinnungssystem des literaturbasierten Referenzprozesses nach Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Das neue Energiesystem mit dem deutlich erweiterten Wärmerückgewinnungssystem und dem größtenteils erneuerbaren Versorgungssystem führt zu deutlich geringeren annualisierten Gesamtkosten (1,36 Mio. € nach Retrofit gegenüber 1,71 Mio. € davor). Aus der Darstellung des Wärmebedarfs (Abbildung 26) ist ersichtlich, dass insbesondere der Hochtemperaturbedarf deutlich gesenkt werden konnte, was versorgungsseitig die Deckung durch alternative Anlagen wie Wärmepumpen vereinfacht.

Hier zeigt sich auch der große Vorteil des kombinierten Ansatzes: würden Wärmerückgewinnungssystem und Versorgungssystem getrennt voneinander optimiert werden, wäre es notwendig Preise für die Wärme auf den verschiedenen Temperaturniveaus zu ermitteln. Da die verschiedenen Temperaturniveaus aber untereinander verknüpft sind und einige Anlagen in mehrere Temperaturniveaus einspeisen, ist die Zuordnung von Wärmepreisen selbst im Nachhinein nicht eindeutig möglich. Eine Festlegung der Wärmepreise vor der Berechnung des endgültigen Bedarfs kann daher immer nur eine grobe Abschätzung sein – im SINFONIES Ansatz ist sie gar nicht erst erforderlich. Außerdem würde eine getrennte Betrachtung von Versorgungs- und Wärmerückgewinnungsseite die Abhängigkeiten zwischen den Anlagen auf den verschiedenen Temperaturniveaus bei der Platzierung der Wärmetauscher nicht berücksichtigen.

Interessant ist zum Beispiel, dass der nächtliche Spitzenbedarf im Mitteltemperaturniveau praktisch vollständig durch einen Wärmespeicher ausgeglichen wird. Dieser wird tagsüber durch die Wärmepumpe kontinuierlich beladen.

Bei der Deckung des Strombedarfs (Abbildung 27) zeigt sich, dass durch die Wärmepumpen und den Elektrodenheizkessel der (interne) Bedarf zwar deutlich gestiegen ist, dieser aber nun vollständig durch Eigenerzeugung gedeckt wird. Neben der Photovoltaikanlage decken die beiden Blockheizkraftwerke den größten Teil des Bedarfs. Gegenüber dem Ausgangsfall läuft das Erdgas-BHKW nun auf Volllast durch, während das Biomethan-BHKW nur während der sonnenreichen Mittagsstunden mit etwas reduzierter Leistung operiert. Ein kleiner Batteriespeicher gleicht die durch die Photovoltaikanlage erzeugten Schwankungen in der Versorgung aus.

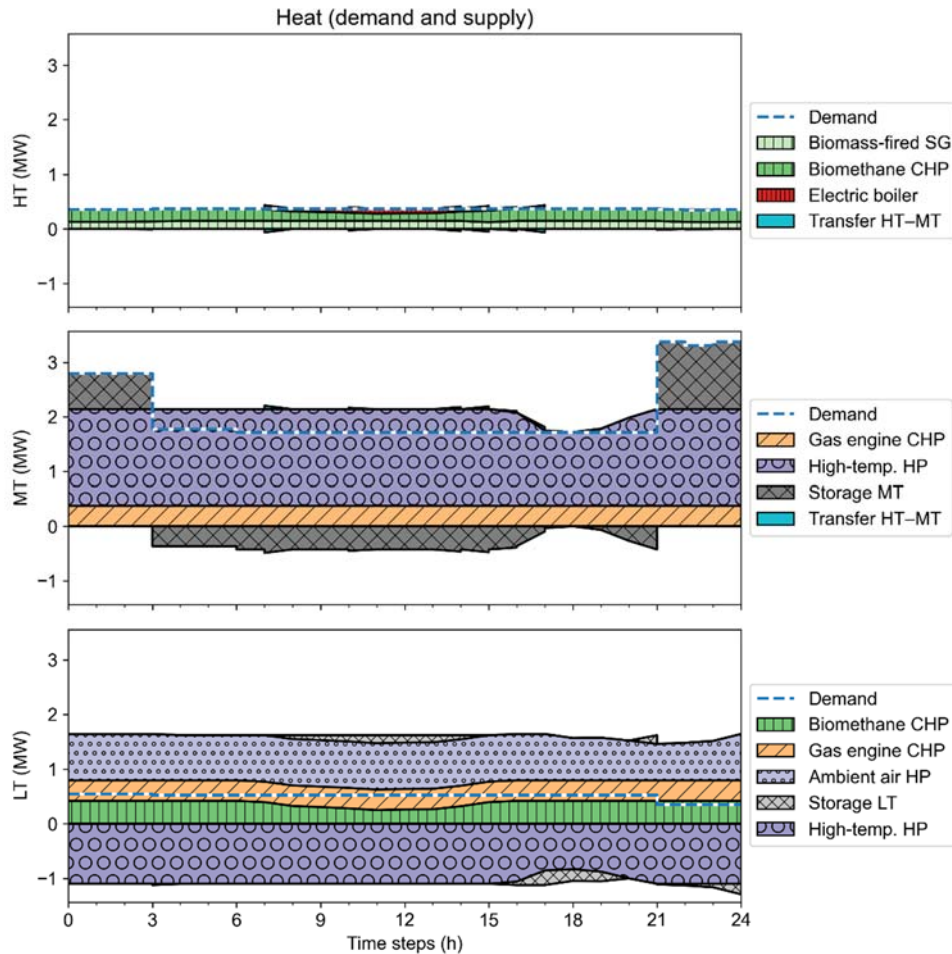


Abbildung 26 – Deckung des Wärmebedarfs des literaturbasierten Referenzprozesses nach Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

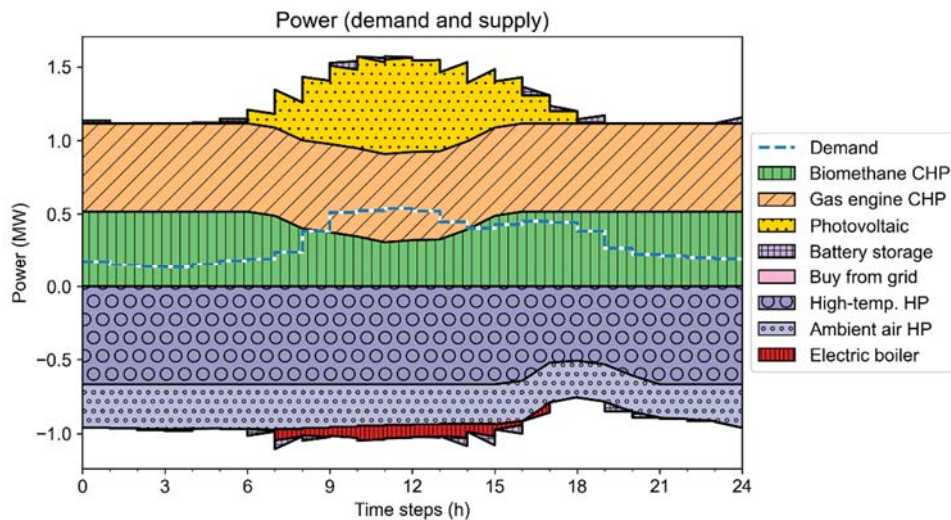


Abbildung 27 – Deckung des Strombedarfs des literaturbasierten Referenzprozesses nach Retrofit (Quelle: Halmschlager et al. [6])

Insgesamt zeigt sich im literaturbasierten Referenzprozess, dass durch die kombinierte Optimierung mit dem SINFONIES Ansatz interessante Lösungen für die Energieversorgung identifiziert werden. Diese zeichnen sich durch die intelligente Kombination von mehreren erneuerbaren Versorgungsanlagen aus, die zusammen einen kosteneffizienten Weg aus fossilen Brennstoffen hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung darstellen können.

## 4.1.2 Industriebasierter Referenzprozess

Im Rahmen von SINFONIES wurden für den industriebasierten Referenzprozess kostenoptimale Änderungen des bestehenden Energiesystems anhand verschiedener Szenarien (Preise und anderen Randbedingungen werden variiert) analysiert. Zudem wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die Grenzkosten für nicht genutzte Technologieoptionen aufzeigt, welche zu ihrer Integration in der optimalen Lösung führen würden. Dadurch wird verdeutlicht wie sensibel das Ergebnis auf die zugrundeliegenden Preise für die Technologien ist, welche tatsächlich dem Markt unterliegen und ihrerseits wieder mit Unsicherheiten behaftet sind. Liegen die Grenzkosten für die Solarthermie z.B. 5% unter den angenommenen Kosten ist Vorsicht geboten da dies innerhalb der möglichen Preisspanne liegt, was bei z.B. 20% nicht der Fall wäre.

Eine detaillierte Analyse wurde bereits publiziert [8]. Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst.

Es wurden über den Status Quo (Szenario 1 – S1) hinaus sieben verschiedene Szenarien betrachtet, die sich mit den Trends auf dem Energiemarkt und den technologischen Entwicklungen für 2020, 2025 und 2030 befassen, siehe Tabelle 8. Für unterschiedliche Startjahre wurden unterschiedliche Preise, sowohl für Energieträger als auch für Investitionen, angenommen. Abbildung 28 gibt einen Überblick über die Existenz und Größe der einzelnen Anlagen (Entscheidungsvariablen in der Designoptimierung) in den berechneten Szenarien.

# Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 8 - Überblick über die berechneten Szenarien

| Szenario | Startjahr | Existierende Anlage | Dekarbonisierungsrate [%] | Netzanschluss [kW] | Kommentar             |
|----------|-----------|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|
| S1       | 2020      | Gaskessel           | 0                         | 100                | Status Quo            |
| S2       | 2020      | Gaskessel           | 0                         | 200                | Preise 2020           |
| S3       | 2025      | Gaskessel           | 0                         | 200                | Preise 2025           |
| S4       | 2030      | Gaskessel           | 0                         | 200                | Preise 2030           |
| S5       | 2020      | Gaskessel           | 25                        | 200                | Dekarbonisierung 25%  |
| S6       | 2020      | Gaskessel           | 50                        | 200                | Dekarbonisierung 50%  |
| S7       | 2020      | Gaskessel           | 100                       | 200                | Dekarbonisierung 100% |
| S8       | 2020      | Keine               | 0                         | 200                | Greenfield            |

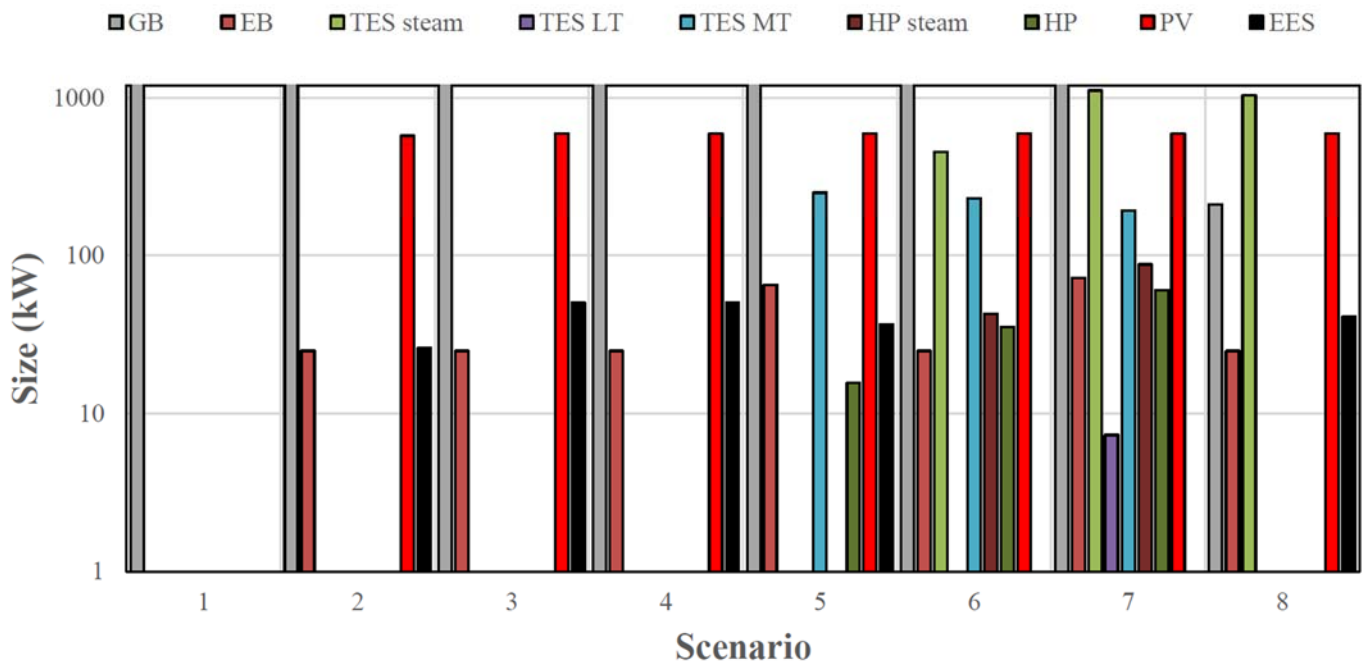


Abbildung 28 - Im Optimierungsmodell bestimmte Größen für die einzelnen Anlagen in den berechneten Szenarien (Quelle: [8])

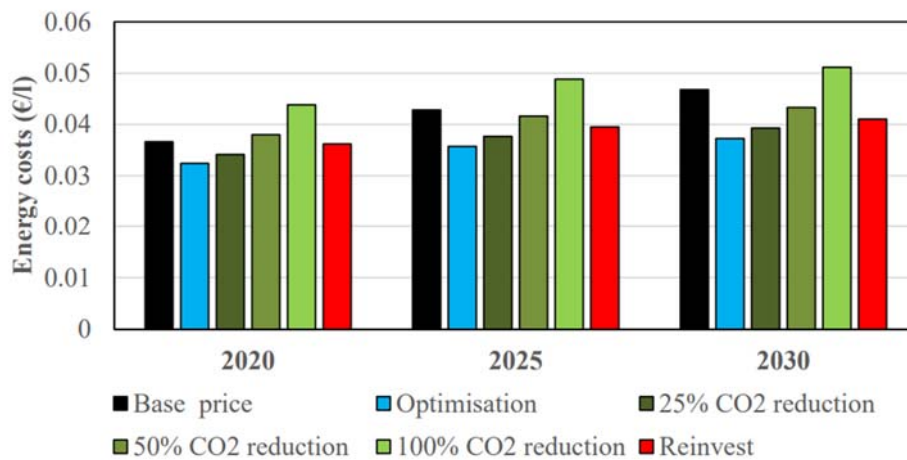
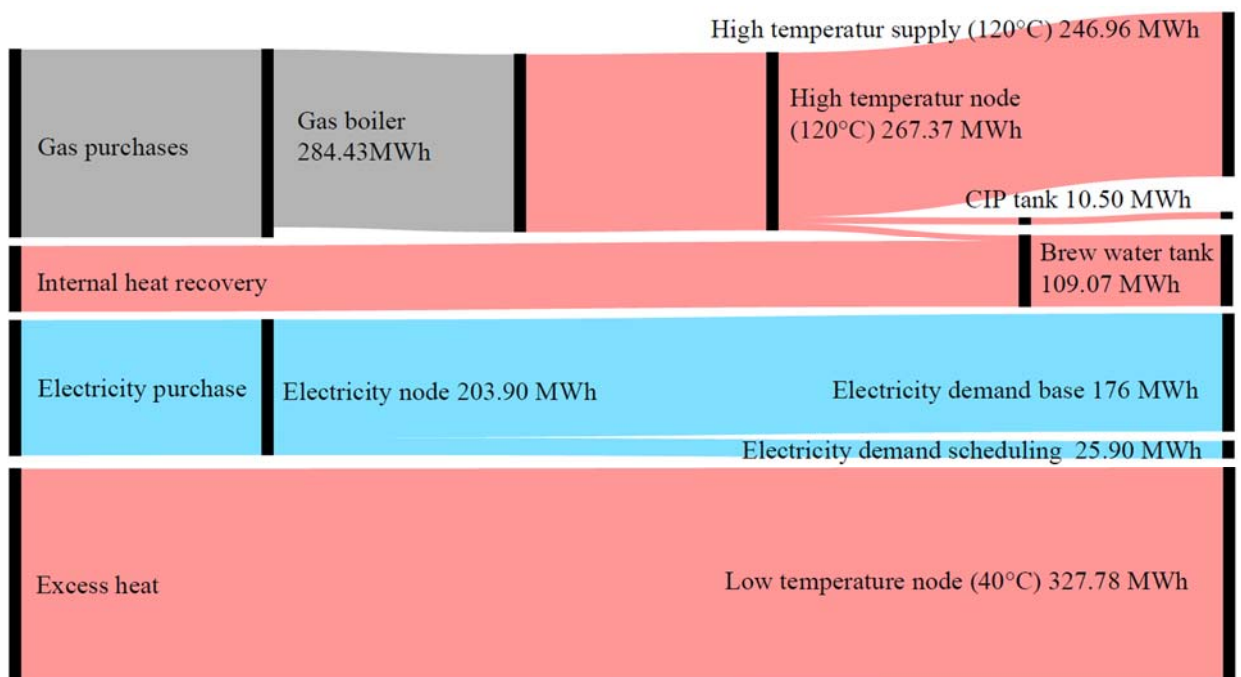


Abbildung 29 – Berechnete Energiekosten je Liter Bier in den berechneten Szenarien (S1 – schwarz, S2-4 – blau, S5 – dunkelgrün, S6 – mittelgrün, S7 – hellgrün, S8 – rot), (Quelle: [8])

Bereits für das Szenario mit Brennstoffpreisen auf dem Niveau von 2020 (S2) beinhaltet das kostenoptimale Ergebnis den Einsatz einer Photovoltaikanlage, eines kleinen Elektrodenheizkessels und einer Batterie. Der wirtschaftliche Nutzen der Kombination dieser drei Einheiten im Vergleich zum Status Quo (S1) nimmt über die Folgejahre zu. Diese Anlagenkombination führt jedoch nur zu einer CO<sub>2</sub>-Reduzierung von etwa 6 %, da die PV die Nachfrage aus dem Stromnetz ersetzt, welches für die Auswertung ebenfalls als CO<sub>2</sub>-neutral angenommen wird. Einen Vergleich für S2 und S3 hinsichtlich der eingesetzten Energieträger und -umwandlungsanlagen liefert Abbildung 30, die Sankeydiagramme für den jährlichen Energieeinsatz zeigt. Wenig Unterschiede zu dem Ergebnis von S2 zeigten die Ergebnisse von S3 und S4, die sich ausschließlich durch abweichende Startjahre und somit andere, nämlich höhere, Kostenparameter von S2 unterschieden.

(a)



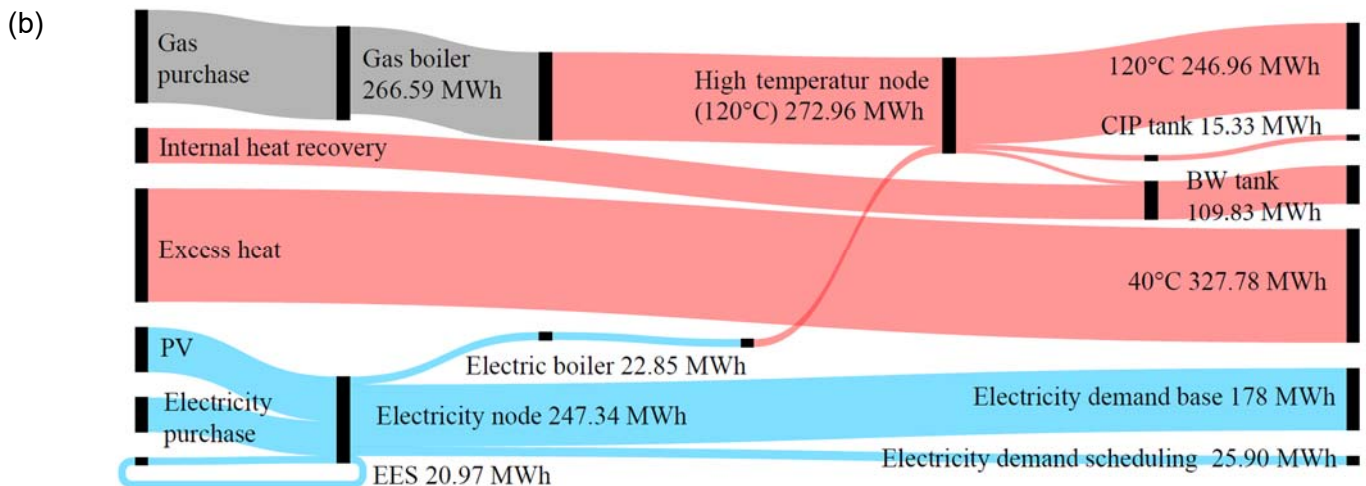


Abbildung 30 – Sankeydiagramm für Szenario 1 (a) und Szenario 2 (b), (Quelle: [8])

Die Berücksichtigung eines End-of-Life-Szenarios für den Gaskessel, was einem *Greenfield-Szenario* (S8) entspricht, führt zur Implementierung eines zusätzlichen Dampfspeichers, ändert aber nichts an der Tatsache, dass andere erneuerbare Energieversorgungseinheiten wie Wärmepumpen zu teuer sind, um wirtschaftlich mit dem Gaskessel konkurrieren zu können.

Drei zusätzliche Szenarien, die eine Mindestanforderung an die Dekarbonisierungsrate vorgeben, zeigen, dass weitere erneuerbare Energieversorgungseinheiten aus der vorgegebenen Superstructure das derzeitige Versorgungssystem substituieren können. Für die 25%ige Reduktion (S5) im Jahr 2020 werden immer noch niedrigere, energiebezogene Kosten als mit dem konventionellen, aktuell bestehenden Versorgungssystem erzielt. Mit der Zeit verstärkt sich der Effekt.

Das 50%ige Reduktionsszenario (S6) zeichnet sich in der Rechnung durch günstigere Erzeugung ab 2025 aus. Im Jahr 2030 ist auf für die 100% Dekarbonisierung die Lücke zwischen den Energiekosten des konventionellen Systems und des zu 100 % aus erneuerbaren Energien erzeugten Biers (S7) geschlossen.

Darüber hinaus ergeben sich weitere, nicht unmittelbar monetär messbare Vorteile. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass der Marketingeffekt von „grün gebrautem Bier“ die zusätzlichen Energiekosten eliminiert, die zudem nicht der treibende Faktor für den Bierpreis sind.

### 4.2 Lessons learned

Im Zuge dieses Projekts hat sich gezeigt, dass nicht nur die mathematische Formulierung des kombinierten Gesamtproblems komplex ist, sondern auch die Implementierung des SINFONIES Ansatzes nicht trivial ist. Der Umgang mit dem entwickelten Code und der notwendigen Infrastruktur zum Implementieren, Testen und Evaluieren gestaltete sich aufwändiger als gedacht. Ohne die konsequente Verwendung der Versionsverwaltung in Git als zentrale Codebasis und konsequente objektorientierte Programmierung, wäre dies fast unmöglich gewesen. Die Implementierung einzelner Teilprobleme und Module wurde zwar teilweise leichter als gedacht bewältigt, das Netzwerkdenken um diese nach den erarbeiteten Schnittstellen korrekt zusammenzuführen, war jedoch definitiv die Kernherausforderung. Da auch die Einzelprobleme in der Implementierung einen großen Umfang haben und nicht leicht zu überblicken sind war die Definition und der Umfang mit konsistenten Inputparametern schwierig.

Im Nachhinein betrachtet, wäre ein strukturiertes Testen des Codes auch schon in der Form von Einzelproblemen hilfreich gewesen. Dies zeigt sich zum Beispiel dadurch, dass bei langen Zeithorizonten in der Speicherintegration plötzlich numerische Fehler aufgetreten sind, die bis hin zur Nichtlösbarkeit des Problems führten. Dieses exemplarische Problem war nicht einfach zu finden und zu korrigieren. Letztendlich konnte eine Skalierung von Einheiten die numerischen Schwierigkeiten lösen.

Eine weitere nennenswerte Erkenntnis im Projekt war, dass der gewählte MILP-Ansatz es nicht mehr ermöglicht, direkte Abhängigkeiten zwischen Parametern (z.B. Investitionskosten) und der Lösung abzuleiten. Die Problemstruktur führt dazu, dass sich Änderungen an Parametern so lange linear auswirken, solange dadurch keine Binärvariablen verändert werden. Insgesamt bedeutet das, dass Sensitivitätsanalysen für die (Kosten-)Parameter aufwändig sind, weil immer das komplette Problem gelöst werden muss. Das bedeutet in weiterer Folge, dass die Lösungsschritte nicht nachvollzogen werden können, da es keine klare Kausalität zwischen Parameteränderungen und der Änderung der Lösung gibt. Dabei ist jedoch anzumerken, dass genau das auch Ziel des Projekts war: Optima in der komplexen kombinierten Formulierung zu finden, die auf den ersten Blick nicht so einfach erkennbar oder nachvollziehbar sind. Letztendlich führt das aber dazu das manuelle Plausibilitätsprüfungen von Lösungen nur schwer möglich sind, bzw. die Ergebnisform und -darstellung geeignet gewählt werden muss, um die Güte der Ergebnisse bewerten zu können.

Wie in Abschnitt 4 dargelegt, liefert der kombinierte Ansatz durchgängig bessere Ergebnisse als sequentielle Rechnungen. Um die volle Stärke dieses Ansatzes auszuspielen, ist jedoch theoretisch perfektes Wissen über Kosten, Anlagen und Betrieb nötig ("perfect foresight"). Besser zugängliche Informationen über reale Kostenkoeffizienten wären dafür essentiell. Wie in Abschnitt 3 präsentiert, wurden Werte für die Evaluierung der Optimierungsansätze bestimmt, die möglichst jenen von realen Industrieprozessen entsprechen. Dies war jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden und erforderte den Zugriff auf Daten diverser Quellen. Eine einfach zugängliche und vollständige Kostendatenbank wäre hier, definitiv auch in anderen Forschungsvorhaben, von großem Vorteil.

### 5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der beiden Referenzprozesse zeigen, dass der kombinierte Optimierungsansatz (SINFONIES-Ansatz) gut geeignet ist kosteneffiziente Wege für den Übergang zu erneuerbarer Versorgung von Industrieprozessen aufzuzeigen. Im literaturbasierten Prozess werden in der Lösung interessante Kombinationen aus verschiedenen erneuerbaren Versorgungsanlagen identifiziert, die im Zusammenspiel mit einem angepassten Wärmerückgewinnungssystem den Prozessbedarf nicht nur nachhaltiger, sondern auch deutlich günstiger, decken. Im industriebasierten Referenzprozess zeigen die verschiedenen Szenarien, wie sich die optimale Versorgung des Brauprozesses unter verschiedenen Annahmen verändert. Besonders interessant ist dabei, wie sich verschiedene Maßnahmen zur Erreichung nationaler und internationaler Klimaziele (z.B. CO<sub>2</sub>-Preise oder erzwungene Reduktion des Treibhausgas-Footprints) auswirken.

Aus Sicht des Projektkonsortiums stellt der kombinierte Optimierungsansatz ein Hilfsmittel dar, dem in der Planung der Versorgung von Industrieprozessen in Zukunft immer größere Wichtigkeit zukommen wird. Nicht nur, weil die zugrundeliegenden Energiesysteme immer komplexer werden, sondern auch, weil sich in Zeiten von sich schnell ändernden Energiepreisen regelmäßig durchgeführte Was-wäre-wenn-Analysen verstärkt notwendig werden.

Gleichzeitig gibt es aber noch einige Herausforderungen zu überwinden. Zuallererst ist die Komplexität der resultierenden Optimierungsmodelle zu nennen. Während viele Fragestellungen heutzutage gut lösbar sind, stößt man mit komplexeren Problemen schnell an eine Grenze, wo gute Lösungen nicht mehr in einer vertretbaren Zeit zu erwarten sind. Interessant dabei ist, dass die Lösungsdauer nicht allein an einfachen Kriterien, wie z.B. die Anzahl an Binärvariablen, ablesbar ist. Interne Abhängigkeiten und die Problemstruktur beeinflussen die Lösungsfindung so stark, dass zum Teil kleine Änderungen ein zuvor „einfach“ lösbares Problem zu nahezu unlösbaren Aufgaben machen.

Optimierungsprobleme in der Größenordnung, wie sie hier dargestellt wurden, haben eine enorme kombinatorische Komplexität. Teilweise tausende Binärvariablen wären durch reines „Brute-Force“-Vorgehen undenkbar zu lösen, die Fortschritte in der Solver-Entwicklung machen diese aber in vielen Fällen zu einem gut handhabbaren Problem. Allein während der Laufzeit dieses Projekts gab es sowohl bei verfügbarer bzw. leistbarer Rechenleistung als auch bei den Solver-Geschwindigkeiten deutliche Fortschritte. Durch die wachsende Problemkomplexität und Integration von weiteren Aspekten in die Optimierungsprobleme ist es aber vergleichsweise einfach, selbst die stärksten Rechner und schnellsten Solver zu überfordern.

Das Projekt-Ziel, eine Methode für den Abbau von Hindernissen bei Investitionsentscheidungen zur Erhöhung des Anteils erneuerbaren Energieträger in Industrieunternehmen zu entwickeln und diese vom Technology-Readiness-Level (TRL) 1 auf TRL 3 anzuheben, wurde mit dem hier vorgestellten SINFONIES-Ansatz erreicht und das Potenzial sowie die Einschränkungen des SINFONIES-Ansatzes wurden aufgezeigt.

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Das übergeordnete Ziel des Projekts SINFONIES war es, Hindernisse bei Investitionsentscheidungen zur Erhöhung des Anteils erneuerbaren Energieträger in Industrieunternehmen abzubauen. Der entwickelte und implementierte Ansatz in Form eines kombinierten Optimierungsproblems lieferte dafür einen essentiellen Beitrag. Um belastbare Grundlagen für Entscheidungsträger zu bieten, sind allerdings, wie dargelegt, noch weitere Hürden zu überwinden. Weitere Forschung und Entwicklung ist nötig, wofür hier die ersten konkreten Schritte präsentiert wurden.

Aus wissenschaftlicher Perspektive können die einzelnen Teilmodelle noch weiterentwickelt werden, vor allem um weitere Möglichkeiten zur Komplexitätsreduktion zu identifizieren. Alternativ können in Zukunft auch noch andere Möglichkeiten der Kopplung der Teilprobleme (z.B. sequenziell-iterativ, oder Clusteridentifikation) evaluiert werden. Interessant könnten in diesem Zusammenhang auch Methoden sein, bei denen die Synthese der Wärmerückgewinnungs- und Energieversorgungssystem nicht ausschließlich durch strikte mathematische Optimierung passiert, sondern auch heuristische Ansätze oder Ansätze des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen. Vorstellbar scheint zum Beispiel die Möglichkeit, dass auf Basis der Lösungen von vielen durchgeführten Optimierungsrechnungen ein neuronales Netz trainiert wird, das zumindest Teile des Systemdesigns übernimmt und damit die verbleibende Problemkomplexität reduziert.

Eine ganz andere Richtung der Weiterentwicklung wäre die Anwendung des SINFONIES-Ansatzes auf mehrere Industriebeispiele aus verschiedenen Branchen. Insbesondere bei der Umsetzung des industriebasierten Referenzprozesses hat sich gezeigt, dass sich die realen Gegebenheiten oft von den Anhand der wissenschaftlichen Literatur entwickelten (Teil)Modellen unterscheiden. Bisher hat sich gezeigt, dass die Abbildung des Industrieprozesses zum Teil entweder noch Anpassungen im Modell oder neuartige Lösungsansätze notwendig gemacht hat. Es ist zu erwarten, dass bei der Abbildung von zusätzlichen realen Prozessen noch weitere Sonderfälle identifiziert werden, die gesondert behandelt werden müssen. Mit steigender Anzahl an implementierten Prozessen kann dann aber davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil der auftretenden Herausforderungen bereits abgebildet wurde.

Für die Praxis von großer Relevanz ist auch die Steigerung der Anwendbarkeit der vorgestellten Methoden. Auch wenn auf modulare Entwicklung Wert gelegt wurde, hat der im Rahmen des Projekts entwickelte Code zu großen Teilen noch prototypischen Charakter. Die Umsetzung von Prozessen geschieht sehr stark durch Bearbeiten von (Konfigurations-)Code. Für eine einfachere Einsetzbarkeit wäre es notwendig, den Code zu einem abgeschlossenen Tool inklusive Anwenderdokumentation weiterzuentwickeln. Dies wurde auch so von den Lol-Gebern angemerkt. Dies umfasst die Festlegung von Beschreibungssprachen für die Falldefinition und Konfiguration sowie die Entwicklung eines einheitlicheren Benutzerinterfaces. Aus Sicht des Projektkonsortiums würde so ein Tool jedoch immer ein Expertentool bleiben und kein breites Anwendertool werden. Dies ergibt sich aus der Komplexität und des umfassenden notwendigen Wissens in vielen Domänen (über den Prozess, über die Beschränkungen der implementierten Modelle, über den mathematischen Lösungsprozess).

Für die weitere Entwicklung in Richtung eines einfach handzuhabenden Tools mit gut interpretierbaren Lösungen inkl. Sensitivitäten wäre zusätzlich zu dem im Projektkonsortium vorhanden Wissen deshalb noch spezifisches Expertenwissen zu mathematischen Details der angewandten Optimierungsalgorithmen von großem Vorteil. Spezifisches Domänenwissen im Bereich industrieller Energiesysteme

bleibt jedoch das Schlüsselkriterium bei der Weiterentwicklung der hier behandelten Ansätze, da nur so eine geeignete Modellierung der Anlagen und Prozesse gewährt werden kann.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das Projekt SINFONIES die Möglichkeiten eines kombinierten Optimierungsansatzes aufgezeigt hat, für eine reale Anwendung desselben in der Industrie jedoch noch einiges an Entwicklungsarbeit notwendig ist.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, European Climate Law, [https://ec.europa.eu/clima/system/files/2020-09/factsheet\\_ctp\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/system/files/2020-09/factsheet_ctp_en.pdf), accessed 22 November 2021.
- [2] European Commission, A Climate Pact for all Europeans, 2020, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS\\_20\\_361](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_20_361).
- [3] C. Dolna-Gruber, Wärmewende - Gastbeitrag: Ein CO<sub>2</sub>-Preis in Österreich, 2021, <https://positionen.wienenergie.at/blog/gastbeitrag-ein-co2-preis-in-osterreich/>, accessed 30 November 2021.
- [4] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021 unter den wärmsten Jahren der Messgeschichte, 2021, <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/2021-unter-den-waermsten-jahren-der-messgeschichte>, accessed 4 January 2022.
- [5] S. Gibbens, Das Wetter von morgen: Warum Hochwasser in Deutschland häufiger werden könnten, 2021, <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2021/07/das-wetter-von-morgen-warum-hochwasser-in-deutschland-haeufiger-werden-koennten>, accessed 4 January 2022.
- [6] D. Halmschlager, A. Beck, S. Knöttner, M. Koller, R. Hofmann, Combined optimization for retrofitting of heat recovery and thermal energy supply in industrial systems, *Applied Energy* 305 (2022) 117820.
- [7] R. Hofmann, S. Panuschka, A. Beck, A simultaneous optimization approach for efficiency measures regarding design and operation of industrial energy systems, *Computers & Chemical Engineering* 128 (2019) 246–260.
- [8] A. Beck, S. Knöttner, J. Unterluggauer, D. Halmschlager, R. Hofmann, One-step MILP model for industrial energy system retrofit including process scheduling, heat recovery and energy supply system synthesis, Submitted to *Energies* (2022).
- [9] Energy Exchange Austria, EXAA-Marktdaten-Historische Daten: 2019, 2021, <https://www.exaa.at/de/marktdaten/historische-daten>, accessed 13 January 2021.
- [10] C. Perez-Linkenheil, Update December 2019 - EU Energy Outlook 2050, 2019, <https://blog.energybrainpool.com/en/update-december-2019-eu-energy-outlook-2050/>, accessed 25 November 2021.
- [11] Energy Brainpool GmbH & Co KG, EU Energy Outlook 2050: Wie entwickelt sich Europa in den nächsten 30 Jahren?, 2021, <https://blog.energybrainpool.com/eu-energy-outlook-2050-wie-entwickelt-sich-europa-in-den-naechsten-30-jahren-3/>, accessed 25 November 2021.
- [12] Central European Gas Hub AG, Exchange Market: Market Data, 2021, <https://www.cegh.at/>, accessed 25 November 2021.
- [13] European Energy Exchange, Marktdaten: Umweltprodukte, 2021, <https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte>, accessed 30 November 2021.

- [14] European Energy Exchange, Marktdaten: Strom, 2021, <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom>, accessed 25 November 2021.
- [15] Universität für Bodenkultur Wien, Aktuelle meteorologische Messwerte, <https://meteo.boku.ac.at/wetter/aktuell/>, accessed 1 February 2021.
- [16] X.G. Zhao, B.K. O'Neill, J.R. Roach, R.M. Wood, Heat Integration for Batch Processes: Part 2: Heat Exchanger Network Design, *Chemical Engineering Research and Design* 76 (1998) 700–710.
- [17] B. Sturm, S. Hugenschmidt, S. Joyce, W. Hofacker, A.P. Roskilly, Opportunities and barriers for efficient energy use in a medium-sized brewery, *Applied Thermal Engineering* 53 (2013) 397–404.
- [18] Brauerei Müggelland, Thermische Bottichmasse bestimmen, 2018, <https://brauerei.mueggelland.de/forum/topic/43.html>, accessed 24 November 2021.
- [19] B. Muster-Slawitsch, M. Hubmann, M. Murkovic, C. Brunner, Process modelling and technology evaluation in brewing, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 84 (2014) 98–108.
- [20] F. Scheer, *Thermal Process Engineering for Brewers*, 2014.
- [21] P. Sattler, *Energiekennzahlen und -sarpotenziale in Brauereien*, 2000, [https://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263981\\_52485923/5311a767/Energiekennzahlen%20und%20Sarpotenziale%20in%20Brauereien.pdf](https://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263981_52485923/5311a767/Energiekennzahlen%20und%20Sarpotenziale%20in%20Brauereien.pdf), accessed 25 November 2021.
- [22] G. Morales-España, C. Gentile, A. Ramos, Tight MIP formulations of the power-based unit commitment problem, *OR Spectrum* 37 (2015) 929–950.
- [23] C. Gentile, G. Morales-España, A. Ramos, A tight MIP formulation of the unit commitment problem with start-up and shut-down constraints, *EURO J Comput Optim* 5 (2017) 177–201.
- [24] A. Beck, R. Hofmann, A sequential approach for integration of multiple thermal energy storages with fixed mass and variable temperature, *Applied Thermal Engineering* 148 (2019) 278–294.
- [25] A. Beck, R. Hofmann, A Novel Approach for Linearization of a MINLP Stage-Wise Superstructure Formulation, *Computers & Chemical Engineering* 112 (2018) 17–26.
- [26] A. Beck, J. Unterluggauer, S. Knöttner, C. Gonzales Niño, J. Guillen Angel, M. Lopez Arias, I. Solis, Optimized waste heat utilization in the steel industry with industrial heat pumps and low-temperature distribution system, in: *Technische Universität Wien, Energy Economics Group (Eds.), 12. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, 2021.
- [27] A. Beck, R. Hofmann, How to tighten a commonly used MINLP superstructure formulation for simultaneous heat exchanger network synthesis, *Computers & Chemical Engineering* 112 (2018) 48–56.
- [28] B. van der Heijde, A. Vandermeulen, R. Salenbien, L. Helsen, Representative days selection for district energy system optimisation: a solar district heating system with seasonal storage, *Applied Energy* 248 (2019) 79–94.
- [29] M. Zatti, M. Gabba, M. Freschini, M. Rossi, A. Gambarotta, M. Morini, E. Martelli, k-MILP: A novel clustering approach to select typical and extreme days for multi-energy systems design optimization, *Energy* 181 (2019) 1051–1063.
- [30] K. Poncelet, H. Hoshle, E. Delarue, A. Virag, W. Drhaeseleer, Selecting Representative Days for Capturing the Implications of Integrating Intermittent Renewables in Generation Expansion Planning Problems, *IEEE Trans. Power Syst.* 32 (2017) 1936–1948.

- [31] L. Kotzur, P. Markewitz, M. Robinius, D. Stolten, Time series aggregation for energy system design: Modeling seasonal storage, Applied Energy 213 (2018) 123–135.

## 8 Kontaktdaten

Univ.-Prof. Dr. René Hofmann  
TU Wien – Institut für Energietechnik und Thermodynamik  
Getreidemarkt 9/BA, 1060 Wien  
+43 1 58801 302327  
[rene.hofmann@tuwien.ac.at](mailto:rene.hofmann@tuwien.ac.at)  
[iet.tuwien.ac.at](http://iet.tuwien.ac.at)

DI Dr. Anton Beck  
AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
Giefinggasse 2, 1210 Wien  
+43 664 88390702  
[anton.beck@ait.ac.at](mailto:anton.beck@ait.ac.at)