

## Energieforschungsprogramm

### Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

20/01/2020

## Projekttitle:

CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium in der Energierückgewinnung

Projektnummer: 853568

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2016
Projektende	31/08/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	44 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik
AnsprechpartnerIn	Dr. Andreas WERNER
Postadresse	A-1060 Wien, Getreidemarkt 9
Telefon	+43 58801 302 314
Fax	k. A.
E-mail	andreas.werner@tuwien.ac.at
Website	<a href="https://www.iet.tuwien.ac.at/">https://www.iet.tuwien.ac.at/</a>

# Projekttitlel

CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium in der Energierückgewinnung

**AutorInnen:**

Dr. Andreas WERNER

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Inhaltliche Darstellung: .....	7
3.1	Abwärmennutzungs- und Speicherkonzepte: .....	7
3.2	Prozessintegration und Simulation ausgewählter Varianten (stationär): .....	8
3.3	Planung und Bau der sCO <sub>2</sub> -Versuchsanlage .....	13
3.4	Experimentelle Erarbeitung von Auslegungskonzepten für Wärmetauscher, Rohrleitungen und Armaturen: .....	18
3.5	Dynamische Simulation von Teilsystemen: .....	20
3.6	Betrachtung erweiterter Systeme: .....	25
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	27
5	Ausblick und Empfehlungen .....	27
6	Literaturverzeichnis .....	28
7	Kontaktdaten .....	29

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung:

Ziel des Vorhabens ist es, einen Kreisprozessprüfstand für das Arbeitsmedium sCO<sub>2</sub> zu planen, zu bauen, in Betrieb zu nehmen und Erfahrung über das Betriebsverhalten der Komponenten und des Mediums zu sammeln. In Prüfstand des Projektes sCO<sub>2</sub> Phase 1 sollen dabei alle erforderlichen Komponenten (Wärmetauscher, Regelventile, Instrumentierung), abgesehen von der Turbine, integriert werden. Die Experimente sollen dabei Informationen über das Verhalten des Arbeitsmediums im stationären und transienten Betrieb liefern. International konzentriert sich die Entwicklung von sCO<sub>2</sub>-Kreisläufen auf die Anwendung in der Kerntechnik und der Solarthermischen Kraftwerkstechnik (CSP). Ein weiteres Ziel dieses Projekts ist es, ein industriell belastbares Konzept zur Niedertemperatur-Abwärmenutzung mittels sCO<sub>2</sub>-Kreisläufen zu entwickeln.

Das folgende Schema () gibt einen Überblick über die Ziele des Projekts, ausgedrückt durch den Beitrag der sechs Hauptarbeitspakete. Das Gesamtprojekt (strichlierte Linie) ist dabei in die beiden Forschungsschwerpunkte (dargestellt durch die beiden Ellipsen) aufgeteilt. Während die rot eingefärbten Arbeitspakete theoretische Untersuchungen darstellen, bilden die blauen experimentelle Tätigkeiten ab.

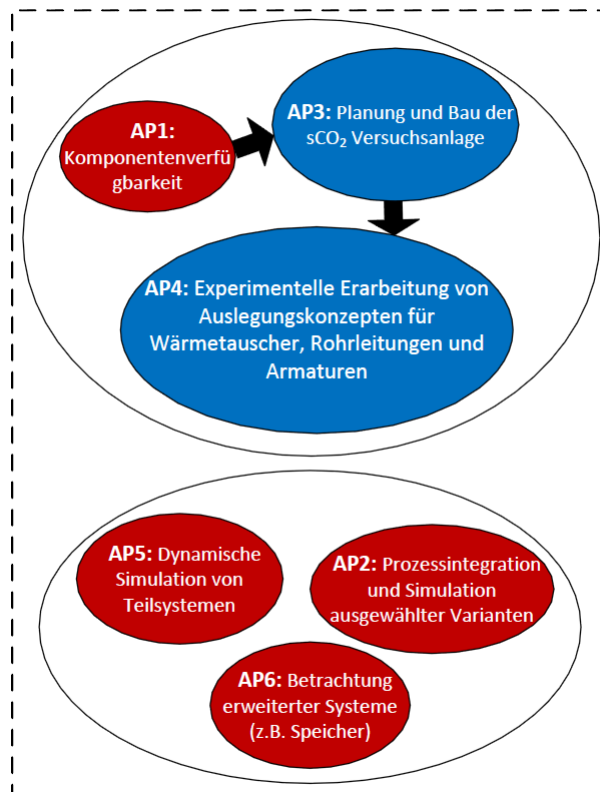


Abb. 1: Schema zum Projektablauf

In der hier eingereichten Projektphase 1 ist ein Prüfstand mit einem Expansionsventil anstelle einer Turbomaschine geplant. Der Einsatz einer Turbomaschine zur Expansion wurde untersucht. Ein derartiger Schritt würde aber einerseits eine wesentlich höhere Anlagengröße erzwingen, und andererseits ist es relativ schwierig, von amerikanischen Firmen, die gerade in dort laufenden Projekten

Prototypen austesten, kommerziell belastbare bzw. attraktive Kostenangebote für ein österreichisches Förderprojekt zu erhalten.

## **Schwerpunkte des Projektes:**

- Erarbeitung von Abwärmenutzungs- und Speicherkonzepten
- Prozessintegration und Simulation von ausgewählten Kreisprozessen
- Planung und Bau der sCO<sub>2</sub>-Versuchsanlage
- Experimentelle Erarbeitung von Auslegungskonzepten für Wärmetauscher, Rohrleitungen und Armaturen
- Dynamische Simulation von Teilkomponenten und des Gesamtsystems
- Betrachtung erweiterter Systeme

## **Einordnung in das Programm:**

Das vorliegende Projekt betrifft das Themenfeld TF 2/2.1 „Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe“ und dort den Hauptaufzählungspunkt „Abwärmenutzung und (integrierte) Abwärmespeicherung“, wo das Thema „Nutzung von superkritischem CO<sub>2</sub>“ explizit angesprochen wird

## **Verwendete Methoden:**

Im vorliegenden Projekt wurden folgende Methoden ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens angewandt:

- Berechnung
- Modellierung und Simulation
- Design von Versuchsanlagen und Experimente
- Messdatenanalyse und Fehlerabschätzung
- Konzeptstudien und Bewertung

## **Aufbau der Arbeit:**

Die Vorgangsweise war so, dass nach der Untersuchung verschiedener Abwärme-Nutzungskonzepte ein Prüfstandskonzept festgelegt und durch Simulationsrechnungen vorausgelegt wurde. Danach folgte die Detailplanung und die Anlagenerrichtung sowie die Inbetriebnahme unter Berücksichtigung aller sicherheitstechnischen Aspekte.

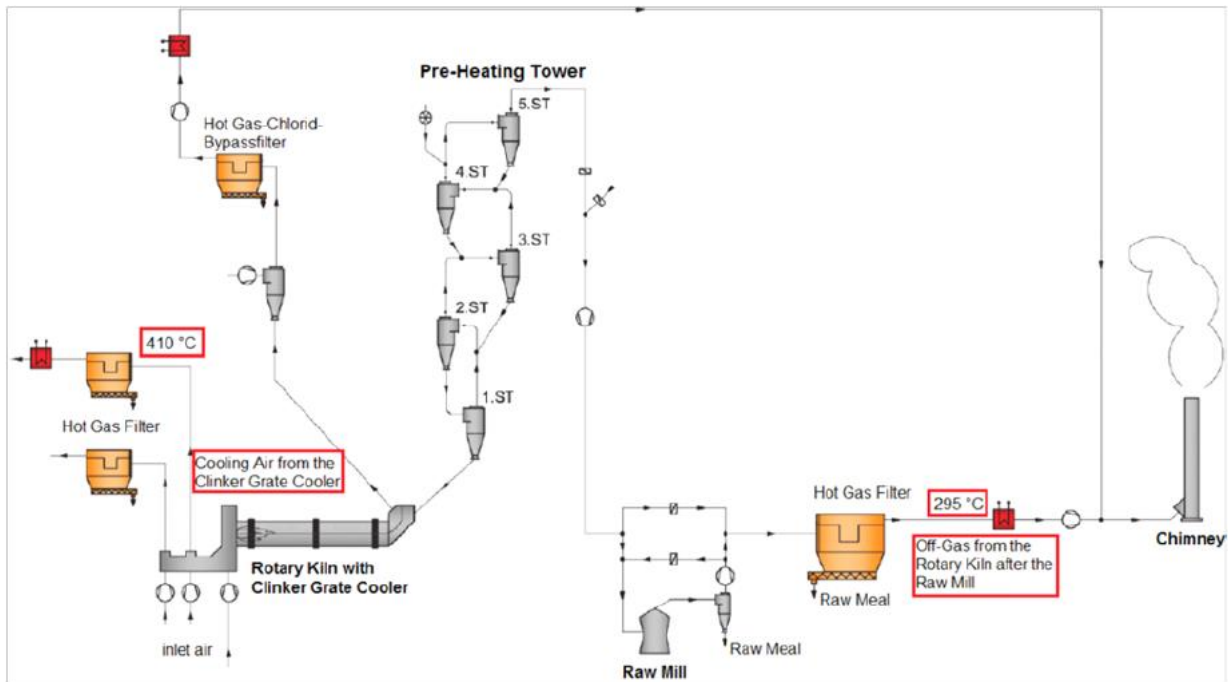
Nach der Phase der Inbetriebnahme und der Lösung der Probleme, die bei einer Erstinbetriebnahme auftreten wurden Experimente zum trans- und superkritischen Betrieb der Versuchsanlage sowie zum Wärmeübergang unternommen.

## 3 Inhaltliche Darstellung:

### 3.1 Abwärmenutzungs- und Speicherkonzepte:

Abwärmenutzungskonzepte auf Basis von  $sCO_2$  wurden mit anderen Verfahren (ORC- und Wasserdampfkraftprozess) verglichen, siehe [1].

Die folgende **Abb. 2** zeigt ein Zementwerk an dem verschiedene Abwärmeströme genutzt werden können:

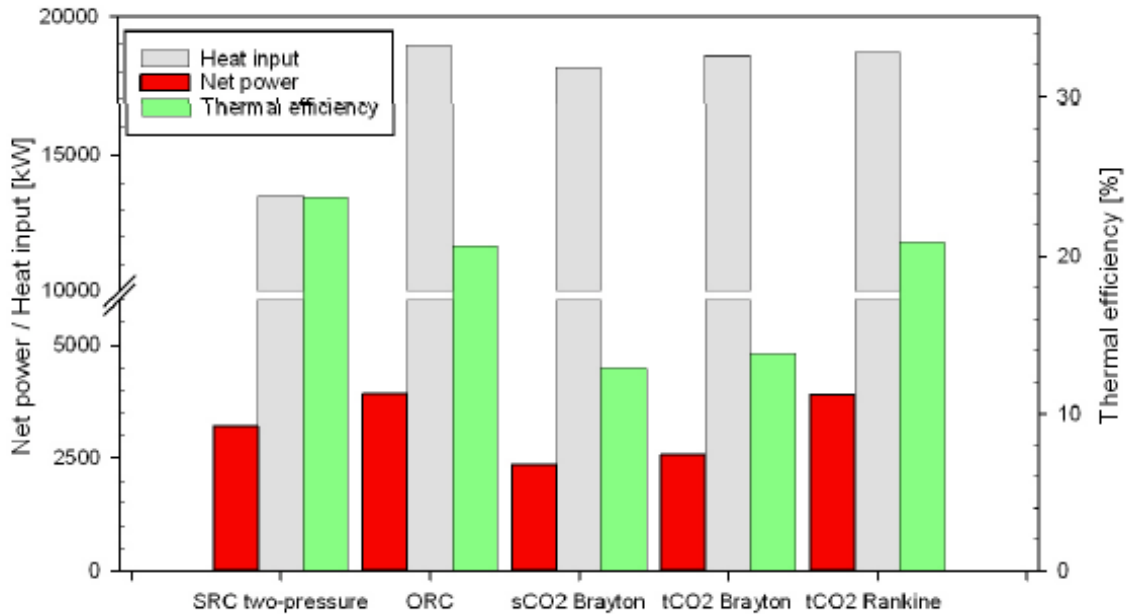


**Abb. 2: Schema eines Zementwerks mit nutzbaren Abwärmequellen (rot umrandet)**

Die wesentlichen, nutzbaren Abwärmequellen sind:

- das Ofenabgas mit relativ niedriger Temperatur,  $\vartheta_{Dr} = 295 \text{ °C}$ , weil es bereits in den Zyklonvorwärmern für das Rohmehl abgekühlt wurde.
- die Kühlluft des Sinterkühlers mit einer Temperatur von  $\vartheta_{Sk} = 410 \text{ °C}$

Auf diese Anlage wurden verschiedene Abwärmenutzungskonzepte wie  $sCO_2$ -, ORC- oder Wasserdampfkraftprozess im Rahmen einer Simulation angewandt. Das Ergebnis dieser Simulation ist in **Abb. 3** dargestellt.



**Abb. 3: Vergleich verschiedener Abwärmenutzungsprozesse**

Der Vergleich in **Abb. 3** zeigt die Vorteile des sCO<sub>2</sub>-Prozesses, wobei die Varianten des geschlossenen Gasturbinenprozesses (Brayton - Cycle superkritisch und transkritisch) dem transkritischen Rankine - Prozess unterlegen sind. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die transkritische Betriebsweise, niedrige Temperaturen der Wärmeabfuhr vom Kreisprozess an die Umgebung mit sich bringt (kleiner  $\vartheta_{krit} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Bedingt durch die Kondensation ist auch die Kühlleistung höher und entsprechende Rückkühlwerke sind erforderlich.

Die erforderlichen Arbeitsschritte im Arbeitspaket 1 wurden planmäßig durchgeführt – es gab keine wesentlichen Abweichungen. Die im Projektantrag vorgeschlagene Methodik wurde eingehalten.

### 3.2 Prozessintegration und Simulation ausgewählter Varianten (stationär):

Für den Vergleich wurden vier Abwärmenutzungskonzepte miteinander verglichen und stationär simuliert. Im Folgenden sind die Kenndaten der Prozesse angegeben:

#### Wasserdampfkraftprozess:

Für den Dampfkraftprozess (2-Drucksystem) wurden die folgenden Betriebsparameter angenommen:

**Tabelle 1: Betriebsparameter des Wasserdampfkraftprozesses**

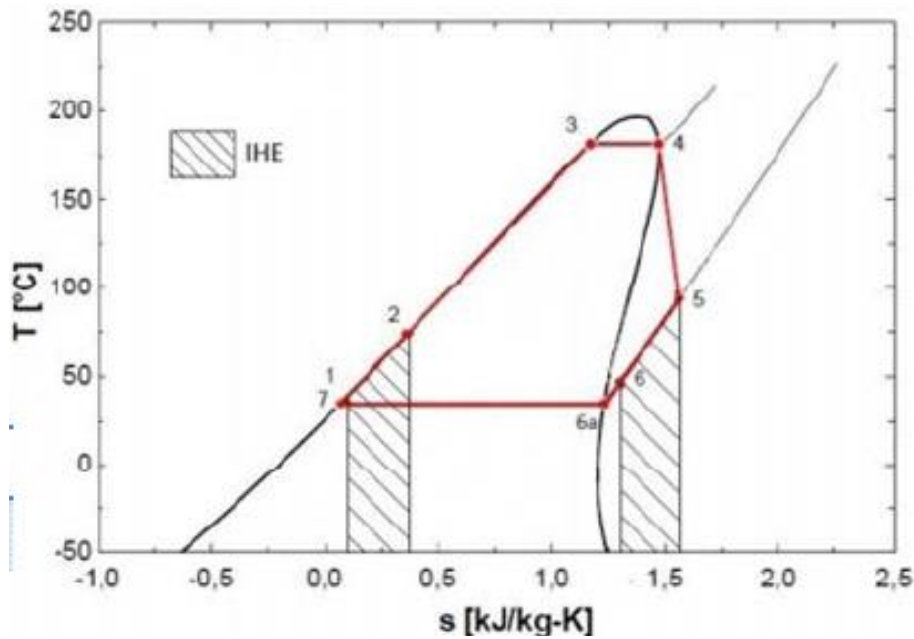
operating parameters	
high pressure level	20 bara
low pressure level	6.5 bara
max. steam temperature	395°C
min. allowed $\Delta T$ in HEX	15°C
turbine isentropic efficiency	75 %



Damit ergibt sich eine Leistung von  $P_{el} = 3,21 \text{ MW}$  bei einem thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 23,74 \%$ .

### ORC-Prozess:

Als Arbeitsmedium für den ORC-Prozess wird Cyclopentan ( $\vartheta_{krit} = 238 \text{ °C}$ ) eingesetzt. Die folgende **Abb. 4** zeigt das T, s-Diagramm des Prozesses. Eine Überhitzung des Arbeitsmediums findet, wie bei ORC-Prozessen häufig, nicht statt. Ein Rekuperator sorgt dafür, dass weniger Abwärme an die Umgebung abgegeben werden muss.



**Abb. 4: T, s - Diagramm für ORC-Prozess**

Die folgende Tabelle gibt die Betriebsparameter des ORC-Prozesses wieder:

**Tabelle 2: Betriebsparameter des ORC-Prozesses**

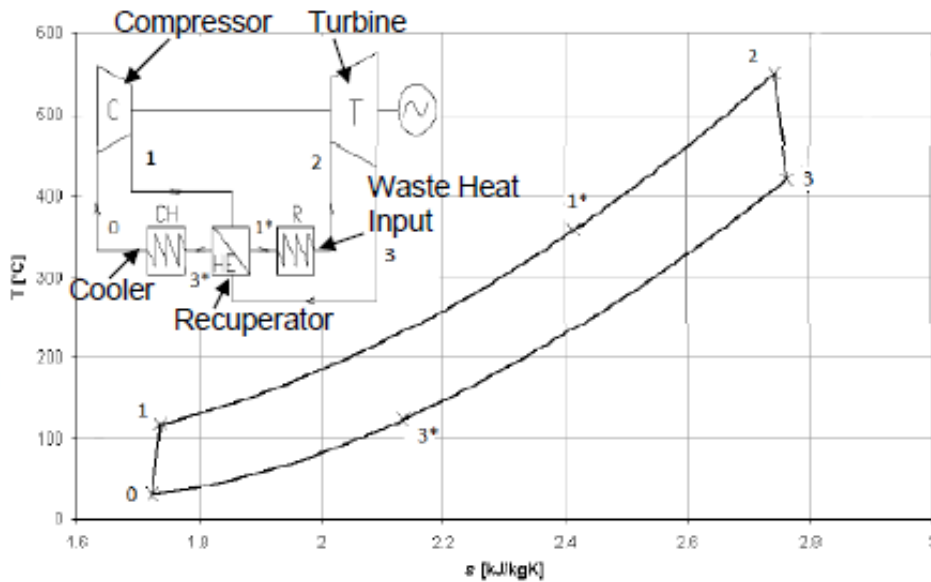
operating parameters	
operating pressure	34.6 bara
condensation pressure	0.7 bara
max. operating temperature	217°C
cooling water temperature	17°C
turbine isentropic efficiency	75 %

Mit diesen Betriebsparametern ergibt sich eine elektrische Leistung von  $P_{el} = 3,92 \text{ MW}$  bei einem thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 20,64 \%$ .

Im Vergleich zum Wasserdampfkraftprozess hat der ORC-Prozess also eine etwas höhere elektrische Leistung bei geringerem, thermischem Wirkungsgrad. Daraus folgt, dass die Wärmeaufnahme des Prozesses etwas höher ist.

## sCO<sub>2</sub>-Prozess (Brayton-Cycle):

In der folgenden **Abb. 5** ist der superkritische CO<sub>2</sub>-Prozess dargestellt. Von 0 nach 1 erfolgt die Verdichtung des Arbeitsmediums. Da der Punkt 0 nahe dem kritischen Punkt liegt ist der Realgasfaktor  $Z = pV/(RT)$  viel kleiner als 1 und die benötigte Leistung für den Antrieb des Verdichters viel niedriger als bei einem Verdichter, der ein (ideales) Gas komprimiert.



**Abb. 5: T, s - Diagramm für sCO<sub>2</sub>-Prozess**

Die folgende **Tabelle 3** fünf zeigt die Betriebsparameter für den superkritischen CO<sub>2</sub>-Prozess:

**Tabelle 3: Betriebsparameter des sCO<sub>2</sub>-Prozesses**

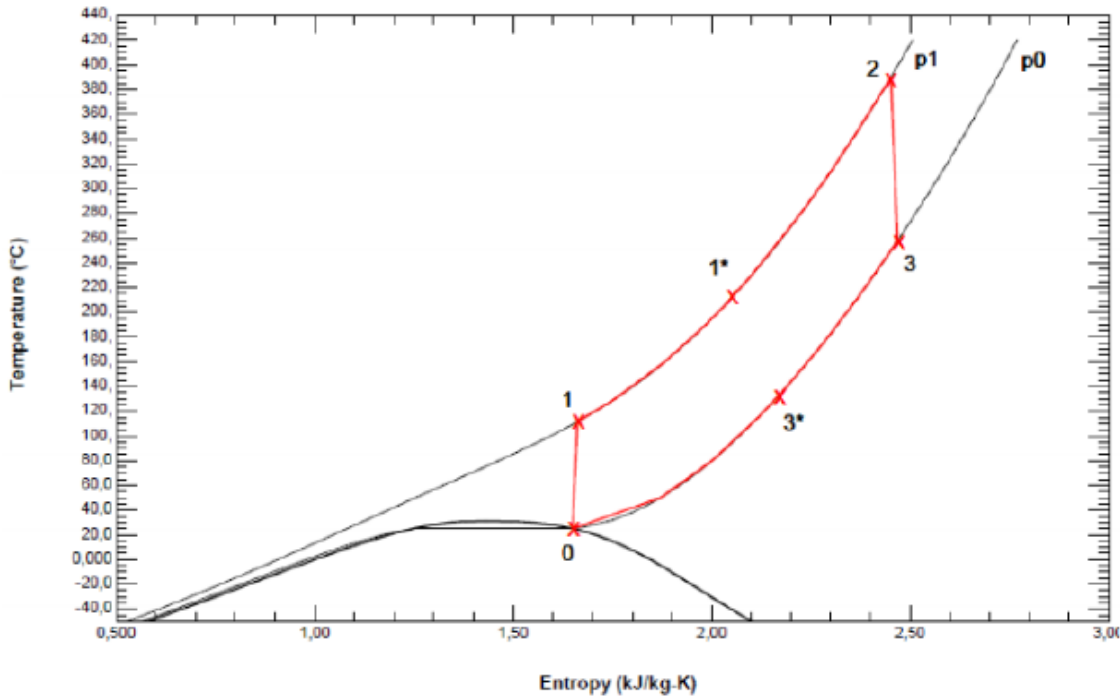
high pressure level	221.4 bara
low pressure level	73.8 bara
lowest cycle temperature	34 °C
turbine inlet temperature	302 °C
cooling Water temperature	12 °C
turbine isentropic efficiency	75 %
compressor isentropic efficiency	86 %

Bei diesen Betriebsparametern ergibt sich eine elektrische Leistung von  $P_{el} = 2,34 \text{ MW}$  bei einem thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 12,9 \%$ .

Ein Vorteil des superkritischen Prozesses ist auch, dass die Wärmeabgabe an die Umgebung wegen der Lage des kritischen Punktes besonders einfach mit ausreichendem Temperaturunterschied erfolgen kann.

## tCO<sub>2</sub>-Brayton-Cycle (tCO<sub>2</sub>-BC):

Die folgende **Abb. 6** stellt den transkritischen Brayton-Cycle im T, s – Diagramm dar. Die Annahme dabei ist, dass auf eine subkritische Isobare entspannt wird – die Leistung wird größer und die Temperatur der Wärmeabgabe sinkt – die Anforderungen an das Rückkühlwerk steigen.



**Abb. 6: T, s - Diagramm für tCO<sub>2</sub>-Brayton-Cycle**

Für diesen Prozess gelten die folgenden Auslegungsdaten:

**Tabelle 4: Betriebsparameter des tCO<sub>2</sub>-Brayton-Prozesses**

high pressure level	221.4 bara
low pressure level	64.34 bara
lowest cycle temperature	25 °C
turbine inlet temperature	302 °C
cooling Water temperature	12 °C
turbine isentropic efficiency	75 %
compressor isentropic efficiency	86 %

Wie zu erwarten steigt die elektrische Leistung weiter auf  $P_{el} = 2,57 \text{ MW}$  bei einem thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 13,8 \%$ . Letzteres bedeutet, dass die Wärmenutzung des Prozesses nun ebenfalls besser ist.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Lage des Verdichtungsbeginns 0 direkt auf der Taulinie eine theoretische Annahme ist und zu den Bestwerten bezüglich Leistung und Wirkungsgrad führt. Einen Verdichter für solch einen Zustand auszulegen wäre unsinnig – ein Mindestabstand zur Taulinie ist einzuhalten.

## tCO<sub>2</sub>-Rankine-Cycle (tCO<sub>2</sub>-RC):

Bei diesem Prozess wird bei subkritischem Zustand bewusst die Kondensation des Arbeitsmediums durchgeführt. Der Vorteil ist, dass eine CO<sub>2</sub>-Pumpe verwendet werden kann, um den Druck zu erhöhen. Diese ist weniger komplex als ein Verdichter der nahe am kritischen Punkt arbeitet. Wegen der erforderlichen Kondensation bei unterkritischen Verhältnissen ist die Wärmeabfuhr an die Umgebung bei kleinem  $\Delta\theta$  aufwändig.

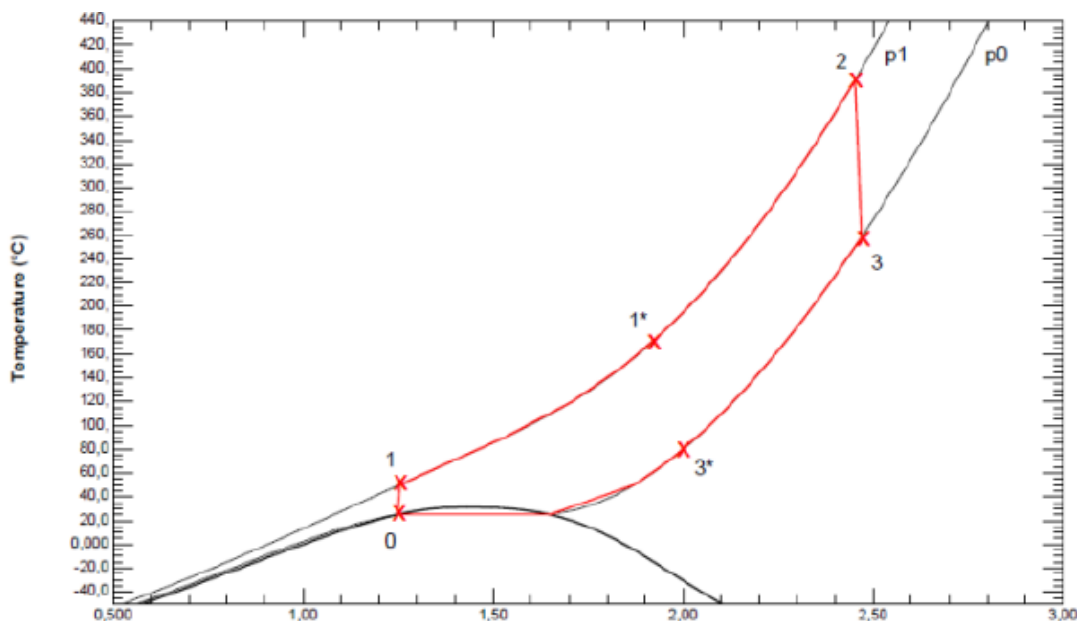


Abb. 7: T, s - Diagramm für tCO<sub>2</sub>-Rankine-Cycle

Die Betriebsparameter des Prozesses sind in **Tabelle 5** angegeben.

Tabelle 5: Betriebsparameter des tCO <sub>2</sub> -Rankine-Prozesses	
high pressure level	221.4 bara
low pressure level	64.34 bara
lowest cycle temperature	25 °C
turbine inlet temperature	302 °C
cooling water temperature	12 °C
turbine isentropic efficiency	75 %
compressor isentropic efficiency	86 %

Die elektrische Leistung liegt nun bei  $P_{el} = 3,92 \text{ MW}$  und der thermische Wirkungsgrad beträgt  $\eta_{th} = 20,92 \%$ .

### 3.3 Planung und Bau der sCO<sub>2</sub>-Versuchsanlage

Die folgende **Abb. 8** zeigt die Versuchsanlage im Labor der TU Wien, IET:



**Abb. 8: Foto der Versuchsanlage im Labor des IET**

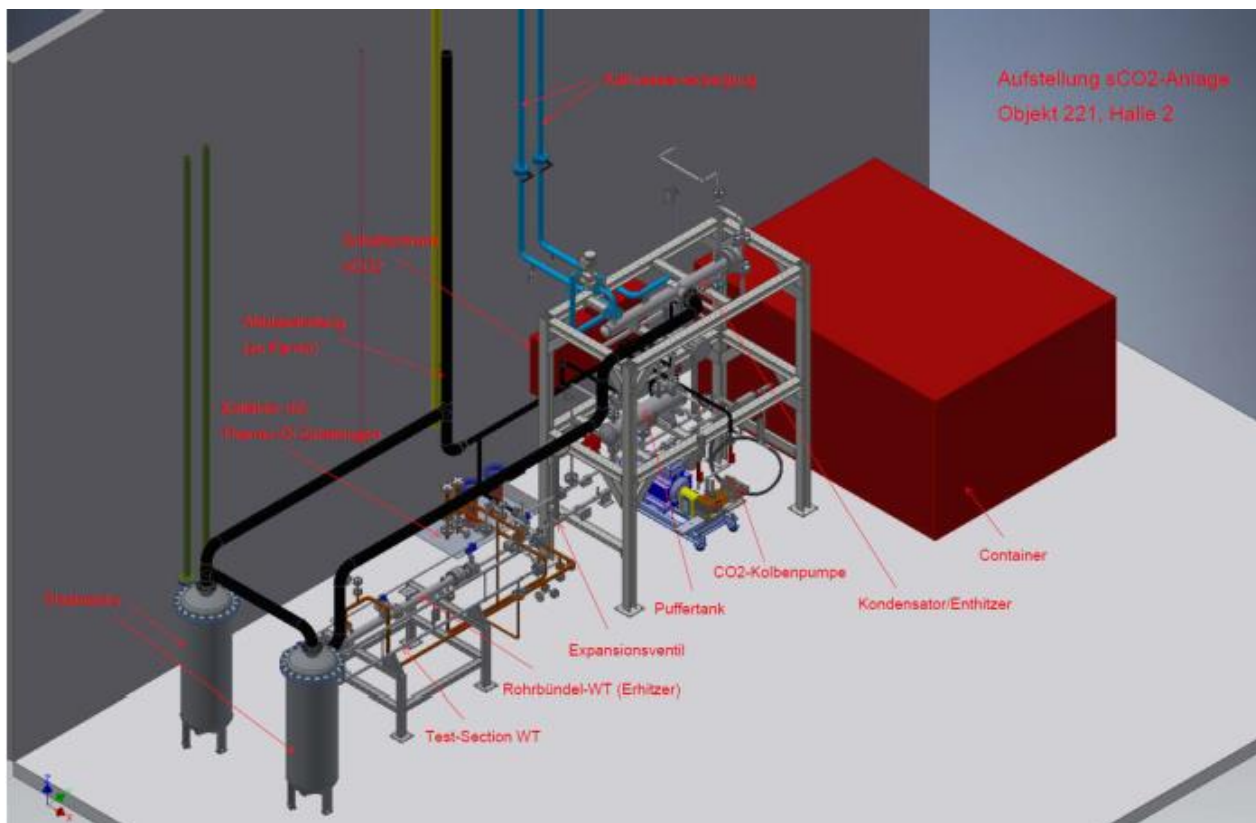
Im grauen Gerüst sind die Hauptkomponenten:

- Drosselventil (anstatt der Turbine)
- Kondensator/Enthitzer
- Puffertank

angeordnet, darunter stehend die CO<sub>2</sub>-Kolbenpumpe. Das Expansionsventil, welches derzeit die Turbine ersetzt, weil diese im gegenwärtigen Projekt sCO<sub>2</sub>-Phase 1 nicht vorgesehen ist, befindet sich rechts neben dem Hauptgerüst. Weiters anschließend befindet sich die Test-Section – das ist ein U-Rohr Wärmetauscher zur Durchführung von Wärmeübertragungsexperimenten und zur Bestimmung von Stoffgrößen nahe dem kritischen Punkt. Hinter der Test-Section (wandseitig) ist der Rohrbündelwärmetauscher (Thermoöl / sCO<sub>2</sub>) angeordnet über den die Energiezufuhr über das erhitzte Thermoöl erfolgt. Zwei Flashtanks dienen der Sicherheit, sodass im Falle eines Rohrversagens das austretende CO<sub>2</sub> nicht in den Thermoölkreislauf gelangt, sondern in diese gefördert und von dort aus über Dach geführt wird. Die Thermoölleitungen führen von einem Kollektor aus zum Rohrbündelwärmetauscher. Die Kondensation des CO<sub>2</sub> erfolgt im Kondensator / Enthitzer mittels des vorhandenen Kaltwasserkreislaufs. Alle zuvor beschriebenen Komponenten der Versuchsanlage sind in der folgenden **Abb. 9** dargestellt.

## Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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



**Abb. 9: 3D-Ansicht der sCO<sub>2</sub> Versuchsanlage**

Gesteuert und geregelt wird die gesamte sCO<sub>2</sub>-Anlage (sowie die Thermo-Öl Anlage, welche für die Erwärmung des Thermoöls zuständig ist) über das PLS APROL (B&R Industrial Automation GmbH). Dieses wurde vom Institut für Energietechnik und Thermodynamik (TU Wien) konfiguriert und programmiert.

Ein Überblick der Bedienoberfläche der sCO<sub>2</sub>-Anlage für den Operator ist in **Abb. 10** zu sehen. Die dazugehörige Hardware von B&R Industrial Automation GmbH (X20-Steuerung und IO Komponenten, Frequenz-Umrichter) sowie andere elektrotechnische Infrastruktur (Schaltkasten, Verkabelungen, etc.) wurde von der Fa. Gröbl Automatisierungstechnik GmbH installiert. Alle wichtigen Dokumente (Verkabelungsplan, Stromlaufpläne, usw.) dazu, sind in der Anlagendokumentation abgelegt.

Für das An- und Abfahren der Anlage wurden für den transkritischen Fall, sowie für den superkritischen Fall Anleitungen erstellt, die in der Inbetriebnahmeanleitung schrittweise beschrieben sind.

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

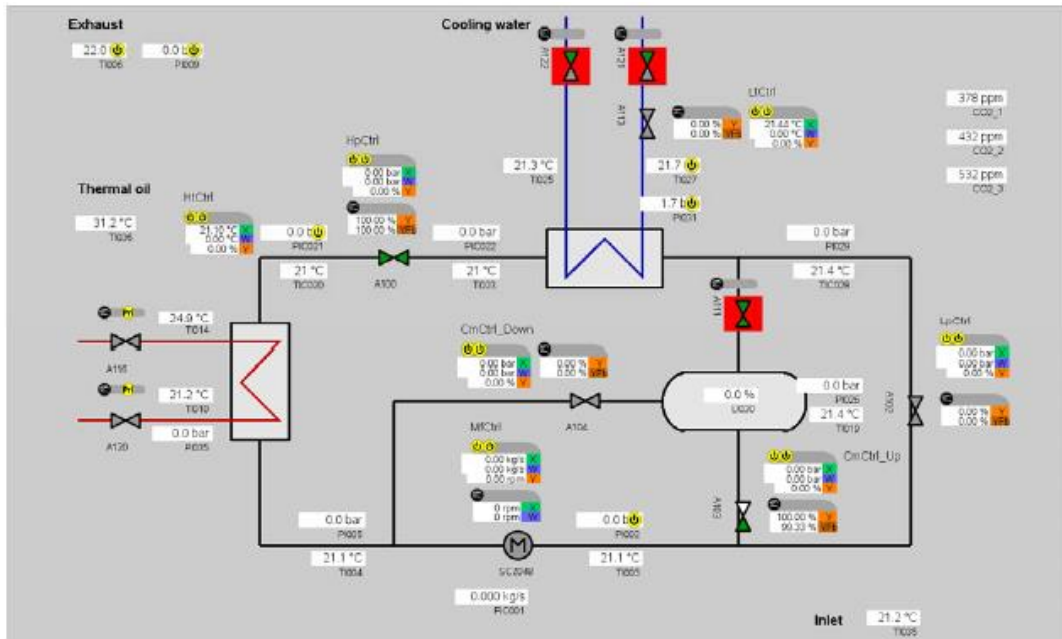


Abb. 10: Bedienoberfläche der sCO<sub>2</sub> Versuchsanlage

Ein weiterer wichtiger Punkt im Zuge der Anlagenerrichtung ist die Erfüllung der sicherheitstechnischen Voraussetzungen und Funktionsprüfungen – die wichtigsten Punkte sind folgend angeführt:

- **EU-Konformitätsbewertungsverfahren inkl. Abnahme der Baugruppe (=Ausstellung einer Konformitätsbescheinigung)** gem. Druckgeräterichtlinie (bzw. Duale Druckgeräteverordnung) durch benannte Stelle (hier: TÜV Austria), dies umfasst unter anderem eine Überprüfung der Dichtheit der gesamten Baugruppe, sowie die Funktion der SIL-Abschaltungen (=Sicherheitsabschaltungen).
- **PLT-Schutzeinrichtungen gem. VDI/VDE 2180** (Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik PLT)
- **Stahlbautragwerke** (inkl. statische Berechnungen) gem. DIN EN 1090 durch einen Sachverständigen (hier: GCE Consultants).

Des Weiteren sind folgende Punkte für den sicheren Anlagenbetrieb zu beachten:

- **sCO<sub>2</sub>-Kolbenpumpe:** Voraussetzung ist die fertige Montage der Pumpe laut Herstellerangaben und Anliegen des benötigten Mediums (CO<sub>2</sub>); Drehrichtungsprüfung des Antriebsmotors (!), Anlaufverhalten beim Hochfahren ist zu beobachten, insbesondere ist auf Geräusche /Schwingungen zu achten, die Parametrisierung des FU zu prüfen, und die Implementierung in PLS (APROL) zu prüfen.
- **Elektrotechnik:** Stromversorgung (Antriebe, PLS-Hardware), Signalübertragung („Loopchecks“) von und zu den div. Verbrauchern (inkl. aller Mess-Stellen!), Verkabelung, Begleitheizung (Thermo-Öl Zuleitungen).
- **PLS (Prozessleitsystem) und MSR (Mess-Steuer-Regeltechnik):** Kontrolle von div. Anzeige und Bedienkomponenten (APROL-PC inkl. Monitore, Prozessbilder, Prozessinformationen, usw.), Kontrolle der Feldgeräte (Sensoren, Aktoren), „Loop-check“ aller Messstellen (siehe auch Elektrotechnik, Sinnhaftigkeit des angezeigten Messwertes überprüfen. Ein Loop-Check mit Protokoll ist durchzuführen, periodisch ist eine Kalibrierung der Messgeräte und Prüfung der Alarmierungen durchzuführen.

## Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

Weiters sind alle Endlagenschalter zu kontrollieren, sowie Funktionsprüfungen der Regelungen und (soweit möglich) der PLS-Schutzfunktionen durchzuführen.

- **CO<sub>2</sub>- Detektoren** an der Anlage im Rahmen des „Loop-Check“ überprüfen.

In **Abb. 11** ist das R&I-Schema der Versuchsanlage abgebildet. Dieses beinhaltet sowohl den aktuellen Stand der Phase 1 (test block + low temperature block) sowie die durchgeführten Planungsarbeiten für die Phase 2 (high temperature block).



# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

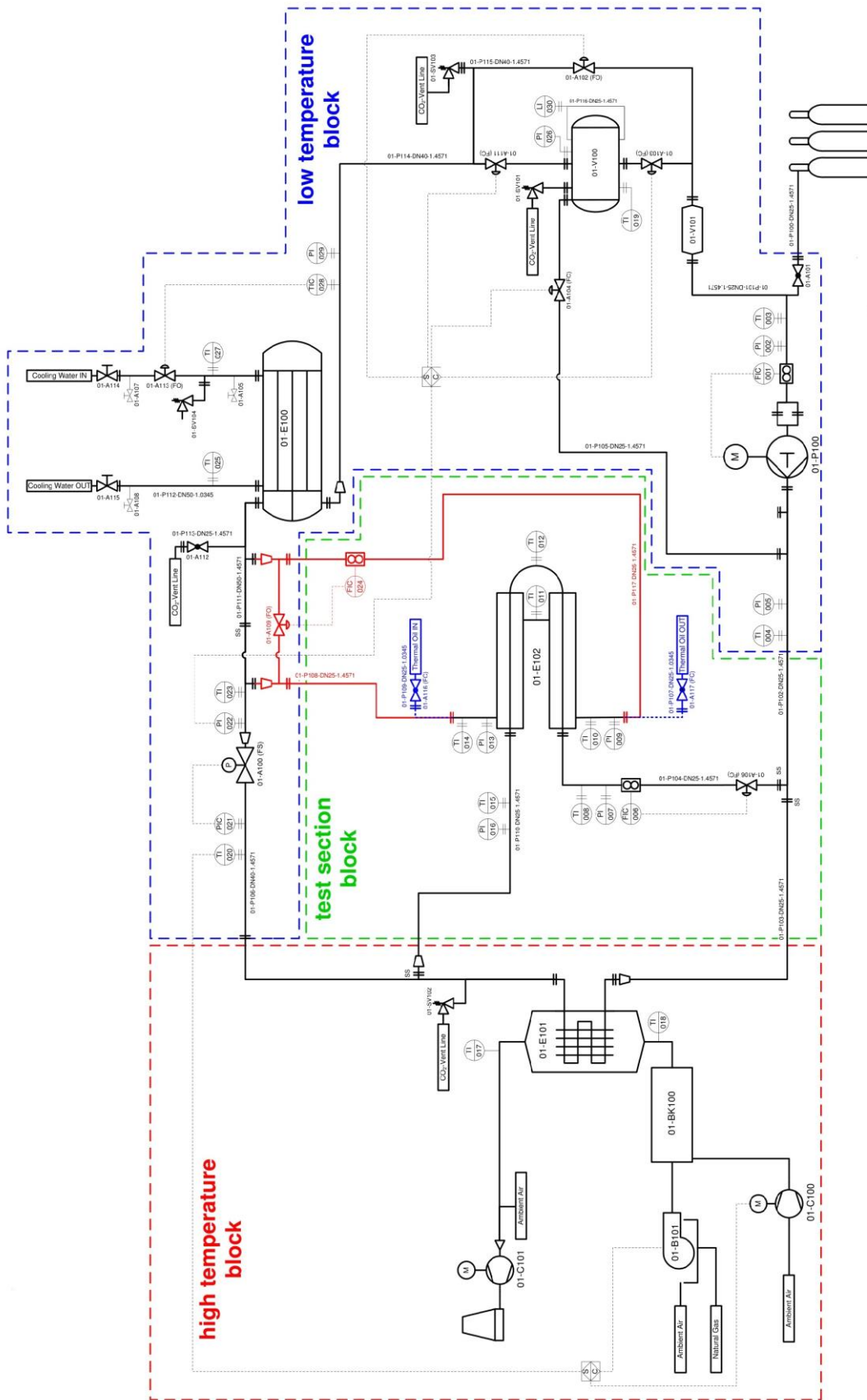
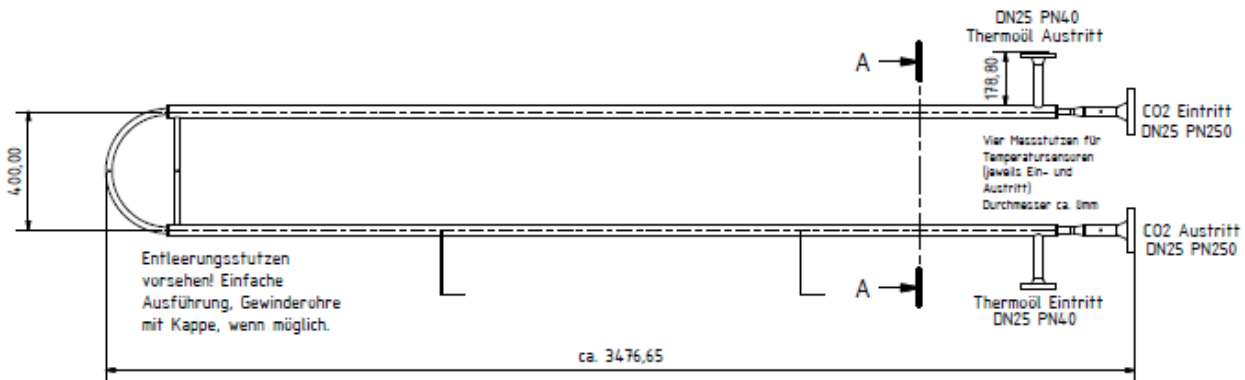


Abb. 11: R&I-Schema der Versuchsanlage für Phase 1 und Phase 2

## 3.4 Experimentelle Erarbeitung von Auslegungskonzepten für Wärmetauscher, Rohrleitungen und Armaturen:

Dieses Arbeitspaket konnte aufgrund der Verzögerung beim Aufbau der Versuchsanlage (erhöhter Planungsbedarf, Zeitverzug durch Übersiedlung des Labors, Planung einer Konferenz) erst später durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde um eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate (2-malige Verlängerung um jeweils 3 Monate) angesucht, diese Verlängerung(en) wurden genehmigt. Der Fokus der Analysen liegt in Messungen zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten in einem Doppelrohrwärmetauscher bei der Wärmeübertragung von Thermoöl auf CO<sub>2</sub>, vgl. **Abb. 12**. Man erkennt, dass das CO<sub>2</sub> im inneren Kernrohr strömt und vom Thermoöl durch Wärmeübertragung am Innenrohr erwärmt wird.



**Abb. 12: Testsektion zur Durchführung von Wärmeübergangsmessungen**

Die folgende Tabelle gibt die Versuchsrandbedingungen an:

	Messbereich	Schrittweite	Anzahl Messpunkte
<b>Thermo-Öl-Temperatur</b>	60 °C – 160 °C	10 K	11
<b>CO<sub>2</sub>-Massenstrom</b>	0,15 kg/s – 0,35 kg/s	0,05 kg/s	5
<b>CO<sub>2</sub>-Druck</b>	80 bar – 220 bar	10 bar	15

**Tabelle 6: Parameterbereich der Wärmeübergangsversuche an der Test-Section**

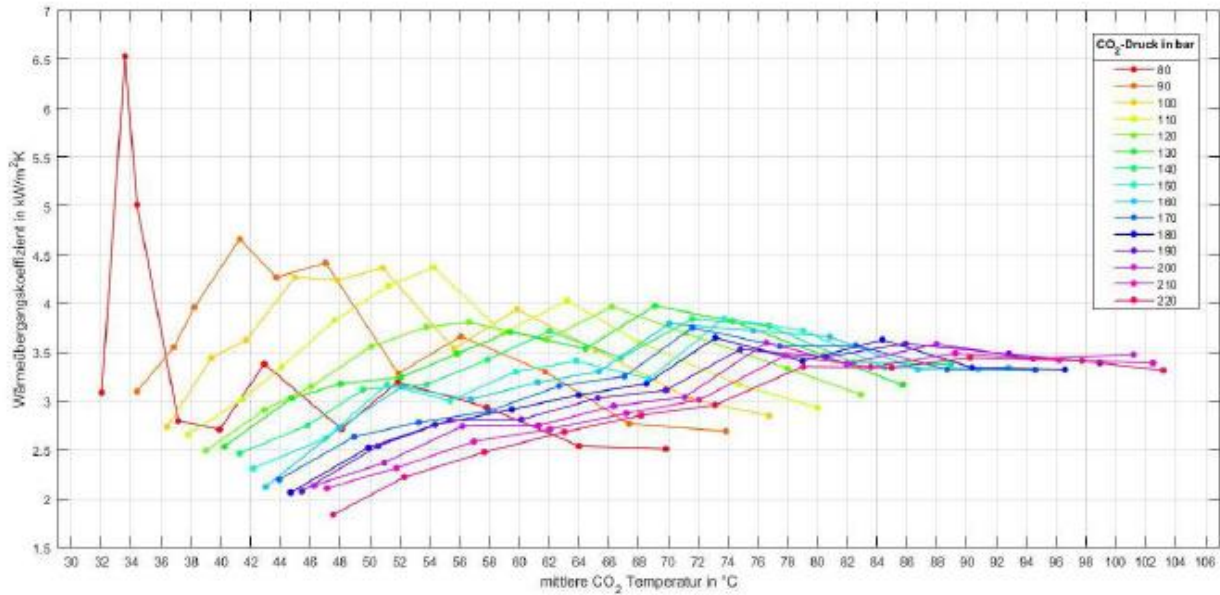
### Versuchsablauf:

Um den Versuchsablauf zu vereinfachen und gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten, wurde dafür ein Ablauf programmiert, welcher die Parameter für die einzelnen Messpunkte selbständig nach vorgegebenen Zeitintervallen verändert. Dieser Ablauf besteht aus 3 ineinander liegenden „Steuerungsloops“. Die äußerste, und „langsamste“ Loop stellt die Vorlauftemperatur des Thermo-Öls, die zweite Loop den CO<sub>2</sub>-Massenstrom und die dritte, schnellste Loop den CO<sub>2</sub>-Druck ein. Damit sich ein stationärer Betriebspunkt einstellen kann, wird nach jeder Thermo-Öl-Temperaturänderung 20 Minuten, nach jeder CO<sub>2</sub>-Massenstrom-Änderung 10 Minuten und nach jeder CO<sub>2</sub>-Druck-Änderung 3 Minuten gewartet. In den letzten 30 Sekunden eines jeden Messintervalls werden die Daten aufgezeichnet und anschließend gemittelt.

Die folgende **Abb. 13** stammt aus [4] und zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des CO<sub>2</sub>-seitigen Wärmeübergangskoeffizienten bei relativ niedriger Massenstromdichte von 997 kg/(m<sup>2</sup>s). Man erkennt die deutliche Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten in der Nähe der pseudokritischen Temperatur.

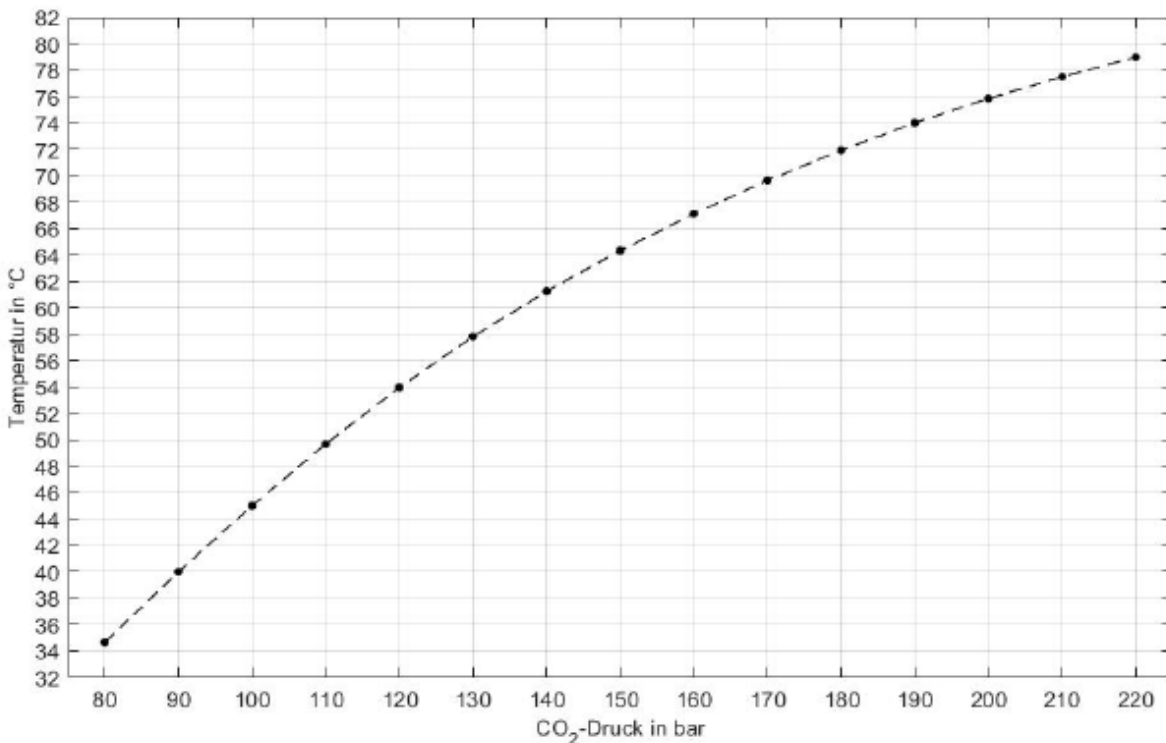
# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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



**Abb. 13: CO<sub>2</sub>-seitiger Wärmeübergangskoeffizient bei niedriger CO<sub>2</sub>-Massenstromdichte (997 kg/m<sup>2</sup>s), vgl. [4]**

Die pseudokritische Temperatur für CO<sub>2</sub> ist in der folgenden **Abb. 14** dargestellt. Man erkennt, dass für einen Druck von 80 bar diese bei etwa 34°C liegt. Aus **Abb. 13** folgt, dass bei einem Druck von 80 bar bei 34 °C ein ausgeprägtes Maximum des Wärmübergangskoeffizienten liegt.



**Abb. 14: pseudokritische Temperatur von sCO<sub>2</sub>, Daten aus [5]**

### Zusammenfassung der Ergebnisse der Wärmeübergangsmessungen:

- Verbesserter Wärmeübergang tritt nur in der Nähe der pseudokritischen Temperatur auf.
- Die Verbesserung des Wärmeübergangs ist umso ausgeprägter, je höher die CO<sub>2</sub>-Massenstromdichte ist.
- Das Ausmaß der Verbesserung des Wärmeübergangs in der Nähe der pseudokritischen Temperatur sinkt mit steigendem Druck.
- Bei hohen Drücken ( $p/p_c > 2$ ) ist die Verbesserung des Wärmeübergangs in der Nähe der pseudokritischen Temperatur insignifikant.
- Die Druckabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten ist bei Temperaturen, welche niedriger sind, als die pseudokritische Temperatur größer als bei höheren Temperaturen (oberhalb des pseudokritischen Bereichs).
- Die Versuche wurden in einem horizontalen glatten Rohr durchgeführt. Die Ergebnisse können aufgrund der hohen Dichteänderungen nicht auf ein vertikales Rohr angewandt werden.
- Da laut Maass, [7], die Zustandsgrößen in der Nähe des kritischen Punktes prozessabhängig sein können, ist die Anwendung dieser Messergebnisse auf einen Kühlprozess mit Vorsicht zu genießen.

Die Erkenntnisse, betreffend die Experimente zum Wärmeübergang, sind in [4] umfassend beschrieben. Nach anfänglichen Schwierigkeiten betreffend Temperatur- und Massenstrommessung konnten die Versuche zufriedenstellend durchgeführt werden. Durch das Prozessleitsystem (PLS) konnten die Versuche selbst weitgehend automatisiert durchgeführt werden, das heißt das Anfahren der z. B. verschiedenen Druckniveaus bei den in **Abb. 13** dargestellten Versuchen erfolgte (nach entsprechender Programmierung) durch das PLS selbständig. Dadurch konnte der Versuchsbetrieb, nach anfänglich größerem Zeitaufwand, wesentlich vereinfacht und weniger fehleranfällig gestaltet werden.

### 3.5 Dynamische Simulation von Teilsystemen:

Dynamische Simulation von Teilsystemen:

Für den Test des Prozessleitsystems und zur Beurteilung des dynamischen Gesamtverhaltens der Anlage in den unterschiedlichen Betriebsmodii (trans- und überkritisch) wurde mit Hilfe des Prozesssimulators APROS ein dynamisches Modell der Gesamtanlage erstellt, vgl. **Abb. 15**.

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

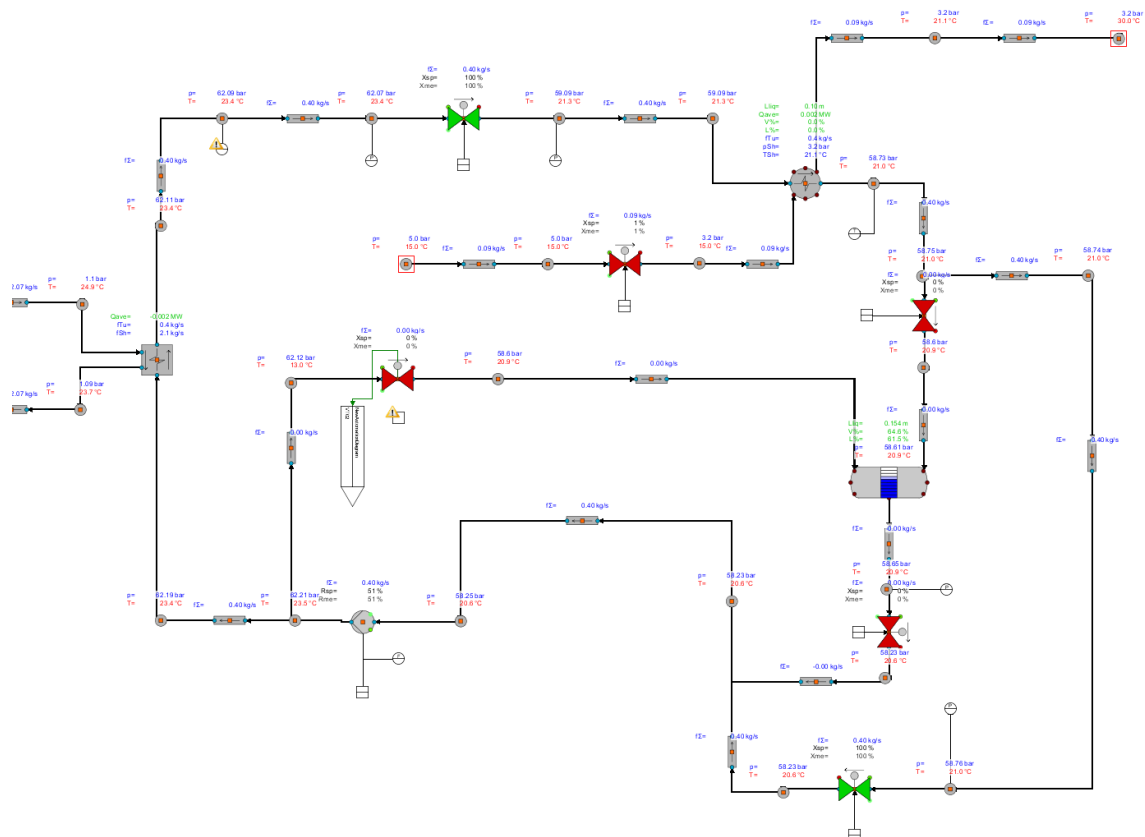
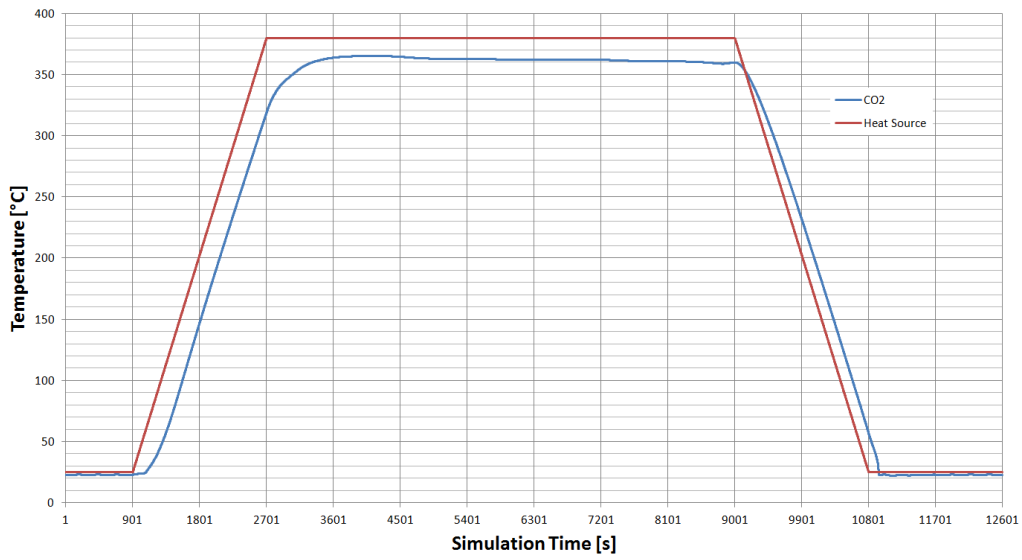


Abb. 15: Dynamisches Modell der sCO<sub>2</sub>-Anlage

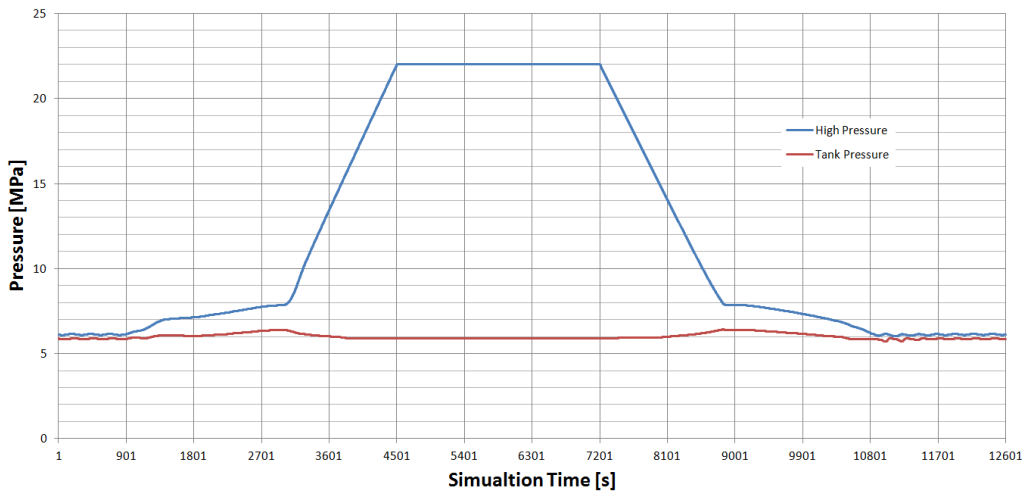
## Simulation der transkritischen Betriebsweise:

In **Abb. 16**, **Abb. 17** und **Abb. 18** sind Resultate der Simulation dargestellt. Die Simulation startet nach dem Befüllen der Versuchsanlage bei einem Druckniveau von 6 MPa und 21 °C. Aus diesem Zustand wird die CO<sub>2</sub>-Pumpe eingeschaltet. Der Massenstrom wird bei einem Wert von 0,4 kg/s konstant gehalten. Im Fall der transkritischen Betriebsweise wird die Temperatur vor Pumpe auf diesem Temperaturwert konstant gehalten. Nach 900 sec wird die Wärmezufuhr eingeschaltet und das CO<sub>2</sub> erwärmt sich auf eine Temperatur von etwa 360 °C nach etwa 3600 sec. vgl. **Abb. 16**. Während des Aufwärmvorganges steigt der Druck im System langsam an und der CO<sub>2</sub>-Tank füllt sich vollständig, vgl. **Abb. 17** und **Abb. 18**. Nach dem Aufwärmvorgang wird die Hochdruckregelung bei etwa 2700 sec. aktiviert. Das Expansionsventil wird langsam geschlossen und der Druck steigt auf 220 MPa nach 4500 sec., was dem gewünschten Betriebsdruck entspricht. Während des Druckanstiegs wird der CO<sub>2</sub>-Flüssigkeitsstand im Tank etwas geringer, weil sich mehr CO<sub>2</sub> im Hochdruckteil der Anlage befindet. In der transkritischen Fahrweise wird der Druck im Niederdruckteil durch die Temperatur im Kondensator bestimmt. Bei den gewünschten 21 °C stellt sich ein Druck von 5.9 MPa ein im Zeitraum zwischen 4500 und 7200 sec. ein, vgl. **Abb. 18**.

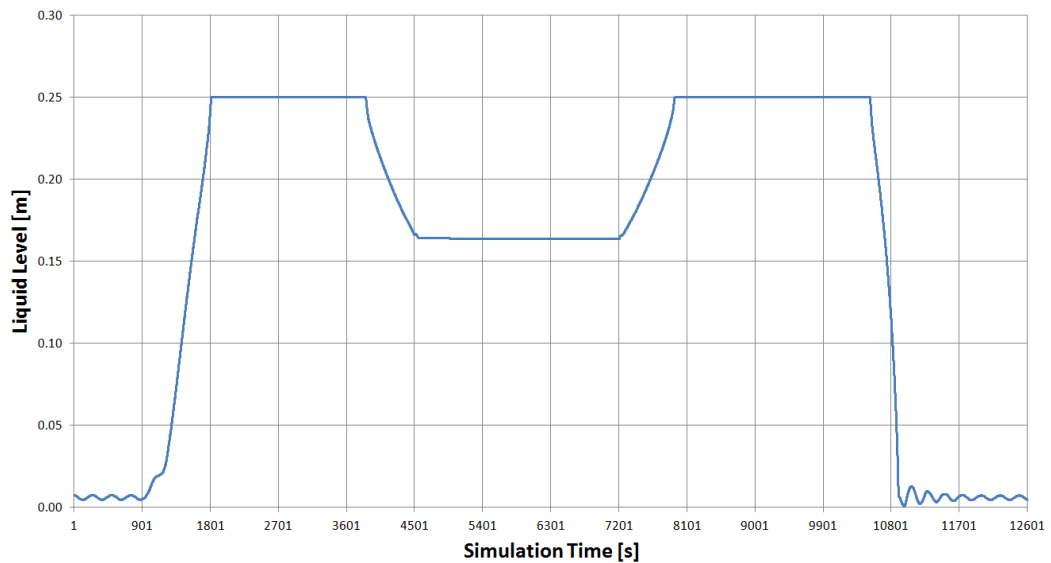
Um das System in den Anfangszustand zurückzuführen, wird nach 7200 sec. das Expansionsventil langsam vollständig geöffnet (im Zeitraum zwischen 4500 bis 7200 sec. und die Wärmezufuhr wird abgeschaltet (9000 – 10800 sec).



**Abb. 16: Temperaturverlauf von sCO<sub>2</sub> und Wärmeträgermedium im transkritischen Betriebsmodus**



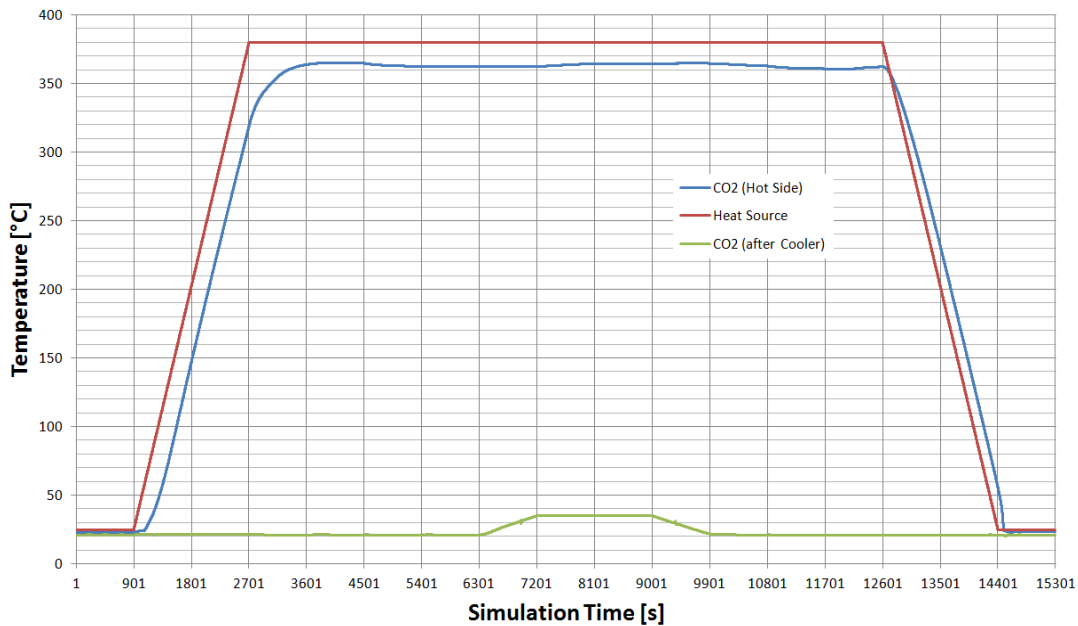
**Abb. 17: CO<sub>2</sub>-Druck auf der Hochdruckseite und im CO<sub>2</sub>-Tank**



**Abb. 18: CO<sub>2</sub>-Druck auf der Hochdruckseite und im CO<sub>2</sub>-Tank**

## Simulation der superkritischen Betriebsweise:

In den **Abb. 19**, **Abb. 20** und **Abb. 21** sind die Resultate der Simulation des superkritischen Kreislaufs dargestellt. Die Simulation beginnt nach dem Füllen der Versuchsanlage (ca. 60 bar und 21 °C) mit dem Einschalten der Pumpe. Der CO<sub>2</sub>-Massenstrom wird für die gesamte Simulationszeit mit 0,4 kg/s konstant gehalten. Im Falle des überkritischen Prozesses ist der Anfahrvorgang, um in den überkritischen Zustand (auch auf der Niederdruckseite) zu kommen etwas komplexer, im Vergleich zur Anfahrprozedur des transkritischen Prozesses. Im ersten Schritt erfolgt die Wärmezufuhr an das sCO<sub>2</sub> ab 900 sec und nach etwa 3600 sec erreicht das sCO<sub>2</sub> eine Temperatur von etwa 360 °C, vgl. **Abb. 19**. Mit der Wärmezufuhr steigt auch der Druck auf der Hochdruckseite und der Füllstand im CO<sub>2</sub>-Vorratsbehälter erreicht seinen Maximalwert, vgl. **Abb. 20** und **Abb. 21**. Nach der Aufwärmphase wird ab ca. 2700 sec die Hochdruck-Regelung aktiviert – das heißt, dass das Drosselventil, welches in der gegenwärtigen Projektphase 1 die Turbine ersetzt, langsam geschlossen wird. Als Folge davon steigt der Druck auf der Hochdruckseite auf den gewünschten Wert von etwa 220 bar nach etwa 4500 sec. an. Nun wird das By-Pass-Ventil geöffnet und der CO<sub>2</sub>-Vorratsbehälter durch das Schließen der entsprechenden Ventile vom Kreislauf getrennt – der gesamte zirkulierende CO<sub>2</sub>-Massenstrom wird nun über das By-Pass-Ventil geleitet. Die Kühlmitteltemperatur wird auf 35 °C erhöht, wodurch das CO<sub>2</sub> in den überkritischen Zustand ( $\vartheta_{\text{CO}_2, \text{krit}} = 30,98 \text{ °C}$ ) kommt, vgl. **Abb. 19** (grüne Linie). Mit der Temperatur steigt auch der Druck im Niederdruckteil der Versuchsanlage – das Druckniveau im Niederdruckteil hängt nun von der CO<sub>2</sub>-Gesamtmasse, exklusive der im „abgetrennten“ Vorratstank vorhandenen Masse, ab. Im vorliegenden Fall liegt der Druck im Niederdruckteil bei etwa 84 bar; erwartungsgemäß also über dem kritischen Druck, welcher 73,8 bar beträgt. Das System befindet sich nun vollständig im superkritischen Zustand (Zeitspanne zwischen 7200 und 9000 sec in der Simulation).



**Abb. 19: CO<sub>2</sub>-Temperaturverlauf nach dem Erhitzer (blau) und Kühler (grün)**

Um die Anlage wieder in den Ausgangszustand zurückzufahren, wird zuerst die Kühlmediumtemperatur auf 21 °C abgesenkt (9000–9900 sec) – wodurch das System in den transkritischen Zustand zurückkehrt. Danach wird der Druck im Hochdruckteil durch Öffnen des Drosselventils (nach ca. 10800 sec) abgesenkt und ab 12600 sec wird auch die Heizung ausgeschaltet. Nach etwa 14400 sec erreicht das System wieder den Ausgangszustand.

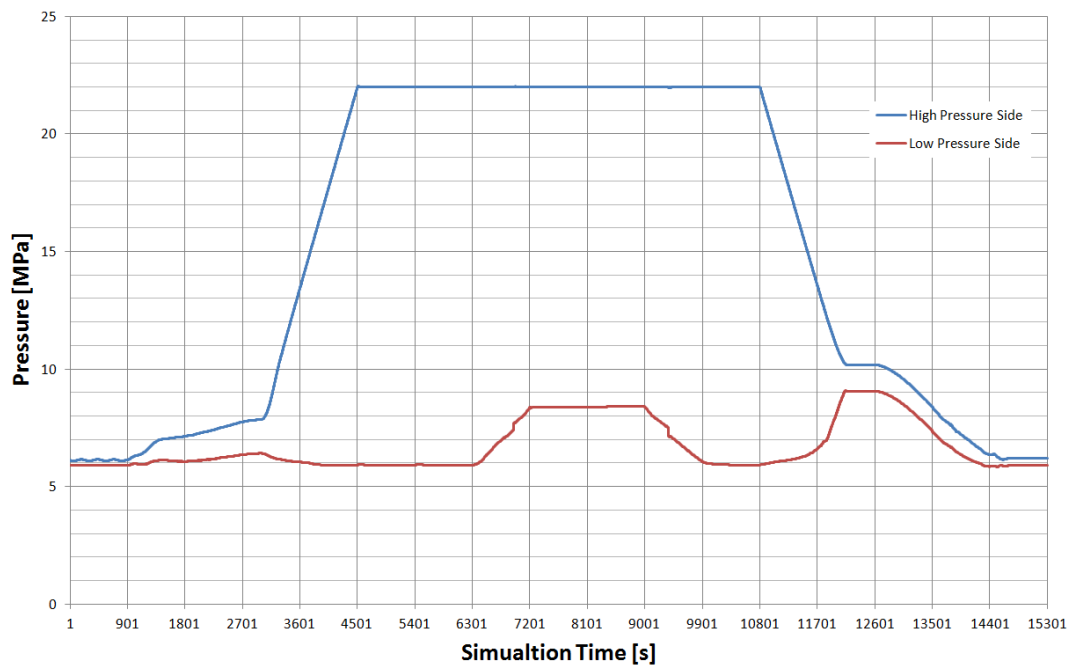


Abb. 20: CO<sub>2</sub>-Druckverlauf auf der Hochdruck- (blau) und Niederdruckseite (rot)

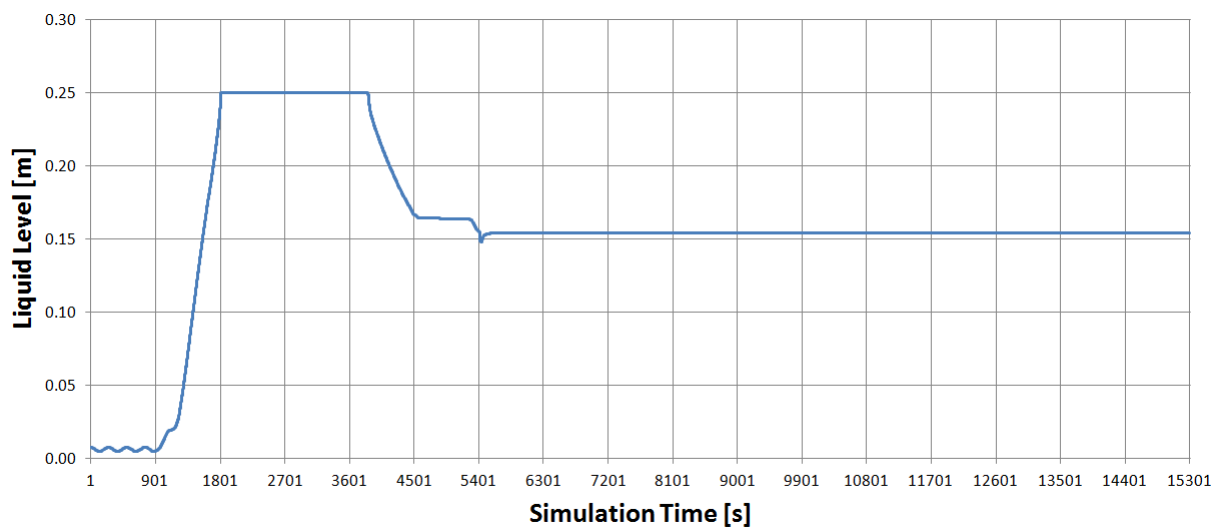


Abb. 21: CO<sub>2</sub>-Flüssigkeitsstand im Vorratsbehälter



## 3.6 Betrachtung erweiterter Systeme:

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Betrachtung von Anwendungsfällen, wo ein sCO<sub>2</sub>-Kreisprozess z. B. in industrielle Abwärmesysteme unter Berücksichtigung der Anforderungen zukünftiger, weitgehend regenerativ versorgter Energiesysteme, integriert wird.

Zu diesem Zweck fand ein intensiver Austausch mit den Projektpartnern Salzburg AG und Zementwerk Hatschek statt, da diese als Energieversorger bzw. Abwärmelieferanten das für die Bearbeitung dieses Arbeitspakets notwendige Know-How lieferten.

Vorbereitende Analysen zum Thema Kombination von sCO<sub>2</sub>-Kreisläufen mit Energiespeichern wurden an der TU Wien/IET bereits vor dem aktuellen Projekt durchgeführt, vgl. [7]. Während der Projektlaufzeit wurde das Thema in [8] vertiefend behandelt.

Besonderes Augenmerk wurde in [8] auf sogenannte elektrothermische Systeme gelegt, vgl. z. B. [9]. Die in [9] beschriebenen Systeme zeichnen sich durch sCO<sub>2</sub>-basierte Arbeits- und Kraftprozesse aus mit denen Power2Heat-Konzepte realisiert werden können. In den Arbeiten [7] und [8] wurde untersucht, wie sich solche Power2Heat-Systeme auf thermische Speichern mit höherem Temperaturniveau erweitern lassen, um auch industrielle Abwärme zu speichern.

Option Leistung	Einspeicherung	Kaltes Reservoir	Warmes Reservoir	Ausspeicherung
Option 1.1 100 MW [9]	Kohlendioxid Wärmepumpe	Eisspeicher 0°C (latent)	Wasserspeicher 19 – 111°C	Kohlendioxid Wärmekraftprozess
Option 1.2 100 MW		Eisspeicher 0°C (latent)	Sandspeicher 90 – 265°C	
Option 1.3 100 MW		Wasser-/ Glykol- speicher -20 – 17,5°C	Sandspeicher 250 – 560°C	Wasserdampf Rankine
Option 1.4 100 MW		Wasser-/ Glykol- speicher -20 – 17,5°C	Salzspeicher 250 – 560°C	
Option 2.1 100 MW	Stickstoff Wärmepumpe	n-Hexan -93 – 27°C	Salzspeicher 250 – 560°C	Stickstoff Wärmekraftprozess
Option 2.2 100 MW		n-Hexan -93 – 27°C	Sandspeicher 250 – 560°C	
Option 2.3 100 MW	Luft Wärmepumpe	n-Hexan -93 – 27°C	Salzspeicher 250 – 560°C	Luft Wärmekraftprozess

**Tabelle 7: Simulierte Fälle elektrothermischer Energiespeicher, vgl. [8]**

Das folgende Schaltbild in Abb. 22 zeigt beispielhaft die in Option 1.1 behandelte Version mit Eis- und Wasserspeicher, wo für die Wärmepumpe wie auch den Kraftprozess sCO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium verwendet wurde. Die Simulationsrechnungen wurden mit Epsilon durchgeführt, vgl. [8].

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

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

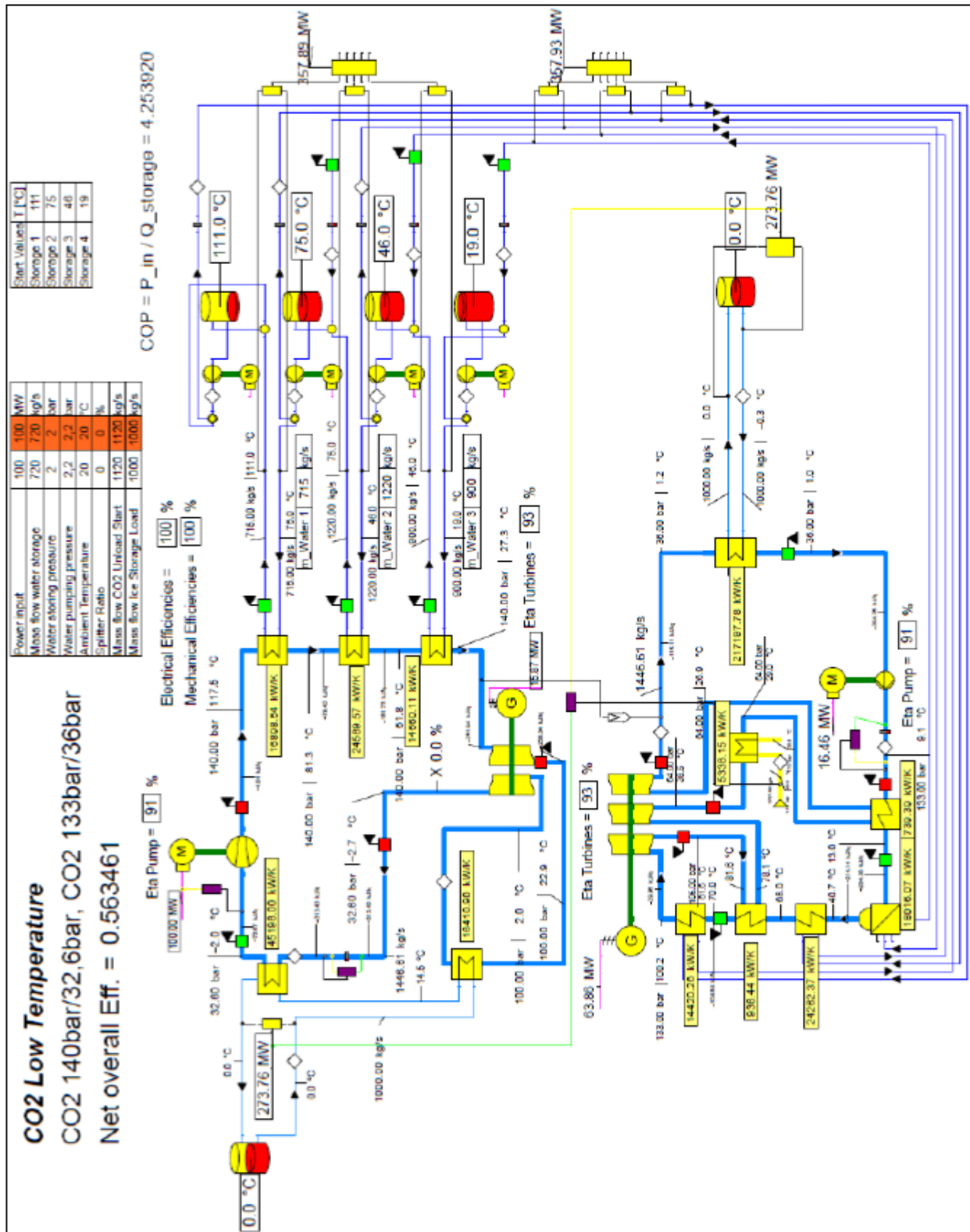


Abb. 22: sCO<sub>2</sub>-basierter Wärmepumpen- und Turbinenkreislauf nach [9]

### 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

#### Ergebnisse:

Das Projekt lieferte wesentliche Erkenntnisse über die Möglichkeiten von sCO<sub>2</sub>-Kraft und Arbeitsprozessen. Durch die Zusammenarbeit im Konsortium konnten wesentliche Erkenntnisse betreffend:

- die Planung,
- den Bau
- den Betrieb von sCO<sub>2</sub>-Versuchsanlagen

gewonnen werden. Aus der Errichtung und dem Betrieb der Versuchsanlage konnten interessante Erkenntnisse zur Inbetriebnahme (Betrieb im transkritischen und überkritischen Bereich) gewonnen werden.

#### Schlussfolgerungen:

Die sCO<sub>2</sub>-Technologie ist ein interessantes Konzept für zukünftige Energiewandlungs- und Speicherkonzepte. Anwendungsschwerpunkte sind konzentrierende Solartechnik und die industrielle Abwärmenutzung.

Durch Methoden der elektrothermischen Energiespeicherung in Verbindung mit thermischen Energiespeichern im Nieder und /oder Mitteltemperaturbereich lassen sich interessante Kombinationen von industrieller Abwärmenutzung und Power2Heat-Systemen realisieren.

### 5 Ausblick und Empfehlungen

#### Ausblick:

Die Durchführung des Projektes war für das Konsortium der Einstieg in die Forschung und Entwicklung der sCO<sub>2</sub>-Technologie. Das Projekt ermöglichte TU Wien / IET die Teilnahme am Horizon 2020-Projekt „SCARABEUS“ (Supercritical Carbon dioxide / Alternative fluids Blends for Efficiency Upgrade of Solar power plant); Projektstart April 2019, Dauer 48 Monate. TU Wien / IET führt im Rahmen des Projektes SCARABEUS Messungen zum Wärmeübergang an sCO<sub>2</sub>-Wärmetauschern und Kondensatoren statt. Dabei werden nicht nur reines sCO<sub>2</sub> sondern auch Gemische von Kohlendioxid mit anderen Substanzen getestet, um den kritischen Punkt des Gemisches zu heben. Dadurch kann im Kraftwerks-Kreisprozess die Abwärme einfacher an die Umgebung abgegeben werden, z. B. mit Hilfe eines luftgekühlten Kondensators der im Rahmen des SCARABEUS-Projektes an der Versuchsanlage von TU Wien / IET getestet wird. Neben den experimentellen Untersuchungen sind auch Prozesssimulationen Aufgabe von TU Wien / IET. Die Bereitstellung einer Versuchsanlage war die Voraussetzung für TU Wien / IET an dem EU-Projekt teilzunehmen– insofern ist das Projekt sCO<sub>2</sub> Phase 1 der Ausgangspunkt für die Fortführung und weitere Entwicklung der Forschungsarbeiten.

Weiters wurde im Rahmen des Projektes eine neue Tagungsveranstaltung zum Thema sCO<sub>2</sub> eingeführt. TU Zur Intensivierung der F&E-Arbeiten auf dem Gebiet von sCO<sub>2</sub>-Systemen wurde eine europäische Konferenz initiiert, die erstmals als „1st European Seminar on Supercritical CO<sub>2</sub> Power Systems“ vom 29.09.-30.09.16 an der TU Wien abgehalten wurde. Bei dieser Tagung trug TU Wien (IET) drei Vorträge bei und ein intensiver Austausch mit Firmen und potentiellen Projektpartnern für Folgeprojekte fand statt.

Zur weiteren Entwicklung dieser Tagung wurde ein europäisches Konsortium gebildet; zwischenzeitlich fand die Konferenz zwei weitere Male statt und zwar an der Universität Duisburg-Essen (August 2018) und bei EDF in Paris (Sept. 2019) statt. Die Konferenz wurde in den beiden aufeinanderfolgenden Jahren 2018 und 2019 abgehalten, um ab 2019 die Veranstaltung nicht gleichzeitig mit dem „International Power Cycle Symposium“ in den USA stattfinden zu lassen. Zwischenzeitlich wurde die Bezeichnung der Veranstaltung auf „European Conferences on Supercritical CO<sub>2</sub>“ geändert, vgl. dazu die aktuelle Homepage der letzten Konferenz:

<https://www.sco2.eu/>

Aus der Konferenz heraus resultierte die Gründung eines Konsortiums zur besonderen Förderung von sCO<sub>2</sub>-Aktivitäten in Europa: Arbeitstitel sCO<sub>2</sub>-Alliance. Der Vorschlag zur Gründung eines solchen Konsortiums wurde von den Veranstaltern der „European Conference on Supercritical sCO<sub>2</sub>“ im Rahmen der Konferenz in Paris 2019 gemacht. Dieser Beschluss fällt nicht mehr in die Projektlaufzeit von sCO<sub>2</sub> Phase 1, die Möglichkeit zur Mitwirkung in solch einer Allianz – mit dem Ziel eine Demonstrationsanlage in Europa zu errichten und zu betreiben ist aber Folge des Projektes sCO<sub>2</sub> Phase 1.

### **Empfehlungen:**

Aus Sicht der jüngsten Entwicklungen betreffend Klimawandel und erforderlicher Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind fortschrittliche, integrierbare Energiewandlungskonzepte (Abwärmenutzung und thermische Speicher als Carnot-Batterie) bereitzustellen. Aufgrund der aktuellen Fördermittellage und der förderungstechnischen Randbedingungen in der Energieforschung während der letzten 3 Jahre, war es trotz größter Bemühungen des Konsortiums nicht möglich ein nationales Folgeprojekt zu initiieren, das den Wünschen der Industriepartner, nämlich möglichst rasch ein sCO<sub>2</sub>-Power-System zu entwickeln, entgegengekommen wäre!

## **6 Literaturverzeichnis**

- [1] Flegkas et al.: Comparison of Conventional and CO<sub>2</sub> Power Generation Cycles for Waste Heat Recovery. 1st European Seminar on Supercritical CO<sub>2</sub> (sCO<sub>2</sub>) Power Systems, 29<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> Sept. 2016, TU Wien, Austria.
- [2] Benda, L.: Design of a supercritical CO<sub>2</sub>- test rig. MS-Thesis (Diplomarbeit), TU Wien, IET, March 2017.
- [3] Klemencic, G. et al.: Design and dynamic simulation of a 200 kWth laboratory sCO<sub>2</sub>-test rig, 6th International Power Cycle Symposium, Pittsburgh, USA, March 2018.
- [4] Schwarzmayr, P.: Charakterisierung der Wärmeübergangseigenschaften von superkritischem CO<sub>2</sub>. Bachelorarbeit TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien, 2019.
- [5] R. Span und W. Wagner, „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, 25 (6), pp. 1509-1596, 1996.
- [6] O. Maass, „Changes in the Liquid State in the Critical Temperature Region“ Chemical Reviews, 23 (1), pp. 17-28, 1938.

[7] Flegkas, S.: Simulation of Supercritical Carbon Dioxide Cycles for Electrothermal Energy Storage. Diplomarbeit TU Wien, 2015.

[8] Striok, L.: Modellierung und Vergleich thermodynamischer Energiespeichermethoden. Diplomarbeit TU Wien, 2019.

[9] M. Mercangöz, J. Hemrle, L. Kaufmann, A. Z'Graggen und C. Ohler, „Electrothermal energy storage with transcritical CO<sub>2</sub> cycles,“ Elsevier, Energy 45, 2012.

## 7 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: Dr. Andreas WERNER

Institut/Unternehmen: TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik (E302)

Kontaktadresse: A-1060 Wien, Getreidemarkt 9

Tel. Nr.: +43 58801 302 314,

e-mail; [andreas.werner@tuwien.ac.at](mailto:andreas.werner@tuwien.ac.at)

Webpage des Instituts: <https://www.iet.tuwien.ac.at/>

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen:

Projektpartnerin 1: Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation

Projektpartnerin 2: Zementwerk Hatschek GmbH

Projektpartnerin 3: Zauner Anlagentechnik GmbH

Projektpartnerin 4: Maschinenfabrik Liezen und Gießerei Ges. m. b. H.

Projektpartnerin 5: Scheuch GmbH