

StirliQ+ Komponentenentwicklung des Expansions-Stirling-Generators mit überkritischem Fluid als Arbeits- & Schmiermedium

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zur Mission „Klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Katrin Bolovich

Kontakt zu „Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Dipl.-Ing. Günther Holzer (Prozess Optimal CAP GmbH)

Dr. techn. Christof Bernsteiner (4ward Energy Research GmbH)

Wien, 2026. Stand: Jänner 2023

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und Klima- und Energiefonds (KLIEN). Im Rahmen dieses Schwerpunkts werden Forschung, Entwicklung und Demonstration von Technologien und Innovationen gefördert, mit dem Ziel, einen essentiellen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Gebäuden, Quartieren und Städten zu liefern. Gleichzeitig wird dazu beigetragen, die Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie die wirtschaftliche Standortattraktivität in Österreich zu erhöhen. Hierfür sind die Forschungsprojekte angehalten, einen gesamtheitlichen Ansatz zu verfolgen und im Sinne einer integrierten Planung – wie auch der Berücksichtigung aller relevanten Bereiche wie Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Berücksichtigung von gebauter Infrastruktur, Mobilität und Digitalisierung – angewandte und bedarfsorientierte Fragestellungen zu adressieren.

Um die Wirkung des FTI-Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ zu erhöhen, ist die Verfügbarkeit und Verbreitung von Projektergebnissen ein elementarer Baustein. Durch Begleitmaßnahmen zu den Projekten – wie Kommunikation und Stakeholdermanagement – wird es ermöglicht, dass Projektergebnisse skaliert, multipliziert und „Von der Forschung in die Umsetzung“ begleitet werden. Daher werden alle Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhalt

Vorbemerkung	4
1 Kurzfassung	7
2 Abstract	9
3 Projektinhalt	11
3.1 Ausgangslage.....	11
3.2 Methodik.....	13
3.3 Prozesskonzept	14
3.4 Allgemeine Berechnungsgrundlagen	15
3.4.1 Thermodynamische Grundlagen.....	15
3.4.2 Wirkungsgradberechnung.....	17
3.5 Simulationsumgebung	17
3.5.1 Aspen HYSYS.....	18
3.5.2 DWSIM.....	20
3.5.3 Python	21
4 Ergebnisse	23
4.1 Modellergebnisse der Prozess-Thermodynamik.....	23
4.1.1 Modellentwicklung in Aspen HYSYS.....	23
4.1.2 Ergebnisse von Aspen HYSYS und DWSIM im Vergleich	24
4.1.3 Herausforderung bei der Abbildung instationärer Prozesse.....	26
4.1.4 Modellergebnisse mit Python	27
4.2 Optimierung der Prozess-Thermodynamik.....	29
4.3 Detailengineering der Anlagenkomponenten.....	34
4.3.1 Optimierung und Gestaltung der Wärmeübertragungsflächen.....	34
4.3.2 Minimierung der Leckageverluste im Axialkolbenmotor.....	37
4.4 Versuchsaufbau im Labormaßstab	39
4.5 Versuchsdurchführung und -auswertung	41
4.6 Messergebnisse.....	42
4.7 Integration in übergeordnete Energiesysteme.....	45
4.7.1 Anwendungsszenario 1: Einfamilienhaus mit Biomassefeuerungsanlage und Fußbodenheizung	46
4.7.2 Anwendungsszenario 2: Integration des Aggregats in ein Fernwärmesystem.....	48
4.7.3 Fazit: Thermodynamische Kriterien & Rahmenbedingungen zur Integration des Aggregats in übergeordnete Systeme	48
4.8 Beitrag zum Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“	49
5 Schlussfolgerungen.....	51
6 Ausblick und Empfehlungen.....	53
Tabellenverzeichnis	55
Abbildungsverzeichnis	56

Literaturverzeichnis.....	57
Abkürzungen.....	59
Anhang	60
Data Management Plan (DMP)	61

1 Kurzfassung

Im Projekt StirliQ+ wurde die seit 2016 erforschte StirliQ-Technologie weiterentwickelt, die thermische Energie im Niedertemperaturbereich ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) nutzbar machen soll. Gekoppelt mit einem Generator wird dabei die thermische Energie in elektrische umgewandelt. Der StirliQ-Motor basiert auf dem Prinzip des Stirling-Motors, verwendet jedoch kein gasförmiges oder flüssiges Arbeitsmedium, sondern ein überkritisches Fluid. Besonders überkritisches CO_2 zeigt in diesem Bereich außergewöhnliche Eigenschaften, wie eine geringe spezifische Wärmekapazität und eine sehr hohe reziproke isotherme Kompressibilität. Bereits im Vorprojekt konnte gezeigt werden, dass der StirliQ-Motor gegenüber der konventionellen Stirling-Technologie deutliche Effizienzvorteile bietet.

Ziele des Projekts waren die Kostenoptimierung, die Maximierung des Wirkungsgrads gemäß physikalischen Rahmenbedingungen, die Langzeitlaufstabilität und die Leistungsregelung. Zur Erreichung dieser Ziele wurde eine neuartige Prozessführung auf Basis eines Axialkolbenmotors im Projekt untersucht.

Komponentenentwicklung und Simulation

Im Rahmen der Komponentenentwicklung wurden zentrale Bauteile für den Betrieb mit überkritischem CO_2 konzipiert, angepasst und gefertigt. Hierzu zählen die Wellendichtung, die Kolbenringe sowie die Ventilplatte, um schließlich die Spaltverluste durch Leckage zu minimieren. Im Projekt wurde ein einfaches Berechnungsmodell auf Gesetzmäßigkeiten von Hagen-Poiseuille entwickelt, dessen Berechnungsergebnisse zur Optimierung der oben genannten Bauteile herangezogen wurden.

Parallel wurde ein Simulationsmodell in Aspen HYSYS sowie DWSIM erstellt, um verschiedene thermodynamische Betriebspunkte des Prozesses abzubilden. Ein zusätzlich entwickeltes Python-Modell lieferte erweiterte Einblicke in die Prozessführung und ermöglichte insbesondere unter variablen Betriebsbedingungen eine realitätsnahe Abbildung des StirliQ-Prozesses. Mit diesem, im Projekt entwickelten Python Modell, wurden unterschiedliche Betriebsfenster (Druck, Temperatur, etc.) untersucht, was zu wichtigen Erkenntnissen für die Effizienzsteigerung führte. Unter gewissen Rahmenbedingungen wurde neben CO_2 als Arbeitsmedium auch R32 für die Evaluierung der Technologie in übergeordneten Systemen betrachtet. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass unterschiedliche Temperaturniveaus unter Umständen unterschiedliche Arbeitsmedien zur Maximierung des Wirkungsgrades verlangen.

Integration in Energiesysteme

Zur Integration der StirliQ-Anlage in übergeordnete Energiesysteme wurden zwei Anwendungsszenarien analysiert. Ziel war die Nutzung bisher ungenutzter Abwärmequellen zur Bereitstellung

elektrischer Energie. Hierbei wurden unterschiedliche thermodynamische Randbedingungen sowie Lastprofile berücksichtigt, um unter anderem die jährlich erzeugbare elektrische Energie des StirliQ+ Anlage abzuschätzen. Bezüglich einer realen Umsetzung eine StirliQ-Anlage wurden Rahmenbedingungen erarbeitet, die für die Integration des StirliQ-Motors in jedem Fall beachtet werden sollten.

Versuche und Optimierung

Für die Laboranlage wurde ein Prozessleitsystem mit Messdatenerfassung entwickelt. Dies umfasste die Visualisierung von Prozess- und Messdaten, ein PID-basiertes Mess-, Regel- und Steuungskonzept sowie die Erweiterung der Messtechnik durch Soft-Sensor-Strategien. Erste Versuche dienten der Überprüfung der Bauteile hinsichtlich Dichtheit und Leckage. Die am Prüfstand durchgeführte Parameterstudien konnten grundsätzlich die Funktionstüchtigkeit StirliQ-Prozessführung nachweisen und eine Optimierung der Startmasse des Arbeitsmediums zulassen.

Ausblick

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse erscheint die Realisierung eines Demonstrationsprojekts grundsätzlich vielversprechend. Chancen liegen insbesondere in der hohen Flexibilität des Systems, seiner Skalierbarkeit und der Möglichkeit, vorhandene Technologien (z. B. Standardwechselrichter) zu nutzen. Herausforderungen und Risiken bestehen vor allem in der Sicherstellung der Langzeitstabilität sowie in der Validierung der Technologie unter wechselnden und realen Einsatzbedingungen.

2 Abstract

In the StirliQ+ project, the StirliQ technology, researched since 2016, was further developed to harness thermal energy in the low-temperature range ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Coupled with a generator, the system converts thermal energy into electricity. The StirliQ engine is based on the Stirling engine principle, but instead of using a gaseous or liquid working medium, it operates with a supercritical fluid. Supercritical CO_2 , in particular, exhibits exceptional properties in this range, such as low specific heat capacity and very high reciprocal isothermal compressibility. The preceding project already demonstrated that the StirliQ engine offers significant efficiency advantages over conventional Stirling technology.

The project objectives were cost optimization, maximizing efficiency within physical limits, ensuring long-term operational stability, and enabling power control. To achieve these goals, a novel process design based on an axial piston engine was investigated.

Component development and simulation

As part of component development, key parts for operation with supercritical CO_2 were designed, adapted, and manufactured. These included the shaft seal, piston rings, and valve plate, aimed at minimizing clearance losses caused by leakage. To support this, a simple calculation model based on Hagen-Poiseuille principles was developed, and its results were used to optimize the above components.

In parallel, simulation models were created in Aspen HYSYS and DWSIM to represent various thermodynamic operating points of the process. An additional Python model provided deeper insights into process design and enabled realistic simulations of the StirliQ process under variable operating conditions. Using this Python model, different operating windows (pressure, temperature, etc.) were investigated, leading to key findings for improving efficiency. Under certain conditions, R32 was also considered alongside CO_2 as a working medium to evaluate the technology in broader system contexts. For example, it was shown that different temperature levels may require different working media to maximize efficiency.

Integration into energy systems

To assess integration of the StirliQ system into larger energy systems, two application scenarios were analyzed. The aim was to utilize previously untapped waste heat sources to generate electricity. Various thermodynamic boundary conditions and load profiles were considered to estimate, among other factors, the annual electrical energy output of the StirliQ+ system. For future real-world implementation, framework conditions were defined that should be taken into account when integrating the StirliQ engine.

Experiments and optimization

A process control system with data acquisition was developed for the laboratory plant. This included visualization of process and measurement data, a PID-based control and regulation concept, and the extension of measurement capabilities through soft-sensor strategies. Initial experiments focused on verifying component tightness and leakage resistance. Parameter studies conducted on the test bench confirmed the basic operability of the StirliQ process and allowed optimization of the initial working fluid mass.

Outlook

Based on the results so far, the realization of a demonstration project appears highly promising. Key opportunities lie in the system's high flexibility, scalability, and the possibility of integrating existing technologies (e.g., standard inverters). The main challenges and risks concern ensuring long-term stability and validating the technology under changing and real-world operating conditions.

3 Projekinhalt

Im Folgenden wird auf den Projekinhalt näher eingegangen. Hierin wird die Ausgangslage beschrieben und die Methodik vorgestellt, um anschließend das Prozesskonzept und die theoretischen Grundlagen kurz zu erläutern. Schließlich werden die Simulationsumgebungen vorgestellt, die für die Berechnung und theoretische Optimierung der StirliQ-Anlage herangezogen wurden.

3.1 Ausgangslage

Der StirliQ-Motor wird seit 2016 von Prozess Optimal CAP GmbH erforscht. Die besondere technische Neuheit des StirliQ-Motors ist, dass dieser im Vergleich zum herkömmlichen Stirling-Motor weder mit einem gasförmigen noch mit einem flüssigen, sondern mit einem überkritischen Fluid¹ als Arbeitsmedium arbeitet. Das in diesem Projekt hauptsächlich betrachtete Medium ist dabei überkritisches CO₂.

Durch die positiven Stoffeigenschaften die CO₂ zu den ausgewählten Betriebsbedingungen besitzt, kann dieser Motor auch schwer nutzbare Abwärme von weit unter 100 °C wirtschaftlich verstromen. Als Expansionsmaschine mit geringer Drehzahl arbeitet der StirliQ-Motor zudem sehr verschleißarm und kann im großen Ausmaß mit Standardkomponenten aufgebaut werden. Der Betrieb der zwei Laboranlagen im Zuge von StirliQ hat die Konkurrenzfähigkeit der Technologie bewiesen. In Abbildung 1 ist der Wirkungsgradverlauf des StirliQ-Motors tabellarisch als auch grafisch dargestellt.

Die Versuchsdaten bestätigten, dass der effizienteste Startpunkt des StirliQ-Prozesses knapp über dem kritischen Punkt liegt. Wie im Temperatur-Entropie-Diagramm (T-S-Diagramm) erkennbar (siehe Abbildung 2), verlaufen die Isobaren (konstanter Druck) in diesem Bereich engmaschig und sehr flach, während die Isochoren (konstantes Volumen) einen schnellen Druckanstieg bei Temperaturerhöhung zeigen. Die Messergebnisse aus dem Vorgängerprojekt StirliQ zeigen außerdem, dass der Prozess gut skalierbar ist. In die Laboranlage wurden Standardkomponenten verbaut, die einerseits in ihrer Dimension gut skalierbar sind und andererseits auch modular in der Anzahl er-

¹ Überkritische Fluide bzw. Medien sind Stoffe, die eine Mischform aus flüssigen und gasförmigen Aggregatzuständen aufweisen und dabei die Eigenschaften, des jeweilig anderen Aggregatzustandes annehmen können. Ein solcher Zustand wird erreicht, wenn das Medium dessen kritische Temperatur sowie kritischen Druck überschreitet. Er kommt in der Natur nur selten vor und wird in der Regel nur durch technische Anlagen ermöglicht.

weitert werden können. Theoretisch ist der Einsatz der StirliQ-Technologie auch im Hochtemperaturbereich denkbar. Dies würde den Carnot-Wirkungsgrad erhöhen – allerdings auch die materialtechnischen Anforderungen.

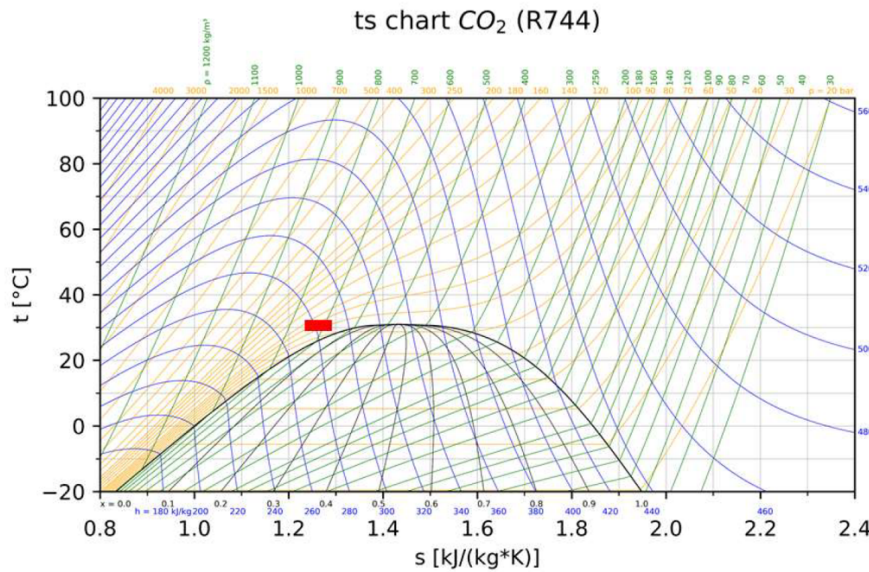
Abbildung 1: Wirkungsgrad des StirliQ-Motors aus dem Vorgängerprojekt.



Aus den Ergebnissen des vorangegangenen Projekts wurde Optimierungsbedarf in den Herstellungskosten, im Wirkungsgrad, in der Langzeitlaufstabilität sowie in der Leistungsregelung festgestellt. Daraus ließ sich das Projektziel ableiten, dass auf Basis der bisherigen Entwicklungsschritte ein nahezu wartungsfreier, langsam drehender Expansions-Generator konzipiert und erforscht wird. Die Verwendung eines überkritischen Fluids als Arbeits- und Schmiermittel ermöglicht eine Absenkung der Wärme-Grenztemperatur, was wiederum die technischen Hürden herkömmlicher Stirling-Motoren senkt. Zusammengefasst wurden insbesondere folgende Inhalte im StirliQ+ Projekts untersucht.

- I. Definition der grundsätzlichen Geometrie des Expansionsraums und des Wärmeeintrages.
- II. Exakte Definition eines sinnvollen Gleichgewichts zwischen dem Druckverlust der beiden Wärmeübertragungsfluide sowie der Apparategröße, um den StirliQ-Wirkungsgrad zu maximieren.
- III. Definition des Expansionsfluides und des damit einhergehenden Wärmetauscher-Werkstoffes.
- IV. Erarbeitung bzw. Entwicklung einer Prozesssteuerung
- V. Erhöhung der Systemdichtheit
- VI. Entwicklung von Integrationsmöglichkeiten in ein übergeordnetes Energiesystem

Abbildung 2: T-S-Diagramm von CO₂ mit dem effizientesten Startpunkt (rote Markierung).



3.2 Methodik

Das Projekt StirliQ+ zielt darauf ab das im vorangegangenen Projekt erarbeitete Konzept zu optimieren und darüber hinaus im Labormaßstab aufzubauen und zu testen. Hierzu gehört zum einen die Entwicklung wesentlicher Bestandteile des Systems (z.B. Dichtigkeit des Kolbens und Wärmetauscher) und die Optimierung des Betriebs mit Hilfe von Prozesssimulationen. Des Weiteren ist neben der Weiterentwicklung des Systems auch die Auseinandersetzung mit der Integration des StirliQ-Prozesses in übergeordnete Systeme Bestandteil des Projekts.

Im **ersten Schritt** wurde eine **Markt- und Literaturrecherche** durchgeführt, um Systemkomponenten auszuwählen, die für den StirliQ-Prozess notwendig sind. Ein großer Fokus wurde dabei auf die Verwendung von handelsüblichen Komponenten für den Aufbau der StirliQ-Anlage gelegt.

Im **zweiten Schritt** wurde der **StirliQ-Prozess thermodynamisch in verschiedenen Softwareumgebungen abgebildet**. Auf Basis der Prozessmodelle wurde die StirliQ-Anlage optimiert und weiterentwickelt. Die Anwendung computergestützter Prozessmodelle ermöglichte insbesondere ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen und thermodynamischen Phänomene. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage, um die Bauteile der Anlage gezielter an die spezifischen Betriebsbedingungen anzupassen und deren Leistungsfähigkeit weiter zu optimieren. Für die Simulation dieser Prozesse wurde in erster Linie Aspen HYSYS herangezogen, die eine kommerzielle Softwareumgebung darstellt und im Bereich der Prozessentwicklung eine führende Rolle einnimmt. Um jedoch den Zugang zur wissenschaftlichen Community zu bilden, wurde neben der

kommerziellen auch die Open-Source Softwareumgebung DWSIM verwendet. Beide wurden anschließend miteinander verglichen. Erste Ergebnisse beider Umgebungen zeigten jedoch eine unzureichende Abbildung der überkritischen und instationären Strömung, was sich durch divergente Effekte in den Ergebnissen zeigte. Dies machte es notwendig, zusätzlich zum geplanten Projektumfang ein Modell in Python zu entwickeln, das ein noch realitätsgetreueres Verhalten abbilden konnte.

Parallel zu den computergestützten Untersuchungen wurde **im dritten Arbeitsschnitt** eine **Laboranlage** mit optimierten Komponenten aufgebaut. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Simulationen und der daraus entwickelten Komponenten, wurde ein Versuchsplan entworfen und untersucht, in dem die Startmasse des Arbeitsmediums so optimiert, dass der Wirkungsgrad maximiert wurde. Darüber hinaus zeigen die Versuchsergebnisse qualitativ eine Übereinstimmung mit den simulierten Werten.

Im **vierten und letzten Schritt** wurden Kriterien und Rahmenbedingungen erarbeitet, die für die **Integration in übergeordnete Systeme** auf jeden Fall berücksichtigt werden müssen. Darin wurden die Druckentlastung bzw. Überdrucksicherung, Sensorik- und Anlagenüberwachung, Leckageerkennung und Raumlufthüberwachung, Raumbelüftung und Aufstellbedingungen, mechanischer Schutz und dessen Kennzeichnung, die Dokumentation, Wartung und Schulung, Umweltaspekte und Nachhaltigkeit in Betracht gezogen. Des Weiteren wurden zwei Anwendungsszenarien simuliert, um ungenutzte Abwärme in elektrische Energie umzuwandeln. Hierfür wurden ein Einfamilienhaus sowie ein Fernwärmesystem mit unterschiedlichen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen und Lastkurven betrachtet.

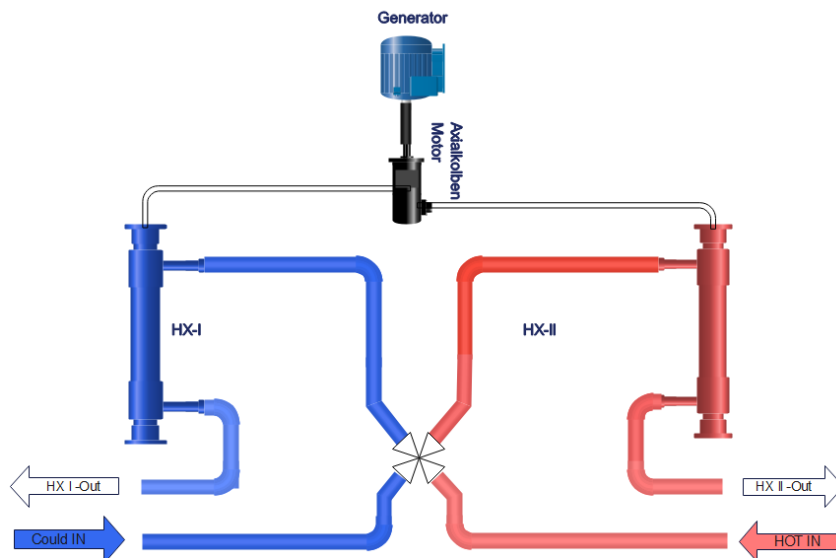
3.3 Prozesskonzept

In Abbildung 3 ist das Prozesskonzept aufgezeichnet. Aus einer Wärmequelle (HOT IN) kommt ein heißes Fluid, das im Rohrwärmetauscher HX-II das überkritische CO₂ erhitzt. Die restliche Wärme wird über HX-II OUT wieder an die Wärmequelle zurückgeführt. Auf der anderen Seite wird über eine Wärmesenke ein kaltes Fluid (Cold IN) in den zweiten Rohrwärmetauscher (HX-I) zugeführt und kühlt dort überkritisches CO₂ herab. Bei einem entscheidenden Druckunterschied beginnt der Axialkolbenmotor seinen Turbinen-Betrieb und treibt den Generator zur Stromerzeugung an. Durch die Expansion des überkritischen CO₂ aus HX-II, reduziert sich die darin enthaltene Temperatur. Im Ventil selbst, sinkt die Temperatur nochmals durch den Joule-Thomson-Effekt. In das gekühlte CO₂-Reservoir HX-I strömt somit ein kaltes überkritisches CO₂. Der Wärmetauscher gibt ein Teil seiner Inertenergie² an das expandierende CO₂ ab, wodurch die Temperaturreduktion durch

² Während eines Zyklus wird das Arbeitsmedium erwärmt oder gekühlt. Die Masse des Wärmetauschers erfährt währenddessen eine ähnliche Temperaturänderung, wobei die darin gespeicherte Wärmeenergie „Inertenergie“ genannt und für den Prozess nutzbar gemacht werden kann.

Enthalpieänderung und den Joule-Thomson-Effekt geringer ausfällt. Schließlich muss für die Erwärmung des überkritischen CO_2 im Reservoir HX-I im darauffolgenden Zyklus weniger Energie aufgewendet werden.

Abbildung 3: Prozesskonzept in diskontinuierlicher Betriebsweise (übernommenes Konzept)



Durch Umschalten des 4-Wege-Ventils endet somit der erste kontinuierliche Prozessschritt. Nun wird analog zum ersten Prozessschritt HX-I erhitzt und HX-II gekühlt.

3.4 Allgemeine Berechnungsgrundlagen

Im Folgenden wird beschrieben, wie der Prozess thermodynamisch abgebildet und der Wirkungsgrad zum Vergleich der Simulations- mit Messergebnisse berechnet werden kann. Vor allem die Auswahl des passendsten thermodynamischen Modells stellt eine Herausforderung dar, auf die in Kapitel 4.1 näher eingegangen wird.

3.4.1 Thermodynamische Grundlagen

Für die thermodynamische Bewertung des StirliQ-Prozesses ist es essenziell, das nichtideale Verhalten von CO_2 insbesondere in der Nähe des kritischen Punktes und im überkritischen Bereich korrekt abzubilden. In diesem Zustandsbereich ändern sich thermodynamische Größen wie Dichte, Enthalpie, Wärmekapazität oder Viskosität stark und nichtlinear mit Druck und Temperatur. Klassische kubische Zustandsgleichungen wie Peng-Robinson (PR) oder Soave-Redlich-Kwong (SRK), ermöglichen eine vereinfachte Beschreibung dieser Größen, liefern jedoch insbesondere in der Nähe des kritischen Punktes nur begrenzt genaue Ergebnisse. Die hochpräzise, auf CO_2 spezialisierte

Span-Wagner-Zustandsgleichung erlaubt eine deutlich exaktere Vorhersage der thermodynamischen Eigenschaften. Im Folgenden werden die PR- und SRK-Zustandsgleichungen sowie die Span-Wagner-Gleichung im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit, Genauigkeit und Eignung für die Simulation des StirliQ-Prozesses näher betrachtet.

Span-Wagner-Zustandsgleichung

Die Span-Wagner-Zustandsgleichung (Span & Wagner, 1996) ist ein hochpräzises, empirisches Modell, das speziell für CO₂ entwickelt wurde. Sie beschreibt das thermodynamische Verhalten in einem weiten Temperatur- und Druckbereich, einschließlich des kritischen Punktes und des überkritischen Zustands, sehr genau. Im Gegensatz zu kubischen Gleichungen wie PR oder SRK basiert die Span-Wagner-Gleichung auf einer umfassenden Anpassung an experimentelle Referenzdaten und ermöglicht die präzise Berechnung von Dichte, Enthalpie, Wärmekapazität und weiteren thermodynamischen Größen.

Peng-Robinson Zustandsgleichung

Die Peng-Robinson-Zustandsgleichung (Peng & Robinson, 1976) zählt zu den kubischen Zustandsgleichungen und wurde für die Zustandsbeschreibung von realen Gasen entwickelt. Diese Gleichung weist gegenüber der sogenannten Van der Waals Gleichung weitere Faktoren auf, welche auch zu einer deutlich verbesserten Abbildung des „realen Verhaltens“ durch die Gleichung führen. Insbesondere für die Zustandsbestimmung im Bereich des sogenannten kritischen Punktes wurde die Peng-Robinson Gleichung entwickelt. Des Weiteren bildet die Peng-Robinson Gleichung flüssige und dampfförmige Phasen von reinen, und gemischten Substanzen ab. Die Peng-Robinson Zustandsgleichung ist aber auch für gemischte Substanzen hinterlegt, wobei dafür die Parameter a und b angepasst sind. Bei bekannten binären Wechselwirkungsparametern kann die Peng-Robinson-Gleichung für Berechnungen des Flüssigkeits-Dampf-Phasengleichgewichts von Multikomponenten verwendet werden. Die Peng-Robinson Zustandsgleichung bietet insbesondere den Vorteil, dass nur wenige Daten wie zum Beispiel der kritische Druck und die kritische Temperatur eines Stoffes für die Beschreibung eines Stoffverhaltens benötigt werden. (Kremer, 1990) (Peng & Robinson, 1976) (Wagner & de Medeiros, 2024)

Soave-Redlich-Kwong (SRK) Zustandsgleichung

Die Soave-Redlich-Kwong-Zustandsgleichung (Soave, 1972) gehört ebenfalls zu den kubischen Zustandsgleichungen und wurde zur Beschreibung des Verhaltens realer Gase entwickelt. Sie stellt eine Modifikation der ursprünglichen Redlich-Kwong-Gleichung dar, bei der ein temperaturabhängiger Faktor eingeführt wird, um die Vorhersagefähigkeit im Bereich des kritischen Punktes zu verbessern. Die SRK-Gleichung eignet sich zur Berechnung von flüssigen und gasförmigen Phasen reiner Substanzen sowie von Mehrkomponentensystemen, sofern die binären Wechselwirkungsparameter bekannt sind. Im Vergleich zur Peng-Robinson-Gleichung zeigt die SRK-EOS in der Nähe des kritischen Punktes und im überkritischen Bereich eine geringere Genauigkeit bei der Vorhersage von Dichte, Enthalpie und Wärmekapazität, bietet jedoch den Vorteil einer vergleichsweise einfachen Implementierung und geringen Datenanforderungen (kritischer Druck, kritische Temperatur, acentric factor).

3.4.2 Wirkungsgradberechnung

Der Carnot Wirkungsgrad entspricht dem höchsten theoretisch möglichen Wirkungsgrad bei der Wandlung von thermischer Leistung in mechanische Leistung (Wikipedia - Die freie Enzyklopedie, 2025). Grundsätzlich ergibt sich dieser Wirkungsgrad aus den Temperaturen in Kelvin der „warmen“ und „kalten“ Seite des Kreisprozesses.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{kalt}}{T_{warm}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Carnot-Wirkungsgrad ist rein theoretischer Natur und kann als Vergleichsparameter zum realen Wirkungsgrad herangezogen werden. Dabei entspricht die Arbeit, die durch eine Wärmezufuhr maximal gewonnen werden kann, der zugeführten Wärme multipliziert mit dem Carnot-Wirkungsgrad. Je mehr sich das Temperaturniveau T_{warm} der zugeführten Wärme der Temperatur T_{kalt} annähert, desto niedriger ist auch die Arbeit, die aus der zugeführten Wärme gewonnen werden kann.

Der reale Wirkungsgrad des StirliQ-Motors errechnet sich aus der Menge an zugeführte Wärmeleistung Q_{zu} und der daraus generierten Nutzleistung W_{Nutz} , jeweils in Watt.

$$\eta_{real} = \frac{W_{Nutz}}{Q_{zu}} \quad \text{Gleichung 2}$$

(Stephan, Schaber, Stephan, & Mayinger, 2013) (Labuhn & Romberg, 2006) (Wittig, 2007)

3.5 Simulationsumgebung

Für die Darstellung sowie Optimierung des StirliQ-Prozesses wurde der Prozess in unterschiedlichen Umgebungen modelliert und mit diesen Modellen Prozesssimulationen durchgeführt. Mit Hilfe einer graphischen Programmieroberfläche wurden vordefinierte Bausteine miteinander verbunden und anschließend zeitabhängig bzw. transient simuliert. Für die Prozesssimulation wurde zum einen die kommerzielle Umgebung Aspen HYSYS und die Open-Source-Umgebung DWSIM verwendet. Zur erweiterten Darstellung des Prozesses wurde Python verwendet.

Prozesssimulationen werden unter anderem im Maschinenbau und in der chemisch-technischen Verfahrenstechnik zur Auslegung von chemischen Anlagen, Energie- und Umweltsystemen, Fertigungsprozessen, Kraftwerken und anderen technisch-chemischen Prozesse verwendet. Prozesssimulation-Software Pakete können Prozesse sowohl statisch als auch dynamisch abbilden. Mit statischen Prozesssimulationen können Massen- und Energiebilanzen für stationäre Systeme und Anlagen berechnet werden. Dynamische Prozesssimulationen werden hingegen für zeitlich veränderliche Prozesse angewendet. Dabei wird berücksichtigt, dass gewisse Parameter, Prozess- und Zu-

standsgrößen einer zeitlichen Änderung unterliegen und daher statische Lösungsansätze nicht angewendet werden können. Die statische sowie dynamische Abbildung von Prozessen erfordert die numerische Lösung von Differentialgleichungssystemen, wobei der dynamische Lösungsweg viele Zeitschritte beinhaltet und somit ein deutlich höherer Rechenaufwand entsteht. Die dynamische Prozesssimulation erlaubt eine ereignisorientierte Simulation von komplexen Systemen. Dabei ist die zeitliche Änderung von bestimmten Parametern, Prozess- und Zustandsgrößen von sog. „Events“ abhängig.

Daten

Grundsätzlich greifen Prozesssimulationen auf Datenbanken zu, in denen die wichtigsten Eigenschaften und Parameter von unterschiedlichen Stoffen hinterlegt sind. Abhängig vom vorherrschenden Druck und von der vorherrschenden Temperatur können Stoffe sowohl gasförmig, flüssig als auch im festen Aggregatzustand vorliegen. Die Datenbanken beinhalten insbesondere auch kritische Drücke, Dampfdrücke und spezifische Wärmekapazitäten für die hinterlegten Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur. Zumeist handelt es sich dabei um experimentelle Stoffdaten für Reinstoffe. Basierend auf Mischungsregeln sind Prozesssimulationen auch in der Lage aus diesen die Eigenschaften von Gemischen zu bestimmen.

Schnittstellen

Prozesssimulations-Softwaretools wie z.B. Aspen HYSYS oder DWSIM ermöglichen zumeist über Schnittstellen auch den Zugriff auf Datenbanken außerhalb des Tools (z.B. Zugriff auf Excel-Dateien mit Stoffdaten). Des Weiteren ermöglicht der sogenannte CAPE-OPEN-Standard die Kommunikation einer Prozesssimulation mit Modellen und Datenbanken von Drittanbietern. Der CAPE-OPEN Standard definiert dabei die Eigenschaften der Schnittstellen insofern, dass diese eine „Plug and Play“ Verbindung der verwendeten Simulationsumgebung mit Modellen und Komponenten anderer Hersteller erlauben. Dadurch ist eine einfache Integration von Modellen in anderen Simulationsumgebungen möglich, ohne, dass zeitintensive Entwicklungsarbeit für die Erstellung von Schnittstellen erforderlich ist. (Wikipedia, 2024) (Belaud & Pons, 2002)

3.5.1 Aspen HYSYS

Aspen HYSYS ist eine professionelle Prozesssimulationssoftware, die von AspenTech (Aspen Technology Inc.) entwickelt wurde und zu den weltweit führenden Anwendungen für die Modellierung, Simulation und Optimierung chemischer Prozesse zählt. Die Software wird primär in der Öl- und Gasindustrie, der petrochemischen Industrie sowie in der chemischen Verfahrenstechnik eingesetzt und ermöglicht es IngenieurInnen, komplexe industrielle Prozesse zu entwerfen, zu analysieren und zu optimieren.

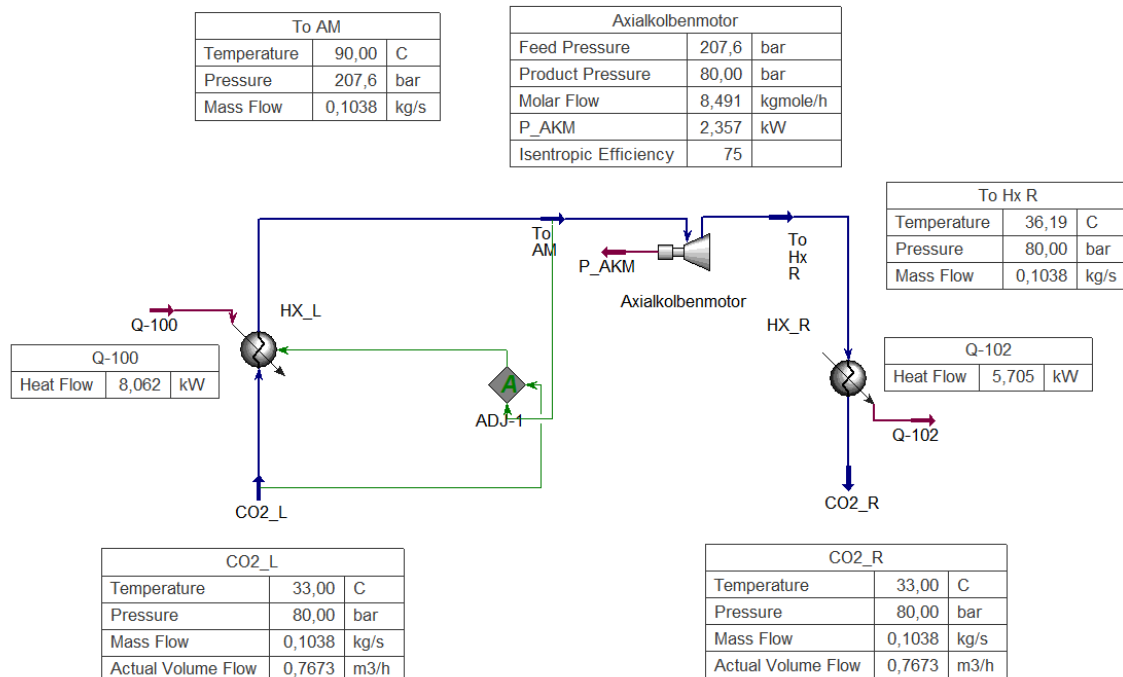
HYSYS zeichnet sich durch seine benutzerfreundliche grafische Oberfläche aus, die es ermöglicht, Prozessfließbilder intuitiv zu erstellen und zu bearbeiten. Die Software basiert auf einem modularen Konzept, bei dem verschiedene Prozesseinheiten (Unit Operations) miteinander verknüpft

werden können, um vollständige Produktionsanlagen zu modellieren. Dabei können sowohl stationäre als auch dynamische Simulationen durchgeführt werden, wodurch sowohl Design- als auch Betriebsoptimierungen möglich sind.

Die Prozesssimulationssoftware Aspen HYSYS zeichnet sich durch einen sehr hohen Funktionsumfang aus, der nahezu alle Bereiche der Verfahrenstechnik abdeckt. Sie verfügt über eine große thermodynamische Datenbank für Reinstoffe und Gemische, die präzise Berechnungen von Stoffeigenschaften, Phasengleichgewichten und chemischen Reaktionen unter unterschiedlichen Bedingungen ermöglicht. Neben vielfältigen thermodynamischen Modellen wie Peng-Robinson oder Soave-Redlich-Kwong unterstützt Aspen HYSYS auch die Simulation komplexer Mehrphasensysteme sowie die Modellierung zentraler Prozesseinheiten wie zum Beispiel Destillationskolonnen, Reaktoren, Wärmetauscher, Pumpen und Kompressoren. Ein zentrales Merkmal ist die integrierte Prozessoptimierung, mit der optimale Betriebsparameter ermittelt, Sensitivitätsanalysen durchgeführt und Prozessalternativen bewertet werden können. Zusätzlich bietet die Software erweiterte Funktionen wie die Simulation von Regelkreisen, die Analyse dynamischer Prozesse sowie eine enge Integration mit anderen AspenTech-Produkten. (Aspen Technology, 21) (Aspen Technology, Inc, 2011) (Wikipedia - Die freie Enzyklopädie, 2025)

Im Projekt wurden die beiden CO₂ Reservoirs sowie der Axialkolbenmotor abgebildet (siehe Abbildung 4). Die unterschiedlichen Prozessbedingungen wurden durch Definition der Starttemperatur, der Temperatur nach Wärmezufuhr und dem Druck nach dem Axialkolbenmotor spezifiziert.

Abbildung 4: Prozessabbildung von StirliQ mit Aspen HYSYS.



Es ist zu erkennen, dass dem CO₂ auf der Überdruckseite (CO₂_L) im linken Wärmetauscher (HX_L) Wärme (Q-100) zugeführt wird. Anschließend wird das warme CO₂ im Axialkolbenmotor auf ein geringeres Druck- sowie Temperaturniveau gebracht. Die dabei gewonnene Energie wird in Form der Generatorleistung (P_AKM) abgenommen. Auf der Niederdruckseite des Prozesses wird dem kühlerem CO₂ (CO₂_R) zusätzlich Wärme (Q-102) über den rechten Wärmetauscher (HX_R) entzogen. Für den isentropen Wirkungsgrad des Axialkolbenmotors wurden 75 % angenommen.

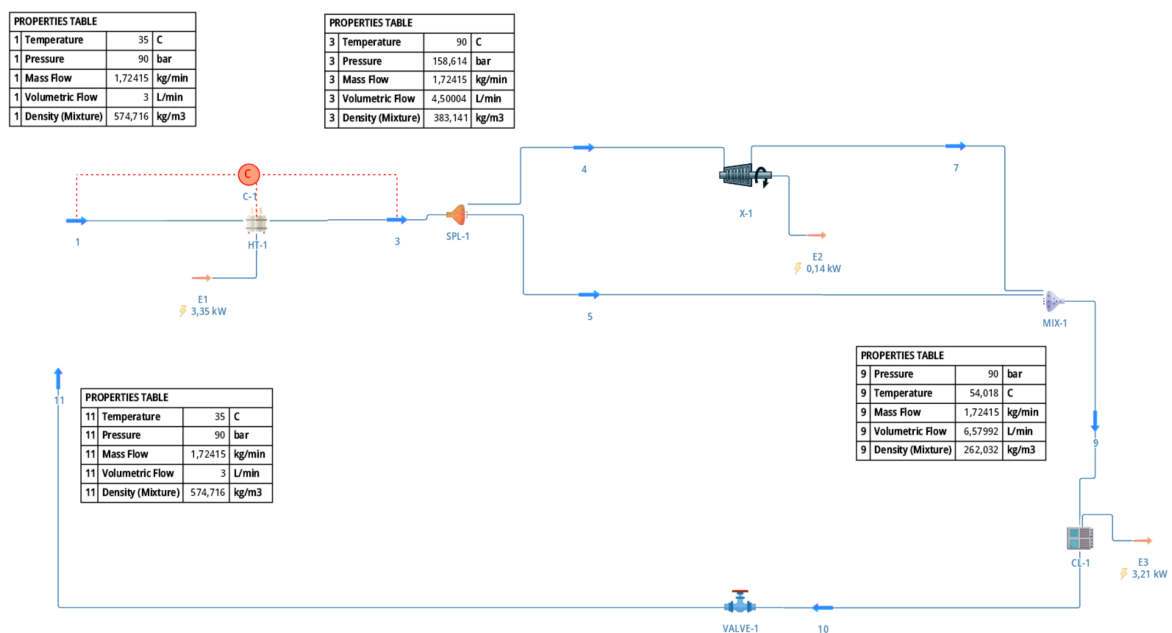
3.5.2 DWSIM

Im Projekt StirliQ+ wurde für die thermodynamische Modellierung der relevanten Prozessabläufe die Open-Source-Simulationsumgebung DWSIM eingesetzt. Diese Plattform ermöglicht die Simulation statischer und dynamischer chemischer Prozesse, ist plattformübergreifend verfügbar (Windows, Linux, macOS, teils auch Android und iOS) und erfüllt den CAPE-OPEN Standard. DWSIM unterstützt eine Vielzahl an Unit Operations wie Pumpen, Verdichter, Wärmetauscher, Reaktoren oder Destillationskolonnen, die über eine grafische Benutzeroberfläche flexibel miteinander verknüpft werden können; zusätzlich lassen sich Abläufe per Spreadsheet oder Python-Skripte erweitern. Die Software bietet eine breite Auswahl an thermodynamischen Modellen (z. B. GERG-2008, PC-SAFT, Peng-Robinson, UNIFAC, NRTL, IAPWS-IF97), wodurch sowohl Gleichgewichtsprozesse als auch komplexe Mehrphasen- und Reaktionssysteme realitätsnah abgebildet werden können.

nen. Damit erlaubt DWSIM eine präzise und vielseitige Simulation komplexer Prozesse und Systeme im Rahmen des StirliQ+-Projekts. (Wagner & de Medeiros, 2024) (DWSIM, 2024) (Wikipedia - Die freie Enzyklopedie, 2024)

Analog zu Abbildung 4 ist in folgender Grafik die Abbildung des Prozessfließbildes mit DWSIM dargestellt. Im Detail sind die Komponenten identisch, unterscheiden sich jedoch in deren Darstellung.

Abbildung 5: Flussdiagramm des entwickelten Open Source Modells mit den einzelnen Modellkomponenten.



3.5.3 Python

Neben professionellen Softwarelösungen wie Aspen HYSYS oder Open-Source-Alternativen wie DWSIM stellt die Programmiersprache Python eine äußerst flexible Möglichkeit zur Modellierung, Simulation und Analyse thermodynamischer und verfahrenstechnischer Prozesse dar. Python bietet eine große Bandbreite an spezialisierten Bibliotheken, die für mathematische Modellierung, numerische Optimierung und Prozessabbildung genutzt werden können.

Zu den wichtigsten Paketen zählen:

NumPy und **SciPy** zur effizienten numerischen Berechnung und Lösung von Differentialgleichungen, **Pandas** für die strukturierte Datenanalyse und -aufbereitung, **Matplotlib** oder **Plotly** für die

Visualisierung von Prozessverläufen, **CoolProp** für die Berechnung thermodynamischer Stoffeigenschaften und Zustandsgrößen, **Cantera** für die Simulation chemischer Kinetiken, Reaktionen und Gleichgewichte, **Thermo** und **ChemSep** als Python-Schnittstellen für thermodynamische Modelle und Trennprozesse.

Im Gegensatz zu HYSYS und DWSIM bietet Python keine fertige grafische Benutzeroberfläche, sondern erfordert die direkte Modellbildung über Programmcode. Dadurch ist der Aufwand anfangs höher, jedoch können Simulationen exakt an die Projektanforderungen angepasst, mit eigenen Gleichungen ergänzt und in automatisierte Workflows integriert werden. Besonders wertvoll ist die Möglichkeit, Python-Skripte mit DWSIM (über CAPE-OPEN) oder anderen Tools zu verbinden, wodurch gekoppelte Simulationsumgebungen realisiert werden können.

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse aus dem zuvor beschriebenen Projektinhalt und der Methodik detailliert dar. Hierbei wird an erster Stelle auf die Modellierungsergebnisse mit Hilfe der verschiedenen Softwareumgebungen eingegangen und anschließend optimierte Prozessthermodynamik vorgestellt, die mit Hilfe der besten Simulationsumgebung untersucht wurde. In den nächsten Kapiteln wird schließlich auf die Umsetzung der Anlage und der Versuche eingegangen, wobei der Fokus auf dem Detailengineering, dem Versuchsaufbau, der Versuchsdurchführung und der Auswertung der Messergebnisse liegt. Schließlich wird wieder theoretisch die Integration der StirliQ-Anlage in übergeordnete Energiesysteme eingegangen.

4.1 Modellergebnisse der Prozess-Thermodynamik

Die in diesem Projekt entwickelten Simulationsmodelle wurden in den drei, oben beschriebenen Softwareumgebungen realisiert. Zum einen wurde der Prozess in der kommerziellen Software Aspen HYSYS von Aspen Tech und zum anderen in der Open-Source-Umgebung DWSIM abgebildet. Mit Hilfe beider Softwareumgebungen konnte ein reproduktives Ergebnis erzielt, jedoch gewisse transiente und instationäre Prozesse nicht hinreichend abgebildet werden. Als Lückenschluss wurde zusätzlich Python herangezogen, womit diese, nicht abbildbaren, instationären Prozesse nun nachvollziehbar simuliert werden konnten. Kapitel 3.5 bietet bereits einen kurzen Einblick in die verwendeten Simulationsumgebungen, während in den folgenden Abschnitten auf die Lösung sowie die Ergebnisse des StirliQ-Prozesses eingegangen wird. Zusätzlich steht die Frage im Vordergrund, mit welcher Zuverlässigkeit die, in der Software integrierten Berechnungsmodelle von Aspen HYSYS sowie DWSIM das komplexe, nichtideale Verhalten von CO₂ nahe und oberhalb des kritischen Punktes abbilden können.

4.1.1 Modellentwicklung in Aspen HYSYS

Eine sehr gut für CO₂ angepasste Zustandsgleichung ist die „Span Wagner“ Gleichung (Span & Wagner, 1996), die aber in Aspen HYSYS nicht verfügbar ist. In Aspen HYSYS verfügbare und für die Berechnung überkritischer Zustände geeignete Zustandsgleichungen sind „Peng Robinson“ oder „SRK (Soave-Redlich-Kwong)“. Als Auswahlkriterium zwischen den beiden Zustandsgleichungen wurde die isochore Erwärmung von CO₂ (80 bar, 33 °C) auf 80 °C berechnet und der resultierende Druck mit der sehr exakten Span Wagner Gleichung gegenübergestellt.

Tabelle 1: Berechnung der thermischen Kompression mittels Peng Robinson, SRK und Span Wagner.

Zustandsgleichung	T_start [°C]	P_start [bar]	T_end [°C]	P_end [bar]
Peng Robinson	33	80	80	188,9
SRK	33	80	80	185,8
Span Wagner	33	80	80	208,7

In Tabelle 1 ist ersichtlich, dass Peng Robinson und SRK ähnliche Ergebnisse liefern, jedoch von der Span Wagner Gleichung in der Druckberechnung erheblich abweichen. Um diese Berechnungsdifferenzen auszugleichen, wurde die SRK-Gleichung mittels Volumenkorrektur nach Gleichung 3 angepasst, wobei die Konstante $c_i = -8.48 \cdot 10^{-3}$ zur Korrektur herangezogen wurde.

$$V_{corr} = V_{SRK} + c_i \quad \text{Gleichung 3}$$

Tabelle 2: Berechnung der thermischen Kompression mittels SRK-Volumenkorrektur und Span Wagner.

Zustandsgleichung	T_start [°C]	P_start [bar]	T_end [°C]	P_end [bar]
SRK (korrigiert)	33	80	80	208,5
Span Wagner	33	80	80	208,7

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Volumenkorrektur, wobei ein annähernd gleicher Enddruck im Vergleich zur Span-Wagner-Gleichung erreicht werden konnte. Somit konnte die Simulation des StirliQ-Prozesses in kommerziellen Simulationsprogrammen (z.B. Aspen HYSYS) ermöglicht werden, die nicht auf die Span Wagner Gleichung zurückgreifen können.

4.1.2 Ergebnisse von Aspen HYSYS und DWSIM im Vergleich

Durch die Vielzahl an hinterlegten Modellen und Parametern können thermodynamische Eigenschaften von unterschiedlichsten Stoffen präzise auch in komplexen Prozessverläufen und Systemen beschrieben und ermittelt werden. Die Open-Source Software DWSIM ermöglicht dadurch

eine realitätsnahe Abbildung von komplexen Prozessen und Systemen. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der DWSIM-Simulation mit Hilfe der Peng-Robinson-Zustandsgleichung, die in Kapitel 3.4.1 beschrieben wurde. Im Vergleich hierzu stehen die Ergebnisse, die mit der kommerziell erhältlichen Software Aspen HYSYS erreicht wurden. Die Software Aspen HYSYS wird als State-of-the-Art Prozesssimulationssoftware gesehen, sodass die Ergebnisse aus Aspen HYSYS an dieser Stelle als Maßstab herangezogen werden.

Tabelle 3: Eingabe- und Vergleichsparameter der Open Source sowie der Vergleichssoftware Aspen HYSYS.

	DWSIM	Aspen HYSYS
Heizenergie [W]	5 011.52	5169.82
Generatorleistung [W]	548.01	580.88
Kühlenergie [W]	4463.51	4588.94
Wirkungsgrad	10.94%	11.24%
t_{kalt} [K]	308.15	308.15
t_{warm} [K]	353.15	353.15
Carnot Wirkungsgrad (theoretisch)	13%	13%
Wirkungsgrad / Carnot Wirkungsgrad	86%	84%
Schluckvolumen Axialkolben-Motor [Liter/Umdrehung]	0.005	0.005
dV/dt [l/min]	2.5	2.5
Motordrehzahl [u/min]	500	500

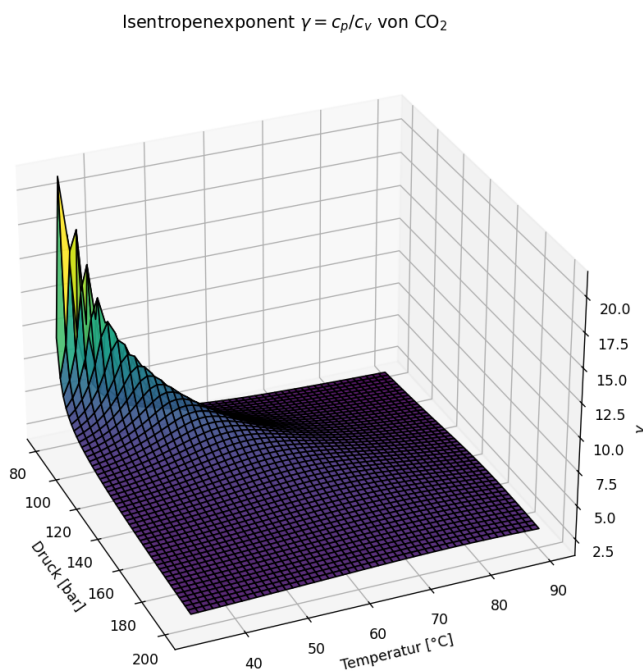
Es wurde ersichtlich, dass sich mit dem in der Open Source Simulationsumgebung DWSIM entwickelten Modell und dem Aspen HYSYS Modell bei annähernd gleicher zugeführter Heizenergie und gleichen angenommenen CO₂-Zuständen ähnliche Generatorleistungen und Wirkungsgrade errechnen. Für die korrekte Abbildung der StirliQ-Anlage sind insbesondere die CO₂-Zustandsgrößen, wie die Dichte in Abhängigkeit von der jeweiligen vorherrschenden Temperatur und dem vorherrschenden Druck ausschlaggebend. Es kann somit sichergestellt werden, dass sich mit Aspen HYSYS und DWSIM quantitativ sehr ähnliche Ergebnisse erzielen lassen.

4.1.3 Herausforderung bei der Abbildung instationärer Prozesse

Neben den erfolgreich durchführbaren Simulationen zeigten sich stellenweise jedoch Abweichungen im Vergleich zum, vom Projektkonsortium erwarteten Verlauf. In einigen Betriebspunkten ist ab einem bestimmten Zeitpunkt ein Berechnungsproblem aufgetreten, wobei vor allem der Massenstrom, die Anlagenleistung, die Zykluszeit und die Aufheizenergie betroffen waren. Bei näherer Betrachtung zeigten sich die Abweichungen als Divergenzen und Schwingungen in der instationären Simulation, die auf die angewandten bzw. zur Verfügung stehenden Modelle in der Aspen HYSYS sowie DWSIM Simulation zurückgeführt werden konnten. Eine Begründung für das Verhalten liefert einerseits die ungenügende Abbildung des (i) überkritischen Ausströmverhaltens zwischen Hochdruckreservoir sowie Axialkolbenmotor und andererseits die (ii) instationäre Ausströmung im Turbinenmodell (für den Axialkolbenmotor).

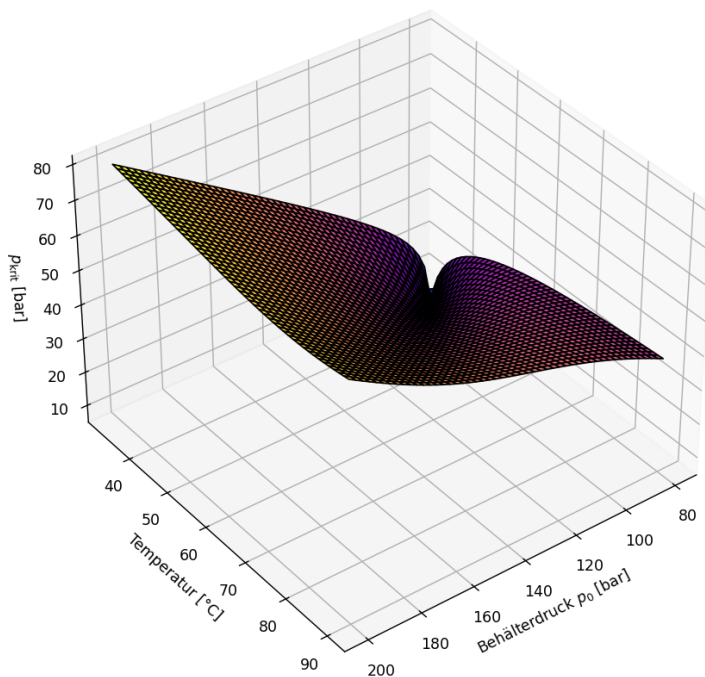
Kohlendioxid wird als überkritisch bezeichnet, wenn es sich oberhalb von 31.1 °C (kritische Temperatur) und 73.8 bar (kritischer Druck) befindet. In diesem Zustand ist CO₂ kein typisches ideales Gas, sondern zeigt dichtebedingte und nichtlineare thermodynamische Eigenschaften, die eine idealgasbasierte Berechnung (z. B. konstantes γ) ungenau machen. Der Isentropenexponent $\gamma = c_p/c_v$ beschreibt das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten und ist für ideale Gase konstant. Für reale Gase wie CO₂ im überkritischen Zustand ist γ jedoch (a) stark temperatur- und druckabhängig und (b) besonders empfindlich nahe dem kritischen Punkt und in der Nähe der sogenannten „Widom-Linie“, wo die thermophysikalischen Eigenschaften starke Gradienten aufweisen. Abbildung 6 zeigt dabei die starken Gradienten in Form von Spitzen im Bereich des kritischen Punktes.

Abbildung 6: Verhalten des Isentropenexponenten im Arbeitsbereich des StirliQ-Prozesses.



Wenn γ durch den resultierenden Prozessdruck und die Prozesstemperatur variiert, hat das zusätzlich direkten Einfluss auf das kritische Druckverhältnis und das wiederum auf die Schallgeschwindigkeit und somit den Volumenstrom über den Axialkolbenmotor. Abbildung 7 zeigt die Nichtlinearitäten auf, die verdeutlichen sollen, wie herausfordernd die Abbildung der thermodynamischen Vorgänge in diesem Bereich ist.

Abbildung 7: Kritischer Gegendruck in Abhängigkeit von Behälterdruck und Behältertemperatur.



Mit Hilfe der Diagramme aus Abbildung 6 sowie Abbildung 7 ist ersichtlich, dass der Ausströmvorgang hochsensibel auf Änderungen im Druck und in der Temperatur reagiert. Die daraus resultierende Abhängigkeit des kritischen Drucks hat wiederum Einfluss auf den Prozess und damit den Druck und die Temperatur. Kleine Ungenauigkeiten in der Berechnung des Prozesses haben somit hohe Auswirkungen auf die zeitabhängige Berechnung des Prozesses selbst. Wie im Kapitel 3.4.1 beschrieben, kann die Span-Wagner-Zustandsgleichung genauere Ergebnisse erzielen, die wiederum in Aspen HYSYS sowie DWSIM nicht standardmäßig integriert ist. Um die thermodynamische Abbildung des Prozesses zu realisieren, wurde der gesamte StirliQ-Prozess zusätzlich in Python modelliert. Auf eine umfassende Beschreibung der Ergebnisse geht das folgende Kapitel ein.

4.1.4 Modellergebnisse mit Python

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, zeigte sich im Projektverlauf, dass eine Abbildung des Prozesses in Python auf Grund der unzureichend detaillierten Behandlung der instationären

Prozessführung in Aspen HYSYS und DWSIM erforderlich ist. Eine exakte Modellierung wurde mithilfe der Programmierumgebung „Python“ unter Verwendung der CoolProp Bibliothek entwickelt. Weiterhin wurden die (i) zeitlich ändernden Stoffdaten und (ii) Ausströmbedingungen aus dem Hochdruckreservoir in der Modellentwicklung berücksichtigt. Schließlich wurde die Berechnung der mechanischen Leistung überarbeitet.

Berücksichtigung der zeitlichen Änderung der Stoffdaten

Zustandsgrößen sowie Transportgrößen werden innerhalb der differentiellen Bilanzgleichungen mittels CoolProp Abrufe ermittelt und ermöglichen die instationäre Modellierung des StirliQ-Prozesses. Für jede Zeitintegration wird die Veränderung der Stoffeigenschaften berücksichtigt. Diese Methode wurde äquivalent für alle Transporteigenschaften und Zustandsgrößen (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Enthalpie, PVT-Verhalten) angewendet.

Berücksichtigung der Ausströmbedingungen aus dem Hochdruckreservoir

Beim Start des Expansionszyklus herrscht z.T. ein überkritisches Druckverhältnis zwischen Hochdruck- und Niederdruck Reservoir. Bei diesem Zustand ist der Massenstrom über den Axialkolbenmotor nicht mehr direkt vom Druckverhältnis zwischen den beiden Behältern abhängig, sondern wird durch die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsmedium im Ausströmquerschnitt begrenzt. Der Isentropenexponent wird während der instationären Expansion über die spezifischen Wärmekapazitäten aus der CoolProp-Bibliothek errechnet. Dies ergibt auch bei überkritischem Druckverhältnis eine Druckabhängigkeit des Massenstroms. Dieser wird während eines überkritischen Ausströmverhaltens exakt über die Veränderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Stoffdaten ermittelt und erst nach Unterschreiten des kritischen Druckverhältnisses mittels Ausströmwiderstand und Druckgradienten berechnet. Zusammengefasst werden zwei Berechnungsansätze implementiert, die (a) das überkritische und (b) das unterkritische Druckverhältnis beachten.

Berechnung der mechanischen Leistung des StirliQ-Prozesses

Bei der Entspannung eines Fluids über eine Turbine wird potenzielle Energie (Druck) in kinetische Energie und Arbeit umgewandelt. Idealerweise verläuft dieser Prozess isentrop (d.h. ohne Entropieerzeugung), in der Praxis jedoch mit Verlusten, die durch den Turbinenwirkungsgrad η_{turbine} beschrieben werden. Im Python Code läuft die Leistungsberechnung in einer Schleife ab, die den zeitlichen Verlauf simuliert. Die Turbinenleistung wird physikalisch korrekt auf Basis der isentropen Entspannung, des Isentropenwirkungsgrades und des zeitabhängigen Massenstroms berechnet.

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Simulation. Dabei fallen Unterschiede auf, die sich zu Aspen HYSYS ergaben und darunter zum Teil Differenzen von bis 38.1 % festzustellen waren.

Tabelle 4: Vergleich der Potentialberechnung des Entspannungszyklus zwischen Aspen HYSYS und Python-Modell.

	Python-Modell	Aspen HYSYS	Differenz	Differenz in %
Startdruck [bar]	80	80	-	
Starttemperatur [°C]	33	33	-	
Enddruck vor Entspannung [bar]	208,7	208,7	-	
Temperatur vor Entspannung [°C]	80	80	-	
Gegendruck des kalten Reservoirs [bar]	80	80	-	
Aufheizenergie integriert [kJ]	474	564	-90	(-16.0)
Zykluszeit der Entspannung [s]	50	65	-15	(-23.1)
Integrierte Motorleistung über die Zykluszeit [kJ]	43,2	44,5	-1,3	(-2.9)
Integrierter Massenstrom [kg]	5,2	8,4	-3,2	(-38.1)

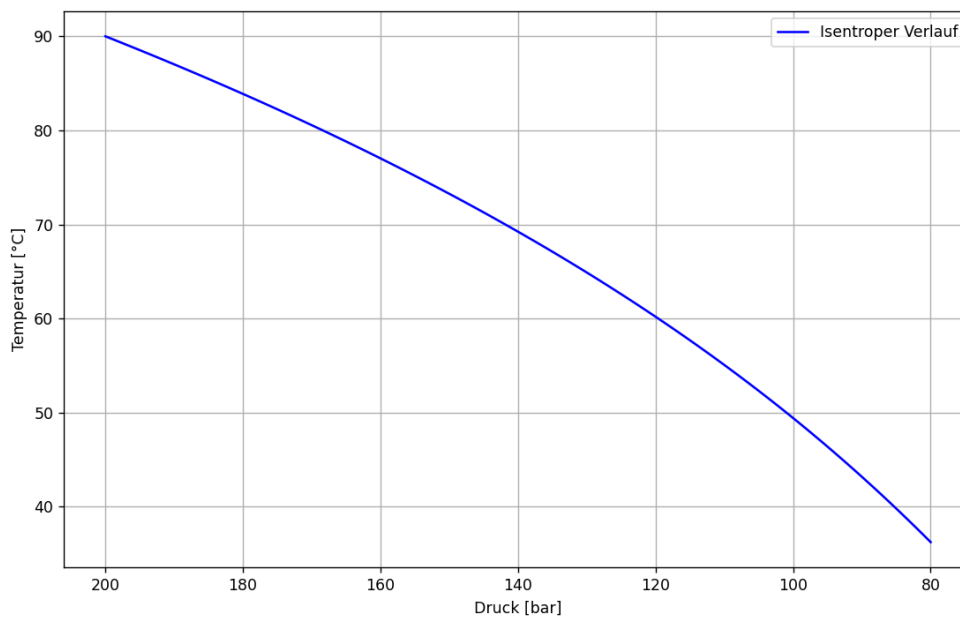
Die Ergebnisse zeigen, dass die simulative Abbildung der variablen Motordrehzahl sowie dem instationären Ausströmverhalten einen signifikanten Einfluss haben. Da das Python-Modell das divergente Verhalten aus den Simulationsergebnissen von Aspen HYSYS korrigierte, wurde für die Betrachtung unterschiedlicher Betriebsfenster des StirliQ-Prozesses das Python-Modell verwendet. Es zeigte sich auch, dass Aspen HYSYS sowie DWSIM mit dessen Funktionen an die Grenzen kommt, um spezielle Betriebsparameter sowie Stoffeigenschaften realitätsnah abzubilden.

4.2 Optimierung der Prozess-Thermodynamik

Ein Merkmal des StirliQ-Prozesses ist, dass die zugeführte Wärmestromdichte (Auslegungskriterium für die CO₂ Reservoirs / Wärmetauscher) die Aufheizzeit eines Zyklus bestimmt. Weiters wird während des Entspannungszyklus die Wärmezufuhr unterbrochen. Dies hat den Hintergrund, dass bei jedem Zyklus die Heiz- und Kühlmedien zwischen den beiden Wärmetauschern vertauscht werden. In Folge würden die Massen der Wärmetauscher ebenfalls erwärmt, was zu einer beträchtlichen Inert Wärme führen würde, die zwar rückgewonnen wird, jedoch nicht dem eigentlichen

KWK-Prozess zur Verfügung steht. Aus diesem Grund bedienen wir uns des Joule Thomson Effektes, der durch die Entspannung während des Arbeitszyklus zur Abkühlung des CO_2 im Hochdruck Reservoir führt und dadurch einen Teil der Inertwärme wieder aufnehmen kann. Um diesen Effekt zu steuern, wird die Zeit des Arbeitszyklus gezielt mit dem Öffnungsquerschnitt aus dem Hochdruckbehälter geregelt. Dadurch lässt sich der Arbeitszyklus zeitlich dem Aufheizzyklus angleichen, wodurch der Wärmestromdichte bezüglich der Abkühlung der Inertmassen während des Arbeitszyklus Rechnung getragen wird.

Abbildung 8: Temperaturverlauf während der Expansion von CO_2 von 200 auf 80 bar.



In Abbildung 8 ist neben der Betrachtung des überkritischen Ausströmvorgangs ein weiterer interner Prozess erkennbar. Die Entspannung von CO_2 von 200 bar und 90°C auf 80 bar ohne externen Wärmeeintrag führt zu einer Abkühlung bis auf ca. 36°C führt. Dieser Effekt führt die gespeicherte Energie in der Inertmasse des Wärmetauschers dem Prozess wieder zu und führt dadurch zu einem längeren Arbeitszyklus. Entsprechend durch diesen Effekt können die Anlagenkomponenten bei bestimmter Nennleistung auch verkleinert werden. Um das thermodynamische Potential des StirliQ-Prozesses zu bewerten, wurden die Wärmestromdichten der Inertmassen in den folgenden Simulationen nicht berücksichtigt. Diese werden anhand der Messdaten aus der Laboranlage empirisch ermittelt. Dagegen werden die Aufheizvorgänge und Arbeitszyklen instationär simuliert, wodurch sich mittels Darstellung im T-S-Diagramm die Betriebsdaten des StirliQ-Prozesses optimieren lassen. Die folgenden Abbildungen zeigen drei unterschiedliche Betriebsfenster des StirliQ-Prozesses im überkritischen Bereich. Mit Hilfe der Betriebsvarianten, beginnend bei unterschiedlichen Temperaturniveaus und gleichem Druck, kann die Notwendigkeit der Festlegung des Prozessstarts in der Nähe des kritischen Punktes dargestellt werden. Die Analysen basieren auf dem Modell, dargestellt in Kapitel 4.1.4.

Im Folgenden wird auf die Optimierung der Prozessthermodynamik eingegangen, wobei zwei Wege verfolgt wurden. Zum einen wurden die Start- und Zieltemperaturen des Prozesses und zum anderen das Arbeitsmedium selbst variiert.

Optimierung der Betriebstemperaturen

Im ersten Abschnitt werden drei Betriebsvarianten (siehe Tabelle 5) gegenübergestellt, worin die Start- und Zieltemperatur variiert wurden. Dabei wurden der Wirkungsgrad, die durchschnittliche Turbinenleistung, Zykluszeit, Aufheizzeit und Entspannungszeit genauer untersucht. Des Weiteren werden zur Veranschaulichung der Prozesscharakteristik das T-S-Diagramm sowie der Druck- Temperatur- und Leistungsverlauf in Abhängigkeit der Zeit für eine Betriebsvariante dargestellt.

Tabelle 5: Betriebsvarianten der Prozessoptimierung.

	Betriebsvariante 1	Betriebsvariante 2	Betriebsvariante 3
Starttemperatur	33 °C	20 °C	50 °C
Zieltemperatur	80 °C	80 °C	90 °C

Das T-S-Diagramme (siehe Abbildung 9) zeigt den Aufheizzyklus sowie den Entspannungszyklus. Dabei ist der linke untere Punkt der Startpunkt, bevor das Arbeitsmedium erhitzt wird. Der zweite und oberste Punkt stellt das erhitzte Arbeitsmedium dar und das Auslaufen der Kurve ist der Expansionsvorgang.

Der Betriebspunkt zu Beginn des Aufheizvorganges sollte nahe am kritischen Druck und der kritischen Temperatur des Arbeitsmediums liegen, da in diesem Bereich im T-S-Diagramm nahe aneinanderliegende und waagrechte Isobaren erkennbar sind. An diesem thermodynamischen Punkt führt eine geringe Temperaturerhöhung zu einem großen Druckanstieg und zeigt die Relevanz des StirliQ-Prozesses im Bereich der Abwärmenutzung bzw. generell für die Nutzung als KWK im Niedertemperaturbereich.

Abbildung 9: T-S-Diagramm für Betriebsvariante 1.

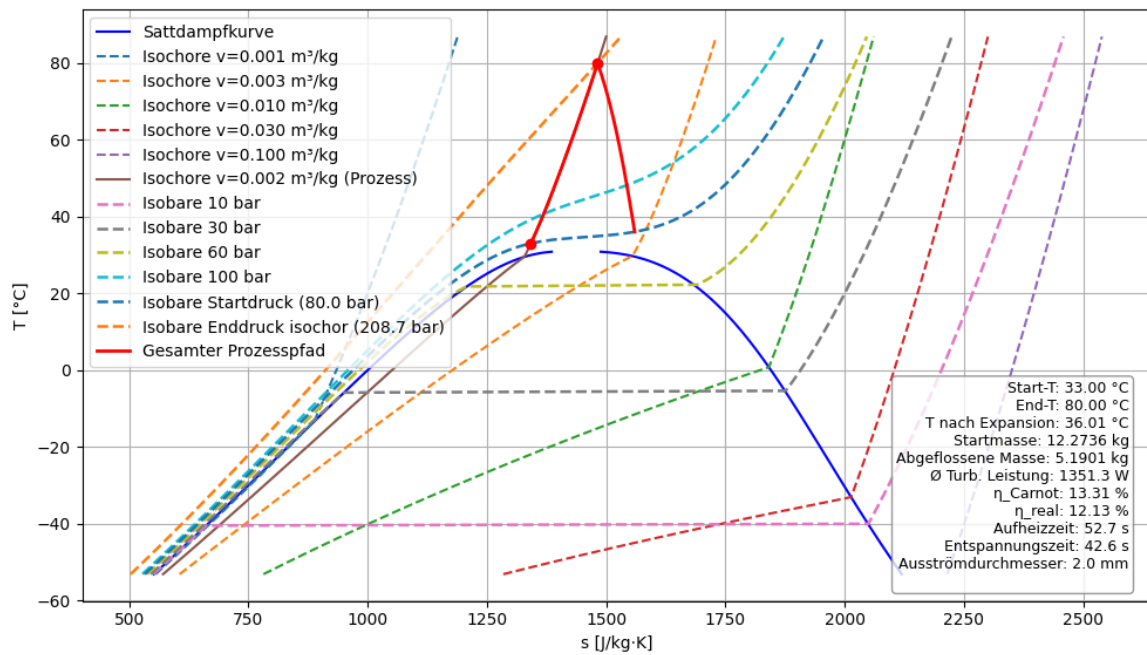
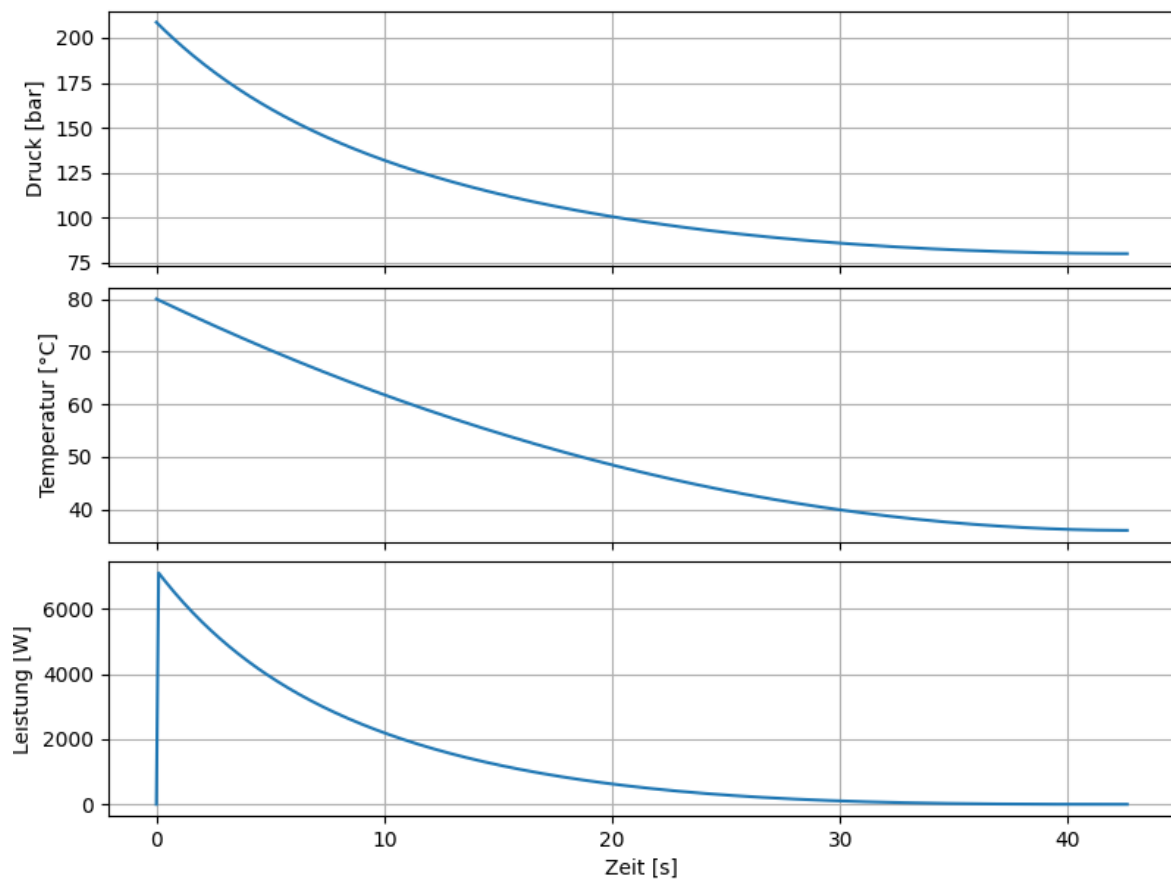


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf des Entspannungsanteils des Zyklus für Betriebsvariante 1.



In Tabelle 6 sind die Optimierungsergebnisse der drei verschiedenen Betriebsvarianten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Start- und Zieltemperatur auch der theoretisch erreichbare Carnot-Wirkungsgrad steigt. Dadurch lässt sich mehr der zuvor ungenutzten Energie in elektrischen Strom umwandeln. Zusätzlich ist erkennbar, dass mit steigender Differenz eine höhere Leistungsabnahme möglich ist. Dem gegenüber steht jedoch eine höhere Aufheizzeit, die notwendig ist, um das Arbeitsmedium auf die Zieltemperatur zu bringen. Die Betriebsvariante 3 veranschaulicht den Wirkungsgradverlust bei Entfernung des Startpunktes vom kritischen Punkt. Dadurch ist erkennbar, dass das Temperaturniveau des Kühlmediums entscheidend für die Auswahl des Arbeitsmediums ist. Besitzt das Kühlmedium ein Temperaturniveau von ca. 45°C, eignet sich ein Arbeitsmedium mit einer kritischen Temperatur oberhalb von 45°C, um den Startpunkt des StirliQ-Prozesses in der Nähe des kritischen Punktes wählen zu können.

Tabelle 6: Optimierungsergebnisse der Prozess-Thermodynamik für verschiedene Zieltemperaturen.

	Betriebsvariante 1	Betriebsvariante 2	Betriebsvariante 3
Starttemperatur	33 °C	20 °C	50 °C
Zieltemperatur	80 °C	80 °C	90 °C
Carnot-Wirkungsgrad	13.3 %	17.0 %	11.0 %
Realer Wirkungsgrad	12.1 %	14.6 %	6.5 %
Bewegte Masse	5.2 kg	7.4 kg	2.3 kg
Startmasse	12.3 kg	16.6 kg	7.7 kg
Turbinenleistung	1351 W	3077 W	652 W
Aufheizzeit	52.7 s	96.5 s	31.3 s
Entspannungszeit	42.6 s	41.2 s	28.2 s

Betrachtung alternativer Arbeitsmedien

Prozessfenster mit einen Zieltemperaturbereich zwischen 80°C und 150°C (z.B. unter Nutzung der Abgastemperatur eines Heizwerkes), würden sich unter Verwendung eines anderen Arbeitsmediums wie beispielsweise R32 bessere Wirkungsgrade ergeben. Bei zu hoher Abweichung der Ausgangstemperatur zur kritischen Temperatur des Arbeitsmediums kann es daher sinnvoll sein, dieses selbst anzupassen. Im Folgenden ist der Unterschied zwischen der Verwendung von CO₂ sowie R32 als Arbeitsmedium bei hoher Ausgangstemperatur dargestellt. Der Vergleich beider Arbeitsmedien in Tabelle 7 veranschaulicht den Effekt, wenn sich der Startpunkt des StirliQ-Prozesses von

der kritischen Temperatur des Arbeitsmediums entfernt. R32 besitzt eine kritische Temperatur von 78.1°C, CO₂ besitzt eine kritische Temperatur von 31.1°C. Anstatt eines Wirkungsgrads von 3.0 % lässt sich mit R32 nun ein Wirkungsgrad von 13.4 % erreichen. Die Funktionalität ist durch ein alternatives Arbeitsmedium nicht beeinträchtigt, da alle Arbeitsmedien in der Nähe des kritischen Punktes nahezu waagrechte und eng beisammen liegende Isobaren aufweisen.

Tabelle 7: Optimierungsergebnisse der Prozess-Thermodynamik für verschiedene Arbeitsmedien.

	Arbeitsmedium CO ₂	Arbeitsmedium R32
Starttemperatur	80 °C	80 °C
Zieltemperatur	150 °C	150 °C
Carnot-Wirkungsgrad	16.5 %	16.5 %
Realer Wirkungsgrad	3.0 %	13.4 %
Startmasse	2.2 kg	7.7 kg
Bewegte Masse	0.5 kg	4.3 kg
Turbinenleistung	173 W	720 W
Aufheizzeit	13.6 s	39.2 s
Entspannungszeit	21.6 s	65.6 s

Die Ergebnisse zeigen, dass der Prozess selbst auf verschiedene Temperaturniveaus angepasst werden kann. Wichtig ist die Auswahl des geeigneten Arbeitsmediums, wie das obige Beispiel zeigt.

4.3 Detailengineering der Anlagenkomponenten

Im Folgenden werden die Anpassungen verschiedener Anlagenkomponenten beschrieben.

4.3.1 Optimierung und Gestaltung der Wärmeübertragungsflächen

Im Rahmen des Projekts wurde ein numerisches Simulationsmodell für das Detail Engineering der Wärmeübertragungsflächen entwickelt. Das Ziel bestand darin die Wärmeübertragung zwischen

CO₂ als Arbeitsfluid und Wasser als Wärmequelle und Wärmesenke (a) unter realitätsnahen Bedingungen zu simulieren und (b) auf dieser Basis Optimierungen bei der Auslegung der Bauteilgeometrie vorzunehmen. Das Modell bildet die Grundlage für die geometrische und thermodynamische Auslegung des Wärmetauschers innerhalb des StirliQ+-Systems. Innerhalb des Projekts wurde ein kontinuierlicher und diskontinuierlicher Betrieb der StirliQ-Anlage simuliert. Da die diskontinuierliche Betriebsweise für das finale Systemkonzept ausgewählt wurde, wird in den folgenden Abschnitten auf die Optimierungsergebnisse der Wärmeübertragungsflächen im diskontinuierlichen Betrieb eingegangen.

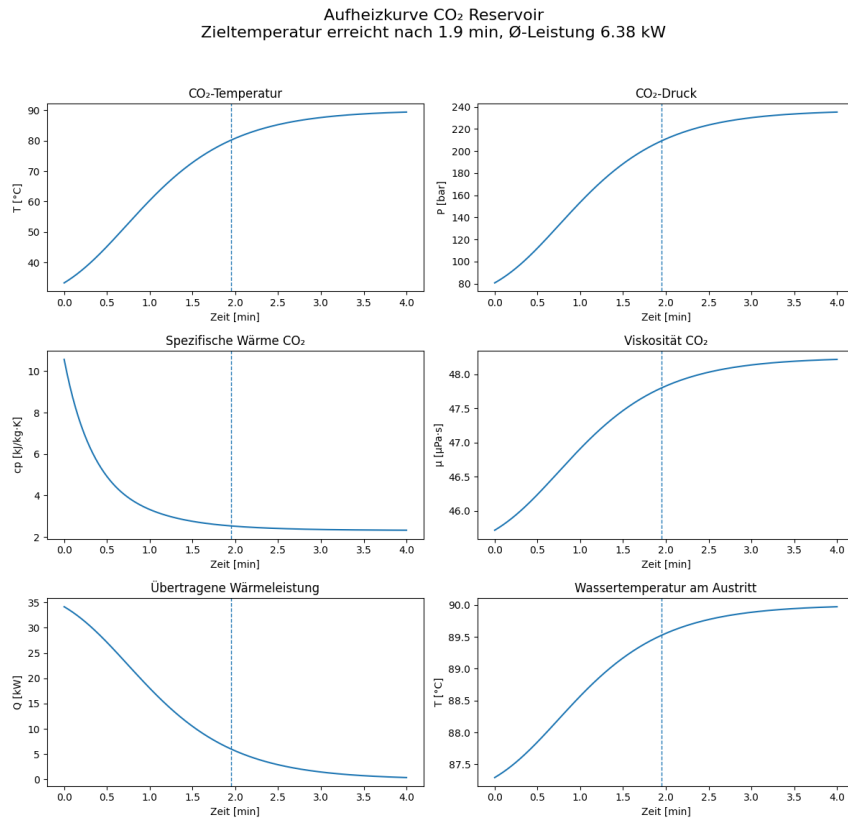
Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass das diskontinuierliche Konzept des StirliQ-Motors effizienter und technisch einfacher umsetzbar ist. Die Minimierung der im Prozess auftretenden Inert Energie³ kann durch das Ausnutzen des Joule-Thomson Effektes minimiert werden. Bei Expansion des Arbeitsmediums sinkt die Temperatur. Die gespeicherte Wärmeenergie im Wärmetauscher wirkt dieser Abkühlung entgegen, wodurch ein Aufheizen des expandierenden Arbeitsmediums im nächsten Prozessschritt weniger Wärmeenergie zugeführt werden muss. Dafür ist es notwendig, für zukünftig unterschiedliche Einsatzumgebungen in Verbindung mit den vorhandenen Heiz- und Kühlmedien, die erforderlichen zeitlichen Heiz- und Kühlverläufe als Auslegungsgrundlage zu berücksichtigen.

Simulationsergebnisse

Dieser instationäre Vorgang wurde wiederum mit dem in Python entwickelten Modell simuliert. Das Berechnungstool wurde dafür entsprechend erweitert, damit es die Auslegung der StirliQ-Wärmetauscher für den instationären Betrieb in unterschiedlichen Einsatzumgebungen unterstützt. Die Eingabeparameter für die Simulation sind neben der Ausgangs- und Zieltemperatur des Arbeitsmediums die Dimensionen des Wärmetauschers.

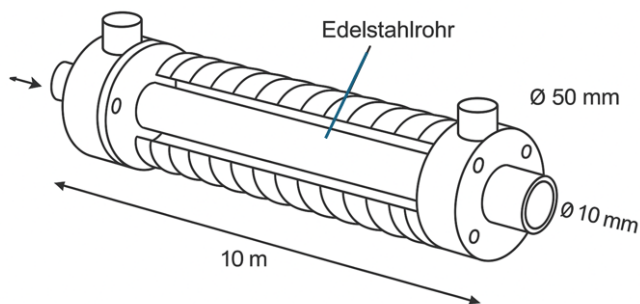
³ Während eines Zyklus wird das Arbeitsmedium erwärmt oder gekühlt. Die Masse des Wärmetauschers erfährt währenddessen eine ähnliche Temperaturänderung, wobei die darin gespeicherte Wärmeenergie „Inertenergie“ genannt und für den Prozess nutzbar gemacht werden kann.

Abbildung 11: Ergebnisübersicht Wärmetauschersimulation diskontinuierlicher Betrieb.



Die Ergebnisse in Abbildung 11 zeigen den zeitlichen Verlauf der Temperatur, des Drucks, der spezifischen Wärmekapazität, der Viskosität, der übertragenen Wärmeleistung sowie der Wassertemperatur am Austritt. Die gestrichelte Linie in der Mitte aller Diagramme zeigt, dass die Zieltemperatur von 80 °C nach 1.9 Minuten erreicht wurde. Der optimierte Wärmetauscher ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 12: Schematische Darstellung des CO₂-Reservoirs.



Steuerung Zykluszeit:

Ein Merkmal des StirliQ-Prozesses ist, dass die zugeführte Wärmestromdichte die Aufheizzeit eines Zyklus bestimmt. Weiters wird während des Entspannungszyklus die Wärmezufuhr unterbrochen. Dies hat den Hintergrund, dass bei jedem Zyklus die Heiz- und Kühlmedien zwischen den beiden Wärmetauschern vertauscht werden. In Folge würden die Massen der Wärmetauscher ebenfalls erwärmt, was zu einer beträchtlichen Inert Wärme führen würde, die zwar rückgewonnen wird, jedoch nicht dem eigentlichen KWK-Prozess zur Verfügung steht. Durch den Joule Thomson Effekt, welcher durch die Entspannung während des Arbeitszyklus zur Abkühlung des CO₂ im Hochdruck Reservoir führt, wird ein Teil der Inertwärme wieder aufgenommen. Um diesen Effekt zu steuern, wird die Zeit des Arbeitszyklus gezielt mit dem Öffnungsquerschnitt aus dem Hochdruckbehälter geregelt. Hierfür bedienen wir uns dem überkritischen Druckverhältnis zwischen Hochdruck und Niederdruckbehälter und steuern die ausströmende CO₂ Menge mittels des Öffnungsquerschnitts aus dem Hochdruckbehälter. Dadurch lässt sich der Arbeitszyklus zeitlich dem Aufheizzyklus angleichen, wodurch der Wärmestromdichte bezüglich der Abkühlung der Inertmassen während des Arbeitszyklus Rechnung getragen wird.

4.3.2 Minimierung der Leckageverluste im Axialkolbenmotor

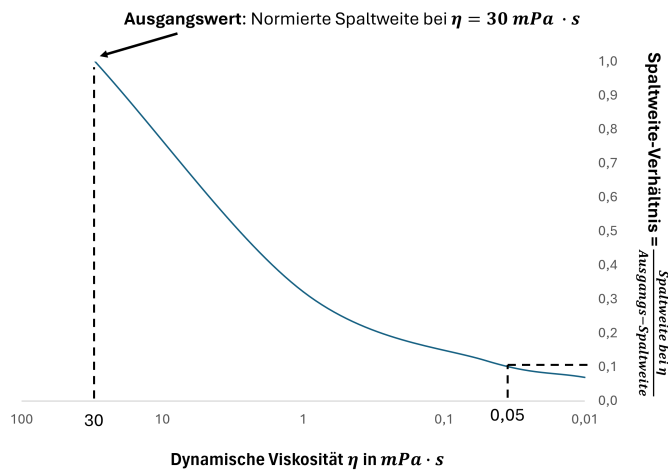
Im Zuge der Herstellung der neuen Laboranlage und ersten Versuchsdurchführungen stellten sich die von CO₂ durchströmten Reservoirs des Axialkolbenmotors als kritische Bereiche bei der Geometrie-Optimierung der Gesamtanlage heraus. Der für die Versuche eingesetzte handelsübliche Axialkolbenmotor ist ab Werk für den Betrieb mit Hydrauliköl konzipiert. Generell weisen Hydrauliköle andere Viskositäten auf als das für den StirliQ-Anlage herangezogene überkritische Medium CO₂. Hydrauliköle haben eine höhere Viskosität als das überkritische Medium CO₂ und sind daher hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften zähflüssiger als das verwendete überkritische CO₂. Daher sind die kritischen Bauelemente der Gesamtanlage in Hinblick auf Geometrie und Ausführung jene, die von CO₂ durchströmt werden und zusätzlich im Betrieb eine Relativbewegung aufweisen. Diese Elemente müssen daher entsprechend abgedichtet werden.

Während der ersten Laborversuche zeigte sich, dass insbesondere die Abstände der Steuerscheibe und Kolbentrommel zueinander hinsichtlich der Dichtheit des Gesamtsystems kritisch zu betrachten sind. Diese Bauteile weisen im Betrieb eine Relativbewegung zueinander auf. Die Dichtheit wird durch eine berührungsfrei ausgeführte Dichtvariante der sogenannten „Strömungsdichtung“ sichergestellt. Diese ist bei der für die eingesetzten Hydraulikmotoren ursprünglich vorgesehenen Verwendung von Hydraulikölen auch bei hohen Differenzdrücken gegeben. Mit den ersten Laborversuchen wurde festgestellt, dass schon beim Einsetzen der ersten Drehbewegung und der damit verbundenen Relativbewegung der StirliQ-Anlage gasförmiges CO₂ durch diese Strömungsdichtung entweicht, und dadurch die Anlage nicht vollständig in Betrieb genommen werden kann. Die Geometrie der StirliQ-Anlage im Bereich der betreffenden „Strömungsdichtung“ musste daher im Projekt entsprechend optimiert werden, sodass die Dichtheit des Systems auch bei der Verwendung von überkritischem CO₂ gegeben ist. Es zeigte sich, dass die Spaltweite zwischen Ventilplatte (Strömungsdichtung) und Trommelgehäuse mit der dritten Potenz den größten Einfluss auf die Leckage

aufweist. Die Leckagemenge $\dot{V}$ hängt also proportional zur dritten Potenz der Spaltweite s einer berührungsfrei ausgelegten Strömungsdichtung ab. Der Einfluss aller anderen Faktoren einschließlich der Stoffeigenschaft „dynamischen Viskosität“ η des Strömungsmediums ist geringer.

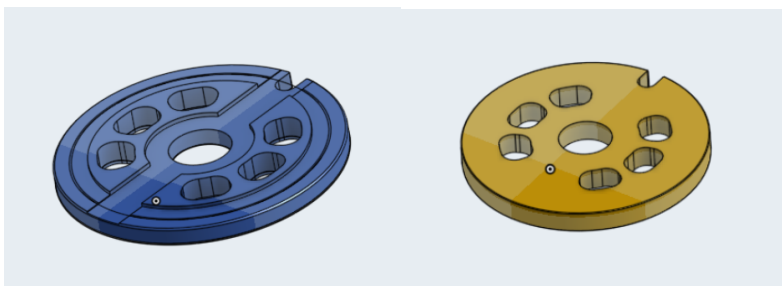
Abbildung 13 zeigt das Verhältnis der sich ergebenden Spaltweite zur Ausgangsspaltweite. Die Ausgangsspaltweite wurde für eine dynamische Viskosität $\eta = 30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ bestimmt. Dies entspricht dem dynamischen Viskositäts-Wertebereich von Hydrauliköl. Für CO_2 wurde eine dynamische Viskosität von $\eta = 0,05 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ angenommen. Es ist ersichtlich, dass bei einer dynamischen Viskosität von $\eta = 0,05 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ die Spaltweite nur mehr 1/10 der ursprünglichen Spaltweite aufweisen darf, um dieselbe Dichtheit wie bei der Ausgangsviskosität ($\eta = 0,05 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) zu gewährleisten.

Abbildung 13: Verhältnis der neuen zur ursprünglichen Spaltweite.



Die basierend auf diesen Ergebnissen eingesetzte Ventilplatte führte zu einer deutlichen Reduktion der Leckageströmungen. Die Ventilplatte ist vor und nach Adaption in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14: Ventilplatte des Axialkolbenmotors als Serienprodukt (links) und nach Adaption (rechts).



4.4 Versuchsaufbau im Labormaßstab

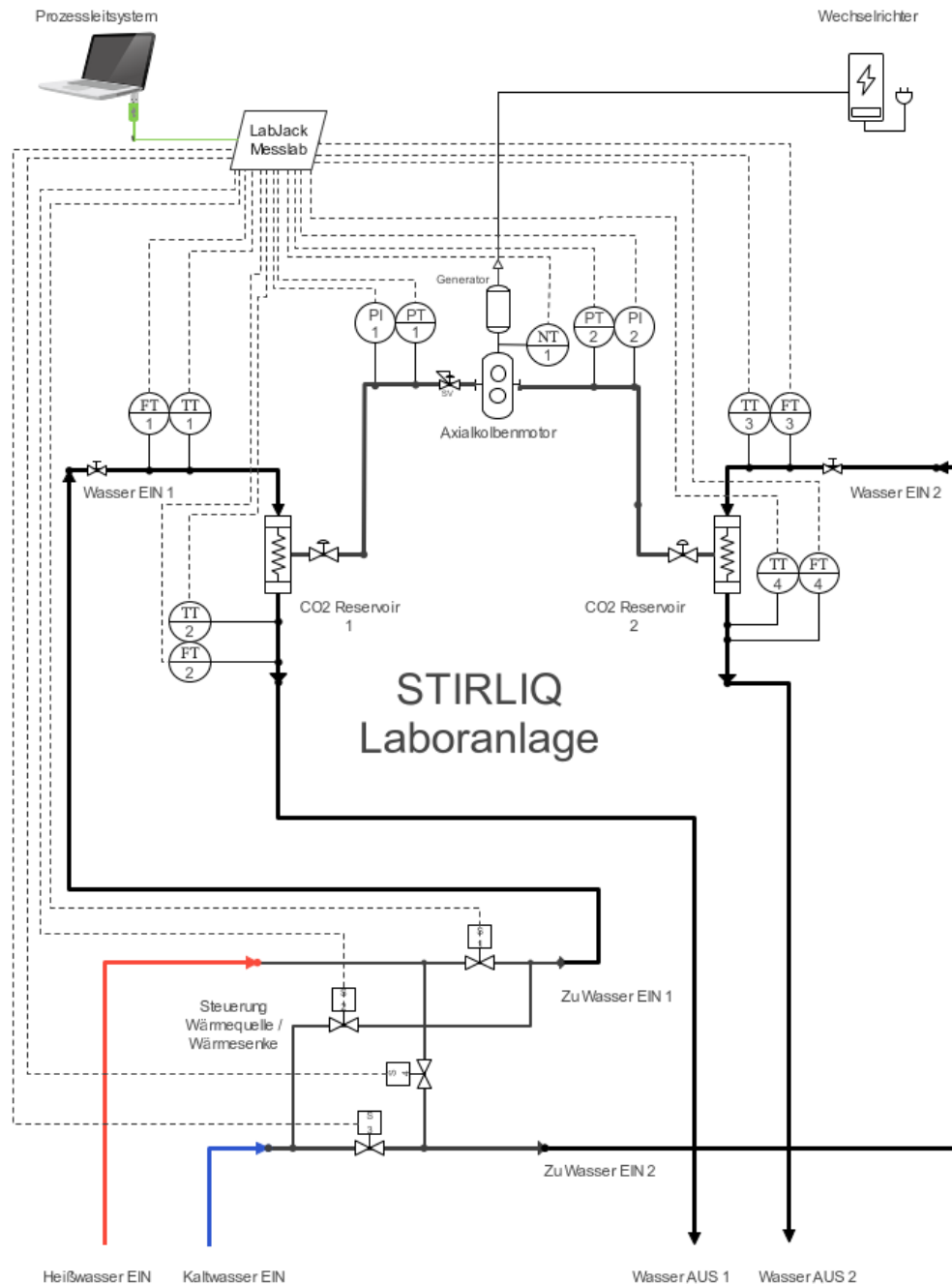
Die apparatetechnischen Hauptelemente der Laboranlage sind die beiden beheizbaren/kühlbaren CO₂-Reservoirs, der Axialkolbenmotor, der Generator, der Wechselrichter, die Steuerung der Wärmequelle und-senke, die Messtechnik sowie das Prozessleitsystem. In der folgenden Tabelle sind die Mess- und Regelinstrumente aufgelistet, die im Versuchsaufbau integriert wurden.

Tabelle 8: Auflistung der Mess- und Regelinstrumente.

Position	Bezeichnung	Beschreibung
1	FT1	Durchflussmessung
2	TT1	Temperaturmessung
3	FT2	Durchflussmessung
4	TT2	Temperaturmessung
5	PI 1	Manometer manuell
6	PT1	Druckmessung
7	PI 2	Manometer manuell
8	PT 2	Druckmessung
9	NT1	Drehzahlmessung
10	TT3	Temperaturmessung
11	FT3	Durchflussmessung
12	TT4	Temperaturmessung
13	FT4	Durchflussmessung
14	S1	Magnetventil
15	S2	Magnetventil
16	S3	Magnetventil
17	S4	Magnetventil

In der folgenden Abbildung ist das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema R&I (engl. Piping and Instrumentation Diagramm PID) abgebildet.

Abbildung 15: PID der StirliQ-Laboranlage.



Das Arbeitsfluid (CO₂) befindet sich in einem geschlossenen System – in den beiden CO₂-Reservoirs, die über den Axialkolbenmotor miteinander verbunden sind. Die beiden CO₂ Reservoirs können über die Rohrleitung „Wasser EIN 1 und Wasser EIN2“ beheizt oder gekühlt werden. Die zugeführten Energiemengen werden mittels Durchfluss- und Temperaturmessung erfasst (TT1, FT1, TT2, FT2, TT3, FT3, TT4, FT4). Die beiden CO₂-Reservoirs werden abwechselnd beheizt und gekühlt, wobei die entstehende Druckdifferenz die mechanische Energie am Axialkolbenmotor liefert. Das Umschalten der Arbeitszyklen (Vertauschen von Wärmequelle und -senke) erfolgt nach Erschöpfung eines Zyklus durch die Steuereinheit für die Wärmequelle / -senke mittels Magnetventil (S1, S2, S3, S4). Der Umschaltzeitpunkt erfolgt durch das Prozessleitsystem und wird mittels Druckgradientmessung (PT1, PT2) und Motordrehzahlmessung (N1) definiert. Die Motordrehzahlmessung liefert in Verbindung mit dem bekannten Schluckvolumen des Motors pro Umdrehung zudem den Durchfluss über den Axialkolbenmotor. Dadurch sind die Masseninhalte der beiden CO₂-Reservoirs zu jedem Zeitpunkt bekannt, wodurch über eine im Prozessleitsystem integrierte Soft-Sensor Strategie die thermodynamischen Leistungsdaten des Motors erfasst werden. Die beiden manuellen Manometer P1, P2 dienen der Überwachung des Prozesszustandes im Falle eines Ausfalls des Prozessleitsystems.

4.5 Versuchsdurchführung und -auswertung

Ziel der Versuche war die Optimierung des StirliQ-Prozesses mit Hilfe der Laboranlage. Als Ansatz zur Optimierung wurden die Startmassen der CO₂-Reservoirs variiert. Zu Beginn wurde eine Temperatur von 15 °C auf der Niedertemperatur- und 80 °C auf der Hochtemperaturseite festgelegt. Darüber hinaus wurde der entworfene Doppelrohrwärmetauscher für den labortechnischen Aufbau verwendet. Daraus resultiert, dass mit Hilfe der Startmassen im linken und rechten Reservoir der Betrieb in dessen Leistungsfähigkeit optimiert werden kann. Hierzu wurde eine Versuchsreihe mit sechs verschiedenen Startmassen und Verteilungen erstellt und untersucht (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Versuchsplan zur Optimierung der StirliQ-Laboranlage.

Kennwert	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Startmasse links in kg	12.67	11.54	5.32	12.58	14.67	10.62
Startmasse rechts in kg	13.77	11.16	12.64	11.18	13.8	10.28
Gesamtmasse CO ₂ im System in kg	26.44	22.70	17.96	23.76	28.47	20.90

Die linke Startmasse wurde in einem weiten Bereich variiert (5.32–14.67 kg), wobei die rechte Startmasse in einem engeren Bereich (10.28–13.80 kg) variiert wurde. Die Gesamtmasse entspricht jeweils der Summe der beiden Startmassen (17.96–28.47 kg). Der Plan umfasst Kombinationen aus Minimal- und Maximalwerten (z. B. V3 und V5), mittleren Werten (z. B. V1, V2, V4) sowie eine annähernde Wiederholung (V2 und V4) zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit. Damit werden sowohl Randbedingungen als auch typische Betriebspunkte des Systems abgedeckt.

Grafische Auswertung:

Die Messdaten der Laboranlage werden sekundlich in eine CSV-Datei exportiert. Für die Auswertung und Visualisierung der Messdaten wurde ein Java-Skript erstellt, das die CSV-Dateien der Versuchsläufe einliest und die Messdatenauswertung grafisch visualisiert. Für jede Datenreihe wurden acht Diagramme über der Zeit dargestellt, um den Verlauf des Prozesses nachvollziehen zu können. Hierzu wurden zunächst Dichte, Temperatur und Druck beider CO₂-Reservoirs dargestellt. In einem weiteren Diagramm sind die Differenzen von Temperatur und Druck beider Reservoirs gegenübergestellt. Die weiteren vier Diagramme beinhalten Werte mit einem Bezug zur Leistungsfähigkeit der Anlage. Hierunter zählen die Motordrehzahl, der Wirkungsgrad des Prozesses, die Verteilung der Wirkungsgradmesspunkte sowie eine korrigierte Darstellung der Druckdifferenz.

Quantitative Auswertung:

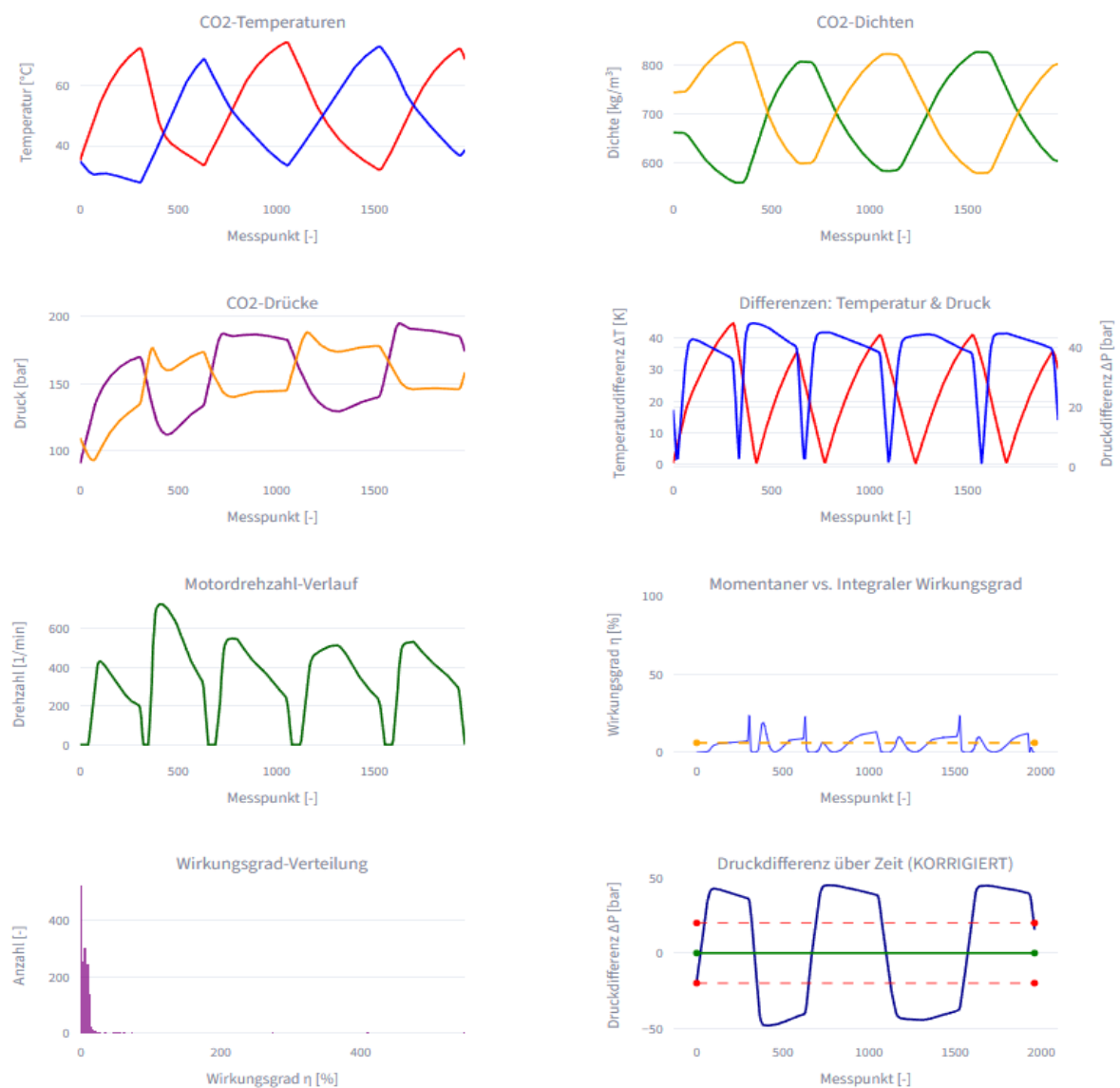
Neben der qualitativen bzw. grafischen Darstellung der Versuchsergebnisse, werden wichtige Kenngrößen tabellarisch dargestellt. Darunter gehören der mechanische Wirkungsgrad η_{mech} , der Carnot-Wirkungsgrad η_{Carnot} , das Verhältnis beider Wirkungsgrade zueinander, die zugeführte Wärmeenergie des CO₂-Reservoirs Q_{CO_2} , die, durch das System gewonnene Energie bei Expansion des Fluids $Q_{\text{CO}_2, \text{links}}$ bzw. $Q_{\text{CO}_2, \text{rechts}}$, der angewandte Druckbereich zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite, der Temperaturbereich zwischen beiden Reservoirs, die durchschnittlich verrichtete Heizleistung und durchschnittlich gewonnene mechanische Leistung.

4.6 Messergebnisse

Wie im Kapitel 4.5 beschrieben, sind in Abbildung 16 die zeitlichen Verläufe der CO₂-Temperaturen, -Dichten, -Drücke sowie deren Differenzen für beide CO₂-Reservoirs farblich für Versuchsreihe V1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das System aus der Umgebungstemperatur startet und sich ein gegenläufiges Betriebsverhalten beider CO₂-Reservoirs zueinander einstellt. Bis zum Messpunkt 1000 lässt sich das Einfahren des Systems feststellen, was vor allem in der Gegenüberstellung der CO₂-Drücke zu erkennen ist. Ein weiteres Diagramm zeigt die Motordrehzahl für jeden Zyklus, wobei ausschließlich der Betrag der Drehzahl dargestellt wurde. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zum durchschnittlichen Verhalten ab Messpunkt 1000 zunächst ein niedriges und anschließend ein höheres Drehzahlmaximum erreicht wird. Hieraus ist das Einschwingverhalten des Systems zu erkennen. Neben der Drehzahl wurde auch der integrale und momentane Wirkungsgrad dargestellt, worin auch erst ab Messpunkt 1000 ein wiederkehrendes Muster erkennbar wird.

In Abbildung 16 wurden sekundliche Messdaten ausgewertet, woraus ersichtlich ist, dass für die energetische Bewertung des StirliQ Prozesses eine integrale Betrachtung über mehrere Zyklen erforderlich ist. Die Darstellung unrealistisch hoher Wirkungsgradspitzen resultiert aus der Tatsache, dass der mechanische Wirkungsgrad nur bei Motorlauf berechnet werden kann. Bei Motorstart wird die sekundliche Wärmezufuhr der sekundlichen Motorleistung gegenübergestellt, was den Wärmeeintrag während der Motor Stillstandszeit nicht erfasst. Die Integration der gesamten eingebrachten Wärmemenge sowie der Motorleistung über mehrere Zyklen führt zu einer realistischen Bewertung - dem Integralen Wirkungsgrad.

Abbildung 16: Messergebnisse für die Versuchsreihe V1.



In der Folgenden Tabelle sind die berechneten und gemessenen Werte aus Versuchsreihe V1 bis V6 dargestellt, um eine Bewertung über die Leistungsfähigkeit der StirliQ-Anlage mit den gewählten Startmassen durchzuführen.

Tabelle 10: Ergebnisse der Versuchsdurchläufe.

Versuchsdurchlauf	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Integraler mech. Wirkungsgrad [%]	4.27	6.10	4.86	5.76	3.18	7.79
Integraler Carnot-Wirkungsgrad [%]	13.48	12.43	14.39	12.44	13.62	12.89
Carnot-Faktor [%]	31.7	49.1	33.7	46.4	23.3	60.4
Druckbereich	90.6 –	93.3 –	67.0 –	97.8 –	102.4 –	90.7 –
Temperaturbereich [°C]	27.7 – 74.6	32.3 – 75.7	26.0 – 76.3	32.1 – 75.4	26.7 – 73.9	31.5 – 76.6
Durchschnittliche Heizleistung [W]	3243	2943	2896	2990	3363	2869
Durchschnittliche Motorleistung [W]	139	180	141	173	107	224
Wärme vom heißen Reservoir [kWh]	1.7708	1.8566	2.1488	1.8855	2.1194	1.8117
Resultierende mech. Energie [kWh]	0.0756	0.1133	0.1044	0.1087	0.0673	0.1411

Folgende wichtige Erkenntnisse zur Prozess-Effizienz (Verhältnis mech. Wirkungsgrad / Carnot Wirkungsgrad) konnten aus der Laboranlage gewonnen werden:

- Das Temperaturniveau des Kühlmediums ist in der praktischen Anwendung oft limitiert – es sollte jedoch möglichst am kritischen Punkt des Arbeitsmediums oder darunter liegen
- Die Temperatur des vorhandenen Kühlmediums definiert indirekt den Druck auf der Niederdruckseite – dieser sollte den kritischen Druck nicht unterschreiten.

- Aus den ersten beiden Punkten ergibt sich in Abhängigkeit der beiden CO₂-Reservoir Volumen die Füllmenge an CO₂
- In der Folge bestimmt die Wärmestromdichte sowie das Schluckvolumen des Motors in Verbindung mit der Temperatur des Heizmediums den maximalen Arbeitsdruck des warmen Reservoirs in der Einsatzumgebung

Wesentliche Erkenntnis aus der Laboranlage sind die Relevanz des Startpunktes im System:

- Die Füllmenge des Arbeitsmediums muss hinsichtlich der maximalen Temperaturspreizung optimiert werden.
- Die Erwärmung des kalten CO₂-Reservoirs sowie die Kühlung des warmen CO₂-Reservoirs führen zum treibenden Druckgefälle. Im Grenzfall der Erschöpfung des ersten Zyklus sollten im kühlen Reservoir möglichst Startbedingungen nahe dem kritischen Punkt herrschen. Dies ist die Auslegungsgrundlage für die Füllmenge des Arbeitsmediums, um die Prozesseffizienz zu maximieren. Wird die optimale Füllmenge des Arbeitsmediums überschritten, führt dies zu Betriebsdrücken abseits des kritischen Druckes mit daraus resultierendem Effizienzverlusten (siehe Datensatz V5 – Effizienz = 23.3 %). Im Gegensatz dazu führt eine optimale Konfiguration des StirliQ-Systems hinsichtlich der Einsatzumgebung zu wesentlich höherer Effizienz (siehe Datensatz V6 – Effizienz = 60.4 %).
- Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass ein Optimum dann entsteht, wenn die Startmassen für beide Reservoirs nahezu identisch sind (siehe Datensatz V2 und V6) und die Gesamtmasse so weit reduziert wird, dass der kritische Druck im kalten Reservoir nicht unterschritten wird.

In der Laboranlage wurden unter optimierten Bedingungen eine Temperatur von 31.5 °C bei einem Druck von 90.7 bar im kühlen CO₂-Reservoir erreicht. Berechnungen zeigten, dass bei einer Reduzierung der Temperatur auf 27 °C und einem daraus resultierenden „kalten“ Systemdruck eine Effizienz von über 70 % erreicht werden könnte.

4.7 Integration in übergeordnete Energiesysteme

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit das StirliQ-Aggregat in verschiedene übergeordnete Energiesysteme integriert werden kann, um bislang ungenutzte Abwärmepotenziale in elektrische Energie umzuwandeln bzw. den StirliQ Prozess als wärmegeführte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu integrieren. Dabei wurden zwei unterschiedliche Anwendungsszenarien betrachtet: (a) der Einsatz in einer typischen Biomasse-Feuerungsanlage eines Einfamilienhauses und (b) die Integration in ein Fernwärmesystem. In beiden Fällen dient der Heizungsvorlauf mit einem Temperaturniveau von 90 °C als Wärmequelle für das StirliQ-Aggregat. Der zentrale Unterschied zwischen den Szenarien liegt in der Ausgestaltung der Wärmesenke für das StirliQ-Aggregat, die die Ausgangstemperatur des Arbeitsmediums des StirliQ-Prozesses bestimmt: Während

bei der Fernwärmeeinbindung eine Rücklauftemperatur von zirka 45 bis 60 °C angenommen werden kann, wurde für das Einfamilienhaus eine Fußbodenheizung mit einer deutlich niedrigeren Rücklauftemperatur von 25 bis 30 °C zu Grunde gelegt. (BMIMI, 2015) (Lygnerud, 2022) (Stippe, 2025) (Schlobach, 2025)

Für die Untersuchung des Integrationspotenzials in übergeordnete Energiesysteme, wurde eine Ausgangstemperatur von 30 °C für den Einfamilienhausbetrieb und 50 °C für den Fernwärmeeinsatz angenommen. Da die Wärmesenke die Ausgangstemperatur des Arbeitsmediums für den StirliQ-Prozess bestimmt, verschiebt sich bei höherer Wärmesenkentemperatur der gesamte thermodynamische Verlauf (Arbeitsmedium CO₂). Beim Einsatz des StirliQ-Aggregats in Fernwärmesystemen ergibt sich aufgrund des erhöhten Temperaturniveaus auf der Seite der Wärmesenke eine thermodynamische Herausforderung, die jedoch durch den Einsatz eines dafür geeigneteren Arbeitsmediums als CO₂ thermodynamisch beherrschbar ist. Wie in Kapitel 4.2 wird für das höhere Temperaturniveau im Fernwärmeszenario R32 als Arbeitsmedium verwendet.

4.7.1 Anwendungsszenario 1: Einfamilienhaus mit Biomassefeuerungsanlage und Fußbodenheizung

Im ersten Anwendungsszenario wird der Einsatz des StirliQ-Aggregats in einem typischen Einfamilienhaus betrachtet, das mit einer Biomasse-Feuerungsanlage und einer Fußbodenheizung ausgestattet ist. Es wurde dabei angenommen, dass der StirliQ-Prozess am Kesselaustritt wasserseitig integriert wird. An dieser Stelle wurde dem Vorlaufstrom die Wärmeenergie für den StirliQ Prozess entzogen und die Abwärme des StirliQ dient zur Rücklaufanhebung.

Aufgrund der niedrigen Rücklauftemperatur der Fußbodenheizung, die bei ungefähr 25 bis 30 °C liegen (Stippe, 2025) (Schlobach, 2025), ergeben sich vorteilhafte Bedingungen für die Wärmesenke des StirliQ-Aggregats. Zur Beurteilung des elektrischen Potenzials wurde ein Lastgang der Biomasse-Feuerungsanlage (Kesselleistung und Rauchgastemperatur) verwendet. Die zugrunde liegenden, generischen Daten lagen für die Abschätzungen in einer stundenfeinen Auflösung vor. Es wurde eine maximale Kesselleistung von ca. 5 kW im betrachteten Zeitraum der Anlage angenommen. Die der Abschätzung zu Grunde gelegten technischen Anlagendaten der betrachteten Biomasse-Feuerungsanlage sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Anlagedaten.

Kennzahlen	Einheit	Wert
Max. Kesselleistung im Betrieb	in kW	5
Kessel-Wirkungsgrad	in %	85
Bereitgestellte Wärmeenergie pro Jahr	in kWh	13700

Basierend auf den Modellergebnissen (vgl. mit Tabelle 3) wurde ein angenommener durchschnittlicher StirliQ-Aggregat Wirkungsgrad von 12,9 % für den betrachteten Zeitraum berechnet. Darüber hinaus konnten auf den hier dargestellten Abschätzungen mit dem StirliQ-Aggregat rund 1767 kWh pro Jahr an elektrische Energie aus dem StirliQ Betrieb bereitgestellt werden.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der jährlichen Kesselenergie und der rechnerisch ermittelten, mit dem StirliQ-Aggregat bereitstellbaren elektrischen Energie.

Kennzahl	Einheit	Wert
Energie-Kessel	in MWh/a	13,7
StirliQ-Aggregat: Bereitgestellte elektrische Energie	in kWh/a	1767

In diesem Szenario wurde der StirliQ-Prozess an einer hinsichtlich energetischer Verwertung ungünstigen Stelle eingebaut – mit dem Ziel, Adaptierungen am Biomassekessel zu vermeiden. Eine deutlich erhöhte energetische Verwertung würde sich ergeben, wenn der StirliQ-Prozess direkt an den Rauchgaswärmetauschern des Heizkessels integriert würde. An dieser Stelle wären hohe Wirkungsgrade des StirliQ-Prozesses erreichbar, würden aber Adaptionen am Biomassekessel bedingen.

4.7.2 Anwendungsszenario 2: Integration des Aggregats in ein Fernwärmesystem.

Im zweiten Anwendungsszenario wird der Einsatz des StirliQ-Aggregats in einem Fernwärmesystem untersucht, das mit einer zentralen Biomasse-Feuerungsanlage betrieben wird. Wiederum wurde der StirliQ-Prozess zwischen Vorlauf und Rücklauf des Fernwärmenetzes positioniert. Ziel ist es, das Potenzial der Erzeugung elektrischer Energie zum Energiepreis der Biomasse im Kontext eines großtechnischen, netzgebundenen Versorgungssystems zu bewerten.

Das rechnerische Vorgehen zur energetischen Abschätzung entspricht jenem im Anwendungsszenario 1 und wurde analog auf die Randbedingungen des Fernwärmesystems angewendet.

Basierend auf den hier dargestellten Abschätzungen kann mit der Integration des StirliQ-Aggregates rund 697 MWh pro Jahr an elektrische Energie bereitgestellt werden. Der durchschnittliche Wirkungsgrad wurde mit 7,5% abgeschätzt und liegt aufgrund der höheren Rücklauftemperaturen unter jenem von Anwendungsbeispiel 1.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der jährlichen Kesselenergie und der rechnerisch ermittelten, mit dem StirliQ-Aggregat bereitstellbaren elektrischen Energie.

Kennzahl	Einheit	Wert
Energie-Kessel	in MWh/a	9300
StirliQ-Aggregat: Bereitgestellte elektrische Energie	in MWh/a	697

4.7.3 Fazit: Thermodynamische Kriterien & Rahmenbedingungen zur Integration des Aggregats in übergeordnete Systeme

Auf Grund der bisherigen Optimierung des StirliQ-Aggregats auf das Arbeitsmedium CO₂ – insbesondere im Hinblick auf Dichtheitsanforderungen, Materialverträglichkeit und Systemintegration – besteht aus konstruktiver und prozesstechnischer Sicht die Möglichkeit, den Motor mit anderen Arbeitsmedien (z.B. R32) je nach thermodynamischen Anforderungen mit voraussichtlich nur wenigen bzw. geringen technischen Anpassungen zu betreiben. Entscheidend für die Auswahl eines geeigneten Arbeitsmediums ist dessen thermodynamisches Verhalten im T-s-Diagramm, das eine möglichst vollständige Ausnutzung des verfügbaren Abwärmepotenzials über den gesamten StirliQ-Prozess hinweg gewährleisten muss. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl für den Anwendungsfall im Einfamilienhaus als auch im Fernwärmenetz, eine elektrisch nutzbare Energie von ca.

12,9 % der Kesselenergie möglich ist. Dieser Wert wurde dabei an einer Stelle hinsichtlich Integration des StirliQ-Prozesses im Gesamtsystem erreicht, an der keine technischen Veränderungen am Biomasse Kessel notwendig sind. Deutlich höhere Umwandlungspotentiale ergeben sich bei der Integration des StirliQ-Prozesses an Stellen des Gesamtsystems, in denen das Rauchgas noch deutlich höhere Temperaturniveaus aufweist.

4.8 Beitrag zum Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“

Im Sinne einer missionsorientierten Innovationspolitik wurde mit der „Mission Klimaneutrale Stadt“ die drei Schwerpunkte „Energiewende“, „Mobilitätswende“ und „Kreislaufwirtschaft“ verankert. Das vorliegende Projekt StirliQ+ trägt zum Schwerpunkt „Energiewende“ bei.

Eine innovative Technologie zur Nutzung bislang ungenutzter Abwärmepotenziale wurden im Projekt weiterentwickelt und labortechnisch demonstriert. In Städten trägt der Wärme- und Energiesektor einen großen Anteil bei den Emissionen und im Energieverbrauch bei. Mit der Entwicklung eines neuartigen, auf CO₂- und alternativen Arbeitsmedien basierenden Prozesses wird die effiziente Umwandlung von Niedertemperatur-Abwärme in elektrische Energie ermöglicht. Dadurch können Energiesysteme resilienter, effizienter und klimafreundlicher gestaltet werden.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zeigen, dass das StirliQ-Aggregat sowohl im kleinskaligen Einsatz (z. B. in Einfamilienhäusern mit Biomassefeuerung und Fußbodenheizung) als auch im großskaligen Kontext (z. B. Integration in Fernwärmesysteme) eingebunden werden kann. Damit bietet die Technologie eine flexible Lösung, die sowohl zur Dekarbonisierung der Gebäudeversorgung als auch zur Effizienzsteigerung urbaner Energiesysteme beiträgt.

Insbesondere folgende Elemente adressiert das Projekt StirliQ+ hinsichtlich Energiewende:

Effizienzsteigerung im Energiesystem: Abwärmenutzung reduziert Primärenergiebedarf und vermeidet Treibhausgas-Emissionen mit positiver Wirkung auf Klima und Dekarbonisierung.

Sektorübergreifende Kopplung: Die Technologie verbindet Wärmeversorgung mit Stromerzeugung und schafft so Synergien für klimaneutrale Energiesysteme. Exergetisch minderwertige Abwärme wird zur Bereitstellung von hochwertiger elektrischer Energie herangezogen.

Dezentrale und skalierbare Lösungen: Vom Einfamilienhaus bis zur Einbindung in Fernwärme. Die Resilienz von dezentralen Systemen wird durch den Ansatz gestärkt, da insbesondere in Kombination mit Speichern autarke Systeme geschaffen werden können.

Innovations- und Technologievorsprung: Durch die Kombination fortschrittlicher Simulationen, neuartiger Anlagentechnik und angepasster Arbeitsmedien wird ein Beitrag zu international wettbewerbsfähigen Klimaschutztechnologien aus Österreich geleistet.

5 Schlussfolgerungen

Das Projekt StirliQ+ hat gezeigt, dass die Nutzung von überkritischen Fluiden (insbesondere CO₂) in Stirling-basierten Prozessen einen innovativen und technisch realisierbaren Ansatz zur Umwandlung bislang ungenutzter Abwärme in elektrische Energie darstellt. Durch die Kombination von Modellierung, Simulation und praktischen Laborversuchen konnte das Projektteam sowohl die Funktionsfähigkeit der Technologie belegen als auch zentrale Stellschrauben für deren Optimierung identifizieren. Damit wurde eine tragfähige Grundlage für die Weiterentwicklung in Richtung marktfähiger Lösungen geschaffen.

Fachliche Einschätzung und gewonnene Erkenntnisse

Ein zentrales Ergebnis der Arbeit ist die Erkenntnis, dass konventionelle Prozesssimulationsumgebungen wie Aspen HYSYS und DWSIM nur eingeschränkt in der Lage sind, das hochkomplexe thermodynamische Verhalten von CO₂ im überkritischen Bereich und unter instationären Betriebsbedingungen realitätsnah abzubilden. Erst durch die Entwicklung eines eigenen Python-Modells, das eng an physikalische Grundlagen gekoppelt ist, konnten die Prozessdynamiken korrekt simuliert und mit den Messergebnissen in Übereinstimmung gebracht werden. Für das Projektteam bedeutet dies nicht nur einen erheblichen Wissensgewinn in Bezug auf die Grenzen bestehender Software, sondern auch die Etablierung einer flexiblen eigenen Modellierungsumgebung, die künftig als Werkzeug für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten insbesondere hinsichtlich Weiterentwicklung der StirliQ-Technologie dienen kann.

Die Laborversuche bestätigten darüber hinaus die theoretischen Annahmen: Der Startpunkt des Prozesses nahe am kritischen Punkt von CO₂ erwies sich als optimal, um mit minimalem Energieaufwand hohe Druckunterschiede und damit nutzbare mechanische Arbeit zu erzeugen. Weitere wichtige Erkenntnisse ergaben sich aus der Variation der Füllmengen in den Reservoirs, der Optimierung von Wärmetauscherflächen sowie der Minimierung von Leckageverlusten im Axialkolbenmotor. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Technologie im Labormaßstab zuverlässig arbeitet und sich durch handelsübliche Komponenten skalieren lässt.

Weiterarbeit mit den Projektergebnissen

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen plant das Projektteam zwei zentrale Entwicklungslinien: Zum einen soll die technische Optimierung der Bauteile weiter vorangetrieben werden. Insbesondere Dichtungssysteme und Wärmetauscher bieten Potenzial für Verbesserungen, die eine höhere Effizienz und Betriebssicherheit gewährleisten. Zum anderen wird die Integration der StirliQ-Technologie in reale Energiesysteme weiter vertieft. Hierbei sollen konkrete Anwendungsszenarien von der Einbindung in Biomasseheizungen im Einfamilienhaus bis zur Nachrüstung von Fernwärmeanlagen auf ihre Wirtschaftlichkeit und technische Machbarkeit hin untersucht werden. Parallel dazu wird die Eignung alternativer Arbeitsmedien wie R32 oder weiterer Kältemittel

analysiert, um das Verfahren an unterschiedliche Temperaturniveaus anzupassen und die Einsatzbreite zu erhöhen.

Relevanz für verschiedene Zielgruppen

Die Projektergebnisse sind für eine Vielzahl von Akteuren interessant. Industrieunternehmen und Energieversorger profitieren durch die Möglichkeit, Abwärme aus Produktionsprozessen oder Fernwärmesystemen in Strom umzuwandeln und so die Energieeffizienz zu steigern. Betreiber von Biomasseanlagen erhalten mit StirliQ eine Technologie, die sich mit vergleichsweise geringen Zusatzinvestitionen integrieren lässt und die Eigenstromerzeugung fördert. Für die wissenschaftliche Gemeinschaft sind insbesondere die entwickelten Simulationsmodelle von Relevanz, da sie neue Ansätze zur Abbildung überkritischer Prozesse eröffnen. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch von politischen Entscheidungsträgern und Stadtplanern genutzt werden, um die Mission „Klimaneutrale Stadt“ mit skalierbaren, dezentralen Energietechnologien zu unterstützen.

Sicherheitstechnische & normative Rahmenbedingungen

Mit der Nutzung von überkritischen Fluiden sind jedoch auch normative und sicherheitstechnische Herausforderungen verbunden. Für CO₂, das unter hohen Drücken und Temperaturen betrieben wird, gelten strenge Anforderungen an Druckentlastung, Leckageerkennung, Raumluftüberwachung sowie an die bauliche Sicherheit der Anlagen. Hinzu kommen Vorschriften für Dokumentation, Wartung und Schulung des Betriebspersonals. Beim Einsatz alternativer Medien wie R32 sind zusätzliche regulatorische Aspekte zu beachten, da viele Kältemittel aufgrund ihres Treibhauspotenzials oder ihrer Brennbarkeit speziellen Einschränkungen unterliegen. Für eine breite Markteinführung ist es daher erforderlich, diese Hürden in enger Abstimmung mit Gesetzgebern und Zertifizierungsstellen zu adressieren.

Marktpotenzial

Langfristig besitzt die Technologie das Potenzial, sich als Baustein einer dezentralen, klimaneutralen Energieversorgung zu etablieren. Mit steigender Nachfrage nach Lösungen zur CO₂-Reduktion und nach flexiblen Speicher- und Umwandlungstechnologien ist ein wachsender Markt zu erwarten, der von der Skalierbarkeit und Modularität der StirliQ-Technologie profitieren wird.

6 Ausblick und Empfehlungen

Im Rahmen des Projektes StirliQ+ konnten wesentliche Grundlagen hinsichtlich der Prozessführung sowie der simulationstechnischen Abbildung des Gesamtprozesses geschaffen werden. Aufbauend auf neu entwickelten und weiterentwickelten Bauteilen und Prozessführung wurde zudem eine Prototyp-Versuchsanlage realisiert. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Technologie ein erhebliches Potenzial für eine nachhaltige Energienutzung besitzt, da sie insbesondere bei Temperaturniveaus einsetzbar ist, die bislang weitgehend ungenutzt bleiben und in unterschiedlichste übergeordnete Systeme integriert werden kann. Um den Entwicklungspfad in Richtung eines Demonstrationsvorhabens erfolgreich fortzuführen, lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

Langzeitstabilitätsversuche

Ein zentrales Entwicklungsziel künftiger Arbeiten sollte in der Durchführung von Langzeitstabilitätsversuche und realen Einsatzbedingungen liegen. Diese dienen zum einen dazu, die Standfestigkeit und insbesondere Dichtheit sämtlicher Systemkomponenten über längere Betriebszeiträume sicherzustellen, und zum anderen, das Verhalten des StirliQ-Motors im Dauerbetrieb unter realen Lastprofilen zu evaluieren. Hierbei sind insbesondere potenzielle Verschleißerscheinungen sowie thermische und mechanische Belastungen zu untersuchen. Nur durch umfangreiche Dauertests in Demonstrationsanlagen kann die Zuverlässigkeit der Anlage für den praktischen Einsatz auch außerhalb von Forschungs- und Demonstrationsprojekten nachgewiesen werden.

Einsatz alternativer Arbeitsmedien

Ein weiterer wichtiger Schritt für die Weiterentwicklung ist die Erprobung der Technologie mit unterschiedlichen Arbeitsmedien. Die Projektergebnisse verdeutlichen, dass zur optimalen Ausnutzung des Energiepotenzials – abhängig von den jeweiligen Betriebsfenstern und Systemeigenschaften der übergeordneten Energiesysteme – der Einsatz verschiedener Arbeitsmedien erforderlich ist.

Solche Untersuchungen ermöglichen nicht nur die technische Absicherung hinsichtlich z.B. Dichtheit des Systems bei alternativen Arbeitsmedien, sondern liefern auch wertvolle Erkenntnisse über die Betriebsgrenzen der Technologie. Durch systematische Tests können beispielsweise geeignete Kombinationen aus Arbeitsmedien und Betriebsparametern identifiziert werden, die eine besonders hohe Effizienz versprechen.

Die Auswahl alternativer Medien eröffnet die Möglichkeit, die Technologie an spezifische Anwendungen oder Randbedingungen anzupassen und damit neue Einsatzfelder zu erschließen. Dies be-

trifft sowohl die Anpassung an unterschiedliche Temperaturniveaus als auch die Integration in verschiedenartige Energiesysteme. Auf diese Weise wird nicht nur die Flexibilität der Technologie erhöht, sondern auch ihr Potenzial für eine breite industrielle Nutzung deutlich gestärkt.

Zyklische Stromproduktion und Integration in Energiesysteme

Um die Praxistauglichkeit weiter zu steigern, sollten im nächsten Schritt Tests zur zyklischen Stromproduktion durchgeführt werden. Hierbei kann auf bestehende Wechselrichtertechnologien aus dem Bereich der Windturbinen zurückgegriffen werden. Solche Untersuchungen lassen sich zur Integration der StirliQ-Anlage in übergeordnete Energiesysteme praxisnah durch Demonstrationsprojekte erproben. Eine stabile Kopplung an Infrastrukturen ist entscheidend, um die Technologie von einer Laborumgebung hin zu realen Demonstrationsprojekten zu überführen.

Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse erscheint die Realisierung eines Demonstrationsprojekts grundsätzlich vielversprechend. Chancen liegen insbesondere in der hohen Flexibilität des Systems, seiner Skalierbarkeit in Abhängigkeit der bestehenden Systemleistung und der Möglichkeit, vorhandene Technologien (z. B. Standardwechselrichter) zu nutzen. Herausforderungen und Risiken bestehen vor allem in der Sicherstellung der Langzeitstabilität sowie in der Validierung der Technologie unter wechselnden realen Einsatzbedingungen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung der thermischen Kompression mittels Peng Robinson, SRK und Span Wagner.....	24
Tabelle 2: Berechnung der thermischen Kompression mittels SRK-Volumenkorrektur und Span Wagner.....	24
Tabelle 3: Eingabe- und Vergleichsparameter der Open Source sowie der Vergleichssoftware Aspen HYSYS.....	25
Tabelle 4: Vergleich der Potentialberechnung des Entspannungszyklus zwischen Aspen HYSYS und Python-Modell.....	29
Tabelle 5: Betriebsvarianten der Prozessoptimierung.....	31
Tabelle 6: Optimierungsergebnisse der Prozess-Thermodynamik für verschiedene Zieltemperaturen.....	33
Tabelle 7: Optimierungsergebnisse der Prozess-Thermodynamik für verschiedene Arbeitsmedien.	34
Tabelle 8: Auflistung der Mess- und Regelinstrumente.....	39
Tabelle 9: Versuchsplan zur Optimierung der StirliQ-Laboranlage.....	41
Tabelle 10: Ergebnisse der Versuchsdurchläufe.....	44
Tabelle 11: Zusammenfassung der Anlagedaten.....	47
Tabelle 12: Gegenüberstellung der jährlichen Kesselenergie und der rechnerisch ermittelten, mit dem StirliQ-Aggregat bereitstellbaren elektrischen Energie.....	47
Tabelle 13: Gegenüberstellung der jährlichen Kesselenergie und der rechnerisch ermittelten, mit dem StirliQ-Aggregat bereitstellbaren elektrischen Energie.....	48
Tabelle 14: Beschreibung der Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet wurden.....	61
Tabelle 15: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert wurden.....	62
Tabelle 16: Beispiel für die Beschreibung der Metadaten im Projekt.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungsgrad des StirliQ-Motors aus dem Vorgängerprojekt.	12
Abbildung 2: T-S-Diagramm von CO ₂ mit dem effizientesten Startpunkt (rote Markierung).	13
Abbildung 3: Prozesskonzept in diskontinuierlicher Betriebsweise (übernommenes Konzept)	15
Abbildung 4: Prozessabbildung von StirliQ mit Aspen HYSYS.	20
Abbildung 5: Flussdiagramm des entwickelten Open Source Modells mit den einzelnen Modellkomponenten.	21
Abbildung 6: Verhalten des Isentropenexponenten im Arbeitsbereich des StirliQ-Prozesses.	26
Abbildung 7: Kritischer Gegendruck in Abhängigkeit von Behälterdruck und Behältertemperatur.	27
Abbildung 8: Temperaturverlauf während der Expansion von CO ₂ von 200 auf 80bar.	30
Abbildung 9: T-S-Diagramm für Betriebsvariante 1.	32
Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf des Entspannungsanteils des Zyklus für Betriebsvariante 1.	32
Abbildung 11: Ergebnisübersicht Wärmetauschersimulation diskontinuierlicher Betrieb.	36
Abbildung 12: Schematische Darstellung des CO ₂ -Reservoirs.	36
Abbildung 13: Verhältnis der neuen zur ursprünglichen Spaltweite.	38
Abbildung 14: Ventilplatte des Axialkolbenmotors als Serienprodukt (links) und nach Adaption (rechts).	38
Abbildung 15: PID der StirliQ-Laboranlage.....	40
Abbildung 16: Messergebnisse für die Versuchsreihe V1.	43

Literaturverzeichnis

Aspen Technology: *Aspen Hysys. The Industry #1 Process Simulation Software.*

<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspens-hysys> abgerufen am 21.05.2024.

Aspen Technology, Inc.: Aspen Hysys Thermodynamics COM Interface. Reference Guide. USA, Burlington. https://esupport.aspentech.com/s_Article?key=131880 abgerufen am 21.05.2024.

Böge Alfred: *Vieweg Handbuch Maschinenbau.* Wiesbaden Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag GmbH, 2007.

Belaud Jean-Pierre & Pons Michael: Open Software Architecture For Process Simulation: The Current Status of CAPE-OPEN Standard. *Computer Aided Chemical Engineering.* 2002.

Bell Ian H.: *Coolprop.* <http://www.coolprop.org/> abgerufen am 01.10.2024.

BMIMI: *Ein Neuanfang für die Fernwärme.* <https://infothek.bmimi.gv.at/ein-neuanfang-fuer-die-fernwaerme/> abgerufen am 10.03.2024.

Chao K C & Seader J D: *A general correlation of vapor-liquid equilibria in hydrocarbon mixtures.* AIChE Journal, 599-605, 1961.

DWSIM: *Chemical Process Simulation for Everyone.* <https://dwsim.org/> abgerufen am 03.03.2024.

Goekte Johannes: *Thermische Eergiespeicher in der Gebäudetechnik. Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration.* Springer Verlag, 2021.

Gross Joachim & Sadowski Gabriele: *Perturbed-Chain SAFT: An Equation of State Based on a Perturbation Theory for Chain Molecules.* Industrial & engineering chemistry resaearch, 1244-1260, 2001.

Kremer Michael: *Untersuchung zur Konditionierung von Synthesegasen über die Bildung von Gashydraten.* Forschungszentrum Jülich: Berichte Nr. Jül-2366, 1990.

Labuhn Dirk & Romberg Oliver: *Keine Panik vor Thermodynamik.* Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlag GmbH, 2006.

Lygnerud Kristina: *Implementierung von Niedertemperatur-Fernwärme.*

<https://www.aee.at/staedte-netze/114-zeitschrift/zeitschriften/nt-02-2022-waermenetze-im-wandel/1396-implementierung-von-niedertemperatur-fernwaerme> abgerufen am 07.01.2024.

Peng Ding Yu & Robinson Donald: *A New Two-Constant Equation of State.* Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, S. 59-64, 02, 1976.

Qian Xuejun, Lee Seong & Yang Yulai: *Heat Transfer Coefficient Estimation and Performance Evaluation of Shell and Tube Heat Exchanger using Flue Gas.* Processes, 2021.

- Schlobach Martin: *Hydraulischen Abgleich selber machen – Fußbodenheizung und Fußbodenerwärmung*. <https://www.haustechnikverstehen.de/fussbodenheizung-oder-fussbodenerwaermung/> abgerufen am 26.02.2025
- Soave Giorgio: *Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state*. Chemical Engineering Science, 1197-1203, 1972.
- Span R. & Wagner, W.: *A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1509-1596, 1996.
- Stephan Peter, Schaber Karlheinz, Stephan Karl & Mayinger Franz: *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. Band 1: Einstoffsysteme*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- Stippe Boris: *Rücklaufwasser - Was macht das Wasser in der Wärmepumpe?* <https://solarwissen.selfmade-energy.com/ruecklaufwasser-was-ist-das/> abgerufen am 17.04.2025.
- Wagner Daniel & de Medeiros Oliviera: *DWSIM - Open Source Chemical Process Simulator. User Guide Version 8.7.0*. DWSIM, 03., 2024.
- Weidlich Ulrich & Gmehling Juergen: *A Modified UNIFAC Model. 1. Prediction of VLE, HE, and gamma Infinite*. Ind. Eng. Chem. Res., 1372-1381, 26, 1987.
- Wikipedia - Die freie Enzyklopedie: *Verfahrenstechnik*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Verfahrenstechnik&oldid=244384198> abgerufen am 25.04.2024.
- Wikipedia - Die freie Enzyklopedie: *Carnot-Wirkungsgrad*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Wirkungsgrad> abgerufen am 01.05.2025.
- Wikipedia – Die freie Enzyklopedie: *CAPE-OPEN Interface Standard*. https://en.wikipedia.org/wiki/CAPE-OPEN_Interface_Standard abgerufen am 14. 01 2024.
- Wittig Heinz: *Thermodynamik*. In A. Böge, *Vieweg Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlag GmbH, 2007.

Abkürzungen

PR	Peng-Robinson
SRK	Soave-Redlich-Kwong
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PVT	Druck-Volumen-Temperatur
usw.	und so weiter

Anhang

Im Anhang sollen ergänzende Informationen und Produkte angeführt werden, die im Sinne der Vollständigkeit des Berichts und der Darstellung der Projektergebnisse erforderlich sind, aber wegen ihres Umfangs nicht innerhalb des Berichts dargestellt werden, zum Beispiel Leitfäden oder Schulungsunterlagen.

Data Management Plan (DMP)

Opt-Out Grund: Unvereinbarkeit mit dem Schutz der Ergebnisse 7

Auf Grund der angestrebten Patentanmeldung ist eine Veröffentlichung der Daten und der im Projekt erstellten Deliverables unvereinbar mit dem Schutz der Ergebnisse.

1: Datenerstellung und Dokumentation

Im Projekt wurden an einer Laboranlage Messdaten am StirliQ+-Prototyp Versuchsaufbau erfasst. Die Messpunkte am StirliQ+-Versuchsaufbau sind schematisch in Abbildung 15 dargestellt.

Tabelle 14: Beschreibung der Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet wurden.

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
CoolP- rop.PropsSI	Python Bibliothek	thermodynamische Zustandsgrößen	CoolP- rop.org	öffentlich	https://github.com/CoolProp/CoolProp
Lastgangskurven Heizungssysteme [kW]	Numerisch	Zeitreihen	4ward Energy Research	nicht öffentlich	-
Durchflussmessung [l/s]	Numerisch	Zeitreihe	Projektinterne Messdaten (Laboranlage)	nicht öffentlich	-
Temperaturmessungen [K]	Numerisch	Zeitreihe	Projektinterne Messdaten (Laboranlage)	nicht öffentlich	-
Temperaturmessungen [K]	Numerisch	Zeitreihe	Projektinterne Messdaten (Laboranlage)	nicht öffentlich	-

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
Druckmessungen [Pa]	Numerisch	Zeitreihe	Projektinterne Messdaten (Laboranlage)	nicht öffentlich	-
Drehzahlmessungen [U/min]	Numerisch	Zeitreihe	Projektinterne Messdaten (Laboranlage)	nicht öffentlich	-

Tabelle 15: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert wurden.

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
FT1	Durchflussmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
TT1	Temperaturmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
FT2	Durchflussmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
TT2	Temperaturmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
PI 1	Manometer manuell (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
PT1	Druckmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
PI 2	Manometer manuell (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
PT 2	Druckmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
NT1	Drehzahlmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
TT3	Temperaturmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
FT3	Durchflussmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
TT4	Temperaturmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
FT4	Durchflussmessung (Laboranlage)	Numerisch	Zeitreihe	Prozess Optimal CAP GmbH	Nicht öffentlich
LF	Lastgangkurven Feuerungsanlagen; Generische, stundenfeine Kesselleistungsdaten	Numerisch	Zeitreihe	4ward Energy Research GmbH	Nicht öffentlich

Die Messdaten wurden mit Hilfe des USB-Messlabor der Firma LabJack erfasst, und wurden in Echtzeit verarbeitet. Die generischen Lastgangkurven liegen im Excel-Format vor.

Tabelle 16: Beispiel für die Beschreibung der Metadaten im Projekt.

Attribut	Beschreibung
ID	Eindeutige Bezeichnung des Datensatzes
Titel	Vollständiger Titel

Attribut	Beschreibung
Beschreibung	Zusammenfassung der Inhalte des Datensatzes
Einheit	Angabe der physikalischen-Einheit, sofern möglich (z.B. kW)
Zeitintervall	Angabe des Zeitintervalls (z.B. Stundenfein)
Zeitraum	Zeitraumangabe (z.B. 1 Jahr)
Eigentümer	Angabe der Institution, welche den Datensatz bereitstellt
Kontakt	Kontakt (Website) der Institution, welche die Daten kompiliert/generiert
Versionsstand	Version der Datei bzw. des Datensatzes

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Um die vom Projektkonsortium angestrebte Patentanmeldung nicht zu gefährden, werden die im Projekt erzeugten und verwendeten Messdaten sowie generischen Daten nicht veröffentlicht.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Im Rahmen des Projekts erfolgt hinsichtlich erzeugter und verwendeter Messdaten und generischen Daten keine langfristige Speicherung.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Auf Grund der angestrebten Patentanmeldung ist eine Geheimhaltung der im Projekt erzeugten Daten notwendig. Eine Veröffentlichung der Daten und der detaillierten Dokumentation der Projekthinhalte in Form der innerhalb im Projekt erstellten Deliverables ist unvereinbar mit dem Schutz der Ergebnisse.

