

Untersuchung verschiedener Fluide im überkritischen ORC Prozess

Diplomarbeit

von

Gregor Ratzberger

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik

Institutsvorstand:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer:

A.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sanz

Graz, im April 2014

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sanz für die Bereitschaft, die Betreuung dieser Arbeit zu übernehmen und die Unterstützung im Zuge dieser Diplomarbeit bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Stefan Bergmann von der SimTech GmbH für die Hilfestellungen und Durchsicht der Arbeit.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meiner Familie, die mir die gesamte Ausbildung ermöglichte und mich dabei immer unterstützte.

Gregor Ratzberger

Graz, 2014

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Auslegung und Optimierung von Hochtemperatur Organic Rankine Cycles (ORC) und dem Verhalten verschiedener Fluide im überkritischen Bereich. ORC – Prozesse sind Dampfkreisläufe, die statt Wasser organische Medien verwenden und dadurch für niedrige Temperaturbereiche interessant sind. Mögliche Wärmequellen solcher ORC – Prozesse sind nicht genutzte Prozessabwärme, Solarthermie und die in Österreich weit verbreiteten Biomassefeuerungen.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Stoffdatenbank - Prototyp, auf Basis der Stoffdatenbank Refprop9 des National Institute of Standards and Technology (NIST), in das für die Simulationen verwendete Programm IPSEpro v5 eingefügt. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Stoffwerte dieser Refprop9 Datenbank mit jener in IPSEpro v5 schon vorhandenen.

Im zweiten Teil werden die einzelnen Prozesse mit Hilfe des Programms IPSEpro v5 modelliert und mit den Fluiden Pentan, Toluol und MDM, die für die auftretenden Temperaturen geeignet sind, simuliert. Als Optimierungsmöglichkeiten werden die Verwendung eines internen Wärmetauschers und die überkritische Betriebsweise genauer betrachtet und die erreichbaren Wirkungsgradsteigerungen dieser beiden Möglichkeiten analysiert. Letztendlich soll der bestmögliche Wirkungsgrad und das dafür zu verwendende Fluid für verschiedene Betriebsbedingungen ermittelt werden. Die Ergebnisse, wie der thermische Wirkungsgrad und die Auswahl des am besten geeigneten Fluids, werden anschließend in Tabellen und Diagrammen dargestellt.

Abstract

The present work deals with the design and optimization of high-temperature Organic Rankine Cycles (ORC) and the behavior of various fluids in the supercritical region. ORC - processes are steam cycles which use organic fluids instead of water. This is a reason why they become interesting for low temperature ranges. Possible heat sources for such ORC - processes are process waste heat, solar thermal facilities and biomass combustion furnaces, which are widespread in Austria.

In the first part of the work a new database for fluid properties, specifically the fluid database of the National Institute of Standards and Technology (NIST), is implemented in the thermodynamic simulation tool IPSEpro. This is followed by a comparison of the physical characteristics of the new database and the old one.

In the second part different processes will be modelled and simulated in IPSEpro, using different fluids which are suitable for the required temperatures. The focus in this thesis is on n-pentane, toluene and MDM. Different optimization options like an internal heat exchanger and the supercritical mode are analyzed in detail and the achievable gains in efficiency are discussed. Finally the best possible efficiency and the best suitable fluid to be used for different operating conditions are determined. The results such as thermal efficiency and selection of the best suitable fluid are then presented in tables and diagrams.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	I
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	V
NOMENKLATUR	VII
1. EINLEITUNG	1
1.1 AUFGABE	2
1.2 ÜBERBLICK	2
2. ORGANIC RANKINE CYCLE	3
2.1 GESCHICHTE	3
2.2 GRUNDLAGEN	4
2.2.1 TYPISCHER AUFBAU EINES ORC PROZESSES	5
2.2.2 MÖGLICHKEITEN ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG	6
2.2.2.1 <i>Rekuperator</i>	6
2.2.2.2 <i>Überhitzung</i>	8
2.2.2.3 <i>Überkritischer Prozess</i>	9
2.3 FLUIDE	11
2.3.1 UNTERSCHIED WASSER – ORC MEDIEN	11
2.3.2 AUSWAHL	14
2.3.3 ORC MEDIEN	16
3. ORC – KREISLAUF MODELLIERUNG	19
3.1 IPSEPRO.....	19
3.1.1 PROCESS SIMULATION ENVIRONMENT (PSE)	20
3.1.2 MODEL DEVELOPMENT KIT (MDK)	20
3.1.3 VERWENDETE BIBLIOTHEKEN	21
3.1.4 VERWENDETE KOMPONENTEN	21
4. NIST	23
4.1 VERGLEICH DER DATENBANKEN	23
5. SIMULATIONEN	30

Inhaltsverzeichnis

5.1	N-PENTAN	32
5.1.1	OHNE REKUPERATOR.....	32
5.1.2	MIT REKUPERATOR	38
5.1.3	VERGLEICH	42
5.2	TOLUOL	43
5.2.1	OHNE REKUPERATOR.....	43
5.2.2	MIT REKUPERATOR	49
5.2.3	VERGLEICH	54
5.3	MDM.....	55
5.3.1	OHNE REKUPERATOR.....	55
5.3.2	MIT REKUPERATOR	59
5.3.3	VERGLEICH	64
6.	VERGLEICH N-PENTAN – TOLUOL – MDM.....	65
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	69
8.	LITERATURVERZEICHNIS	71
9.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	74
10.	TABELLENVERZEICHNIS	76

Nomenklatur

drain_cold.....	Abfluss kalte Seite	[-]
drain_hot.....	Abfluss heiÙe Seite	[-]
feed_cold.....	Zufluss kalte Seite	[-]
feed_hot.....	Zufluss heiÙe Seite	[-]
GWP.....	Global Warming Potential / Treibhauspotenzial	[-]
h.....	spezifische Enthalpie	[kJ/kg]
ODP.....	Ozone Depletion Potential / Ozonabbaupotenzial	[-]
p.....	Druck	[bar]
p _{krit}	kritischer Druck	[bar]
p _{max,über}	maximaler überkritischer Druck	[bar]
p _{max}	Maximaldruck	[bar]
p _{Kond}	Kondensationsdruck	[bar]
q.....	spezifischer Wärmefluss	[W/m ²]
s.....	spezifische Entropie	[kJ/kgK]
shaft_in.....	Anschluss Antriebswelle	[-]
shaft_out.....	Anschluss Abtriebswelle	[-]
s _{max}	maximale spezifische Entropie	[kJ/kgK]
sub.....	unterkritisch	[-]
T.....	Temperatur	[°C], [K]
T _{Kond}	Kondensationstemperatur	[°C]
T _{krit}	kritische Temperatur	[°C]
T _{m,Rek}	thermodynamische Mitteltemperatur mit Rekuperator	[K]
T _m	thermodynamische Mitteltemperatur	[K]
T _{max}	Maximaltemperatur	[K]
T _{Thermo}	Thermoöltemperatur	[°C]
Δh.....	spezifische Enthalpiedifferenz	[kJ/kg]
ΔT.....	Temperaturdifferenz	[°C]
ΔT _{krit}	Temperaturdifferenz zur krit. Temperatur	[°C], [%]
η _{Pumpe}	Pumpenwirkungsgrad	[-]
η _{th}	thermischer Wirkungsgrad	[-]
η _{th,max}	maximaler thermischer Wirkungsgrad	[-]
η _{Turbine}	Turbinenwirkungsgrad	[-]
ξ.....	Nässegrad	[-]

1. Einleitung

Der globale Energieverbrauch steigt seit jeher und wird mit wachsender Bevölkerungszahl sicher nicht kleiner. Zusätzlich führt die Modernisierung und steigende Industrialisierung der Schwellenländer, wie China und Indien, zu einem noch größeren Durst nach Energie. In diesen Ländern wird vor allem auf traditionelle Ressourcen, wie Kohle, Öl und Atomenergie gesetzt. Dies führt zu einer immer größer werdenden Verknappung dieser Energieträger und in weiterer Folge zu steigenden Energiepreisen. Atomkraft birgt zusätzlich noch die ständige Gefahr radioaktiver Verschmutzung der Umwelt durch Unfälle oder Terroranschläge. Des Weiteren ist auch die Endlagerung der Abfälle ein bis dato, also schon seit über einem halben Jahrhundert, ungeklärtes Problem.

Doch nicht nur steigende Preise, sondern auch das immer größer werdende Umweltbewusstsein der Bevölkerung führt zu einem Umdenken in der Verwendung dieser traditionellen Energieträger. Jüngstes Beispiel ist der Ausstieg Deutschlands aus der Atomenergie (Bundesregierung, 2014) und die immense Förderung von Photovoltaik-, Windkraft- und Biomasseanlagen (BMWFJ & Lebensministerium, 2014). Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung sogenannter Organic Rankine Cycle (ORC), zur Verwendung von Wärme aus erneuerbarer Energie.

Konventionelle thermische Kraftwerke wandeln die Wärme, die bei der Verbrennung von Kohle, Gas oder Öl entsteht, in Strom um. Bei Atomkraftwerken wird die Abwärme, die beim Zerfall der Atome entsteht, genutzt. In all diesen Anlagen findet man einen Dampfprozess, den sogenannten Clausius Rankine Cycle oder einen Joule-Brayton Prozess. Im Vergleich mit diesen Großkraftwerken sind Organic Rankine Cycle Kraftwerke viel kompakter, billiger und vor allem für den dezentralen Einsatz geeignet. Zudem kann man durch die Verwendung des richtigen Betriebsmediums Wärme bei geringeren Temperaturen und Drücke viel besser nutzen. Dadurch kann es auch in Verbindung mit solarthermischen oder geothermischen Wärmequellen genutzt werden, was vor allem für unsere Breitengrade interessant ist.

1.1 Aufgabe

Das Thema dieser Arbeit wurde vom Institut für thermische Turbomaschinen, insbesondere von ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Sanz, gemeinsam mit der Firma SimTech GmbH vorgegeben. SimTech GmbH ist eine Softwarefirma mit Sitz in Graz, die sich auf die Modellierung und Simulation von Prozessen in der Energieerzeugung und Verfahrenstechnik spezialisiert hat. Die verwendete Software, mit dem Namen IPSEpro, ist ein Prozessmodellierungssystem, das aus verschiedenen Modulen besteht. Es unterstützt den Benutzer bei der Simulation einer Anlage im gesamten Lebenszyklus, das heißt vom Konzept bis zur Betriebsoptimierung.

Das Ziel dieser Arbeit besteht nun darin, mit Hilfe der verwendeten Software IPSEpro verschiedene Betriebsarten von Organic Rankine Cycles zu simulieren, für unterschiedliche organische Medien die optimalen Betriebszustände zu finden und diese miteinander zu vergleichen. Diese Betriebszustände sollen nicht nur im subkritischen Bereich liegen, sondern auch mit Hauptaugenmerk auf den überkritischen Bereich betrachtet werden.

1.2 Überblick

Im ersten Teil dieser Arbeit, Kapitel 2, werden nach einer kurzen Einleitung, die Grundlagen zu Organic Rankine Cycles erklärt. Dazu erfolgt eine Beschreibung des Prozesses und verschiedener Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Zusätzlich werden die gängigsten und in dieser Arbeit verwendeten Fluide vorgestellt.

In Kapitel 3 erfolgt eine Skizzierung der Kreislaufmodellierung, eine Beschreibung des verwendeten Programms IPSEpro v5 und der dazugehörigen Bibliotheken und Komponenten.

Im nächsten Abschnitt wird der Vergleich der neuen mit der alten Stoffdatenbank beschrieben.

In Kapitel 5 werden die Kreisläufe simuliert und mit verschiedenen Medien durchgerechnet. Es folgt eine Analyse und Gegenüberstellung der einzelnen Fluide und Optimierungsmöglichkeiten.

2. Organic Rankine Cycle

Organic Rankine Cycle (ORC) Anlagen sind typischerweise Kleinanlagen (<5 MW), die bei – im Vergleich zu herkömmlichen Dampfkraftwerken – niedrigen Temperaturen betrieben werden. Bevorzugt eingesetzt werden sie in Verbindung mit Geothermie, Solarthermie und sonstige Prozessabwärme. Abbildung 1 zeigt die Kompaktheit einer solchen Anlage, im speziellen Fall die Demonstrationsanlage in Admont (Steiermark, Österreich). In diesem Kapitel wird auf die technischen Grundlagen und die möglichen Einsatzgebiete genauer eingegangen.



Abbildung 1: ORC Anlage bei der Anlieferung in Admont (<http://www.bios-bioenergy.at>)

2.1 Geschichte

Seinen Namen verdankt der Rankine Prozess dem schottischen Ingenieur und Physiker William Macquorn Rankine (1820 – 1872). Er studierte von 1836 – 1838 an der Universität Edinburgh, machte jedoch keinen Abschluss. Anschließend veröffentlichte er zahlreiche Arbeiten im Bereich des Ingenieurwesens, darunter Theorien zur Dampfmaschine und Wärmekraftmaschinen. Er gilt als einer der Begründer der thermodynamischen Wissenschaft.

Normalerweise wird für den Rankine Cycle Wasser verwendet, doch wurden schon bald die ersten Anwendungen mit anderen Arbeitsmedien entwickelt. 1883 konstruierte Frank Ofeldt die sogenannte Naphtha – Maschine, die anstelle von

Wasser Naphtha verwendet. Naphtha wird bei der Erdölfraction gewonnen und ist Rohbenzin. Vorwiegend kamen seine Maschinen in Booten zum Einsatz, da man zur damaligen Zeit für den Betrieb einer Dampfmaschine, die mit Wasser betrieben wird, eine Lizenz brauchte, für Naphtha jedoch nicht. So konnten Boote auch ohne Techniker betrieben werden. (Turboden s.r.l., 2014)

Weiterentwickelt wurde der ORC Prozess erst wieder im 20. Jahrhundert. Vor allem Italien, Israel, die USA und Russland gelten als Vorreiter auf diesem Gebiet.

2.2 Grundlagen

Wie schon angedeutet, ist der Organic Rankine Cycle an den Clausius Rankine Cycle angelehnt, nur verwendet er statt Wasser organische Medien. Im Vergleich zu Wasser haben diese organischen Medien dann einen Vorteil, wenn die Höchsttemperatur und die Anlage klein sind, denn bei niedrigen Temperaturen führen organische Fluide zu höheren Effizienzen. Diese haben sie auch bei kleinen Anlagen im Teillastbereich (Oberberger, Hammerschmid, & Bini, 2001). Die meistgenutzten Fluide sind:

- Pentan
- Butan
- Toluol
- Silikonöl
- R-134a
- R-245fa

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird noch genauer auf die untersuchten Fluide eingegangen.

Nachfolgend werden der Aufbau eines ORC Prozesses erklärt und die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung, wie Rekuperator, Überhitzung und der überkritische Betrieb beschrieben.

2.2.1 Typischer Aufbau eines ORC Prozesses

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten für den Aufbau einer ORC Anlage. Hier wird der Prozess an einer typischen, oft verwendeten Konfiguration erklärt. Abbildung 2 zeigt deren Aufbau.

In diesem Schema ist auf den Rekuperator hinzuweisen, der bei ORC Anlagen fast immer Anwendung findet, bei Dampfprozessen weniger.

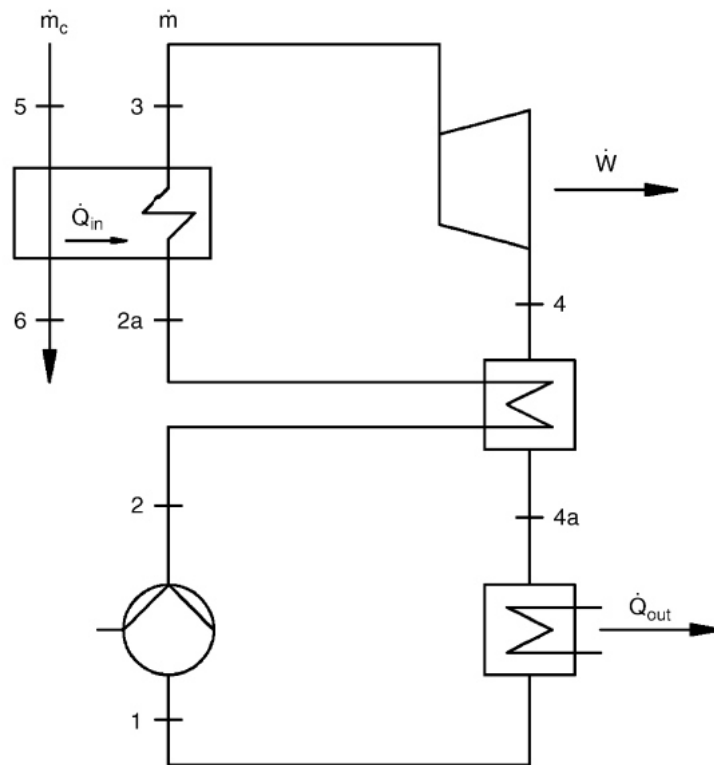


Abbildung 2: ORC Kreislauf (Saleh, Koglbauer, Wendland, & Fischer, 2007)

Von Punkt 1 bis 2 wird das Fluid in der Pumpe auf den notwendigen Betriebsdruck verdichtet. Zwischen 2 und 2a wird das Arbeitsmedium durch die, nach der Turbine vorhandene Abwärme, erhitzt. Danach erfolgt die Verdampfung (2a – 3) des Fluids. Die dazu notwendige Wärme wird durch eine externe Wärmequelle (Solarthermie, Geothermie,...) zugeführt. Anschließend kommt es zur Expansion in der Turbine (3 – 4) und im Rekuperator (zw. 4 – 4a) wird, wie zuvor schon beschrieben, die noch vorhandene Abwärme an das verdichtete Fluid abgegeben. Abbildung 3 zeigt das für diesen beschriebenen Kreislauf dazugehörige T-s Diagramm.

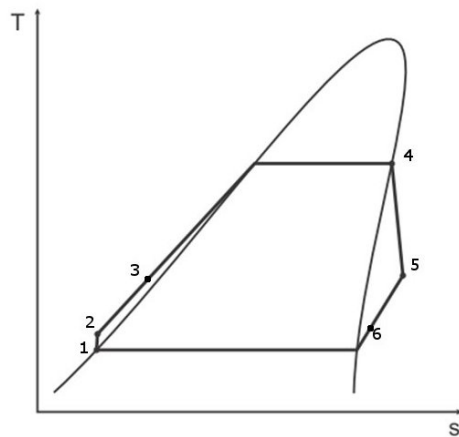


Abbildung 3: T-s Diagramm (Haider, 2010)

2.2.2 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung

Um den Wirkungsgrad des Organic Rankine Cycle zu erhöhen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Neben der Auswahl des richtigen Fluids, können auch der Einsatz eines Rekuperators, die Überhitzung und die überkritische Betriebsweise zu einer Erhöhung der Effizienz beitragen.

2.2.2.1 Rekuperator

In Abbildung 4 werden ein Carnot Prozess und ein Rankine Prozess im T-s Diagramm verglichen. Zusätzlich wird die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr T_m dargestellt.

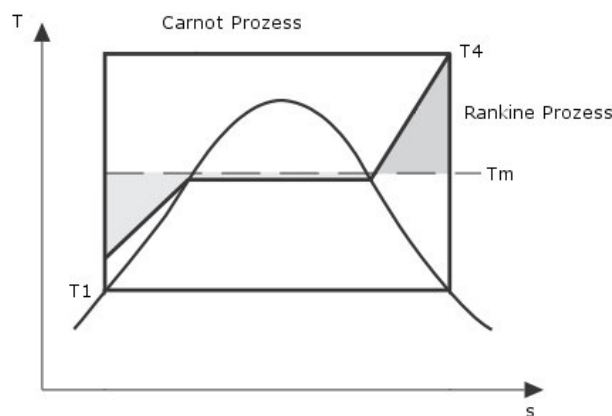


Abbildung 4: Vergleich Carnot - Rankine Prozess [abgeänderte Darstellung (Haider, 2010)]

Durch einen Rekuperator versucht man nun den Wirkungsgrad des Rankine Prozesses an jenen des Carnot Prozesses anzunähern (Carnotisierung), indem man Wärme bei einer höheren Fluidtemperatur zuführt. Dadurch erhöht sich die Eintrittstemperatur in den Verdampfer von T_2 auf T_3 (Abbildung 3) und in weiterer Folge auch die Mitteltemperatur der Wärmezufuhr T_m auf $T_{m,Rek}$, wodurch wiederum der thermische Wirkungsgrad des Prozesses verbessert wird. Diese zugeführte Wärme ist die, nach der Turbine, noch vorhandene Restwärme.

Nach dem ersten Hauptsatz gilt

$$q_{24} = h_4 - h_2 \quad (1)$$

Danach definiert man die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr T_m durch

$$q_{24} = T_m(s_4 - s_2) \quad (2)$$

$$T_m = \frac{h_4 - h_2}{s_4 - s_2} \quad (3)$$

Der thermische Wirkungsgrad des Prozesses ergibt sich dann aus:

$$\eta_{th} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_2} \quad (4)$$

Die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr im Prozess mit Rekuperator $T_{m,Rek}$ ist:

$$T_{m,Rek} = \frac{h_4 - h_3}{s_4 - s_3} \quad (5)$$

$$T_{m,Rek} > T_m \quad (6)$$

Daraus ergibt sich, dass der thermische Wirkungsgrad des Prozesses mit Rekuperator größer ist, als jener ohne:

$$\eta_{th} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_2} < \frac{(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_3} \quad (7)$$

Die Verwendung eines Rekuperators in ORC Anlagen ist oft in Betracht zu ziehen, da die meisten organischen Medien eine positive Steigung der Taulinie aufweisen und dadurch immer nutzbare Restwärme nach der Turbine zur Verfügung steht.

2.2.2.2 Überhitzung

Eine weitere Möglichkeit die auch oft durchgeführt wird, vor allem in „normalen“ Rankine Cycle, ist die Überhitzung. Das heißt, das Fluid wird nach dem Verdampfen noch weiter erhitzt. Dies erfolgt in erster Linie, um nach dem Expandieren in der Turbine nicht unter die Sattdampfkurve und so ins Zweiphasengebiet zu entspannen. Die sich dadurch bildenden Tröpfchen führen in der Turbine zu größerem Verschleiß (Erosion) und erhöhter Korrosionsgefahr.

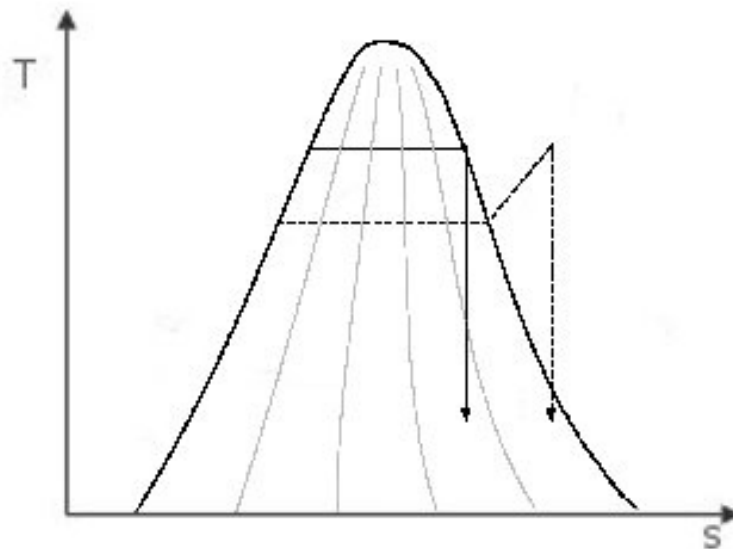


Abbildung 5: Ts-Diagramm ohne (durchgezogene Linie) und mit (strichlierte Linie) Überhitzung [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)]

Abbildung 5 zeigt den Unterschied der beiden Prozesse. Wie man deutlich erkennen kann, wird bei gleicher Höchsttemperatur – im Fall ohne Überhitzung (durchgezogene Linie) – viel weiter ins Zweiphasengebiet expandiert, als beim Prozess mit Überhitzung (gestrichelte Linie).

Um den Wirkungsgrad der Anlage zu verbessern, kann man wie oben mit einer Gleichung (5) beschrieben, die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr T_m erhöhen. Dies erfolgt durch die Erhöhung des Drucks und der Höchsttemperatur. Der Erhöhung sind aber auch Grenzen gesetzt, vor allem durch die verwendeten Werkstoffe in Verdampfer, Leitungen und Turbine.

Weiters erkennt man, dass bei gleicher Höchsttemperatur das Medium des Kreislaufs mit Überhitzung, bei niedrigerer Temperatur und niedrigerem Druck, verdampft wird. Demzufolge kann man durch die Überhitzung die mechanischen Anforderungen an

Verdampfer und Turbine verringern und in weiterer Folge die Kosten und den Wartungsaufwand senken.

Oft reicht eine einfache Überhitzung nicht aus, um eine zu starke Expansion ins Nassdampfgebiet zu verhindern. Deshalb kommt, vor allem in „normalen“ Rankine Cycles, die sogenannte Zwischenüberhitzung zum Einsatz. Dabei wird das Medium in einer Hochdruckturbine entspannt, nochmals erhitzt und anschließend in einer Mittel-/Niederdruckturbine expandiert.

Nach neuesten Untersuchungen, soll bei ORC Prozessen wenig bis gar nicht überhitzt werden. Bei durchgeführten Tests wurde festgestellt, dass die höchste Effizienz dann erreicht wird, wenn das Fluid nach dem vollständigen Verdampfen, also direkt von der Taulinie, entspannt wird (Drescher, 2007). Außerdem würde eine zu große Überhitzung aufgrund der niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten von Organischen Medien zu sehr großen und in weiterer Folge sehr teuren Wärmetauschern führen.

2.2.2.3 Überkritischer Prozess

Beim überkritischen Prozess wird nicht, wie beim normalen Rankine Prozess sonst üblich, durch das Nassdampfgebiet verdampft. Stattdessen wird das Medium durch die Pumpe auf so hohen Druck ($p > p_{krit}$) gebracht, dass es bei der folgenden Wärmezufuhr immer über der Taulinie und in Folge dessen über dem kritischen Punkt bleibt. Der kritische Punkt ist jener thermodynamische Zustand eines Stoffes, ab dem flüssige und gasförmige Phase nicht mehr unterschieden werden können. Wie man in Abbildung 6 sehen kann, liegt der kritische Punkt an der Spitze des Nassdampfgebietes. Des Weiteren erkennt man bei diesem Vergleich, dass der kritische Punkt bei organischen Medien im Allgemeinen tiefer liegt als bei Wasser.

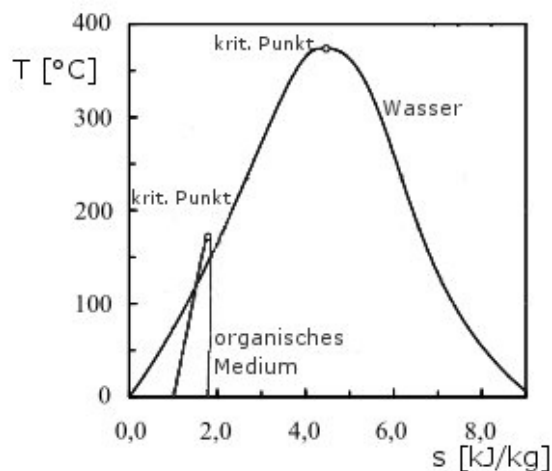


Abbildung 6: Vergleich T-s Diagramm Wasser und organisches Medium, [Abgeänderte Darstellung (Karellas & Schuster, 2008)]

Der große Vorteil des superkritischen Prozesses ist, wie beim Überhitzen, die Erhöhung der mittleren Temperatur T_m bei der Wärmezufuhr. Dadurch steigt nach Carnot der Wirkungsgrad [Gleichung (4)]. Diese Erhöhung von T_m ist im folgenden Bild zu erkennen:

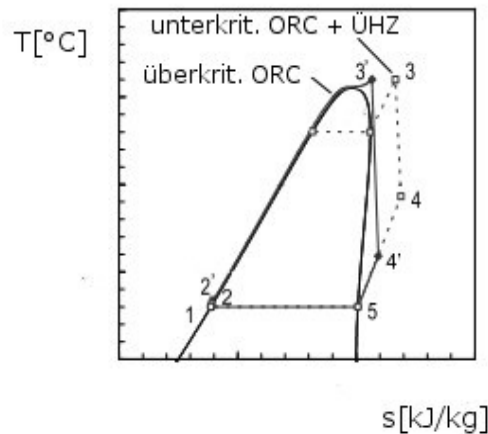


Abbildung 7: Ts-Diagramm. Vergleich Über- und Unterkritischer Prozess. [Abgeänderte Darstellung (Karellas & Schuster, 2008)]

Der überkritische Kreislauf hat aber für eine gegebene Höchsttemperatur ein Wirkungsgradmaximum über das es auch mit starker Erhöhung des Druckes nicht gehoben werden kann. Der Grund dafür ist im Ts – Diagramm zu sehen. Durch die Erhöhung des Druckes wird der Betriebspunkt 3, bei konstanter Maximaltemperatur, nach links verschoben. Dadurch ergibt sich eine Abnahme der Enthalpie. Des Weiteren muss beachtet werden, dass nicht durch das Zweiphasengebiet expandiert wird. Wie man in Abbildung 8 sieht gibt es für jedes Fluid ein s_{max} ab dem nicht mehr durch das Zweiphasengebiet expandiert wird. Somit ergibt sich für jeden Druck eine zugeordnete Temperatur die nicht unterschritten werden darf.

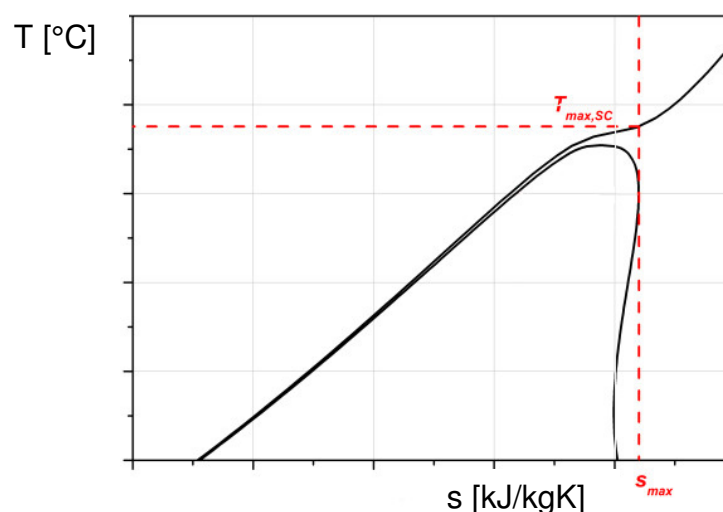


Abbildung 8: Darstellung der maximalen Entropie [Abgeänderte Darstellung (Preißinger, 2011)]

Im Vergleich zum Prozess mit Überhitzung ist η_{th} beim überkritischen Prozess abermals höher.

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} < \frac{(h_3' - h_4') - (h_2' - h_1)}{h_3' - h_2'} \quad (8)$$

Die Enthalpiedifferenz in der Turbine ($h_3' - h_4'$) ist für den überkritischen Fall höher, als für den unterkritischen. Die höhere spezifische Arbeit der Pumpe ($h_2' - h_1$), die benötigt wird, um überkritisches Niveau zu erreichen, ist im Vergleich dazu geringer. Dadurch ergibt sich der höhere thermische Wirkungsgrad.

Im Vergleich zur unterkritischen Betriebsweise sind ein möglicher Nachteil dieser Betriebsart die höheren Drücke, die erreicht werden. Hier sollte man auf das Material Rücksicht nehmen, im Vergleich zu modernen Dampfkraftwerken sind die maximalen Betriebsdrücke verhältnismäßig gering.

2.3 Fluide

Da vor allem die Fluide einen großen Einfluss auf die Effizienz bzw. auf das Einsatzgebiet des ORC haben, wird in diesem Kapitel näher auf sie eingegangen.

2.3.1 Unterschied Wasser – ORC Medien

Um die höchstmögliche Effizienz der Anlage zu erreichen, ist die Auswahl des richtigen Mediums sehr wichtig. Die typischen Wärmequellen, mit denen ORC Anlagen betrieben werden, sind Geothermie, Solarthermie und Prozessabwärme. Diese Wärmequellen liefern Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau, ein Niveau, für das Wasser nicht mehr gut geeignet ist. Deshalb kommen organische Medien zum Einsatz, von denen man viele aus der Kühlanlagentechnik kennt. Diese Fluide sind aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften besser für die auftretenden Temperaturen geeignet.

Einen wesentlichen Unterschied erkennt man, wenn man die beiden T-s Diagramme vergleicht.

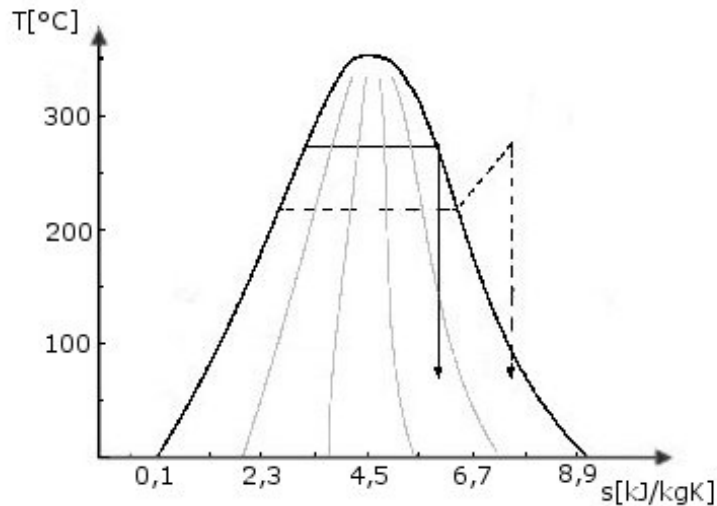


Abbildung 9: T-s Diagramm Wasser [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)]

Wasser ist ein sogenanntes „nässendes“ bzw. „nasses“ Medium (Curran, 1981). Nass nicht im herkömmlichen Sinn, sondern in Bezug auf die Form der Sattdampfcurve. Wie im T-s Diagramm von Wasser (Abbildung 9) ersichtlich, erkennt man, dass diese Sattdampfcurve eine negative Steigung hat. Dies führt dazu, dass bei nicht ausreichender Überhitzung ins Zweiphasengebiet entspannt wird. Wie im Kapitel zuvor schon beschrieben, soll dies aus materialtechnischen Gründen (Korrosion, Erosion) vermieden werden.

Im Gegensatz dazu erkennt man im T-s Diagramm eines organischen Mediums (Abbildung 10), in diesem Fall als Beispiel Toluol, dass die Steigung der Sattdampfcurve positiv ist. Solche Medien bezeichnet man als „trockene“ Medien (Curran, 1981). Wie man in Abbildung 10 sieht, hat man hier nie das Problem, dass man bei isentroper Expansion ins Zweiphasengebiet expandiert. Hier ist mehr oder weniger das Gegenteil der Fall. Bei der Expansion auf Kondensationsdruck, ist noch viel ausnutzbare Wärme nach der Turbine vorhanden, da man noch über der Kondensationstemperatur des Mediums liegt. Diese Restwärme wird in einem Rekuperator genutzt, um das Medium vor dem Verdampfer zu erhitzen (2.2.2.1 Rekuperator). Abbildung 10 zeigt auch, dass durch diese positive Steigung der Sattdampfcurve keine Überhitzung erforderlich ist.

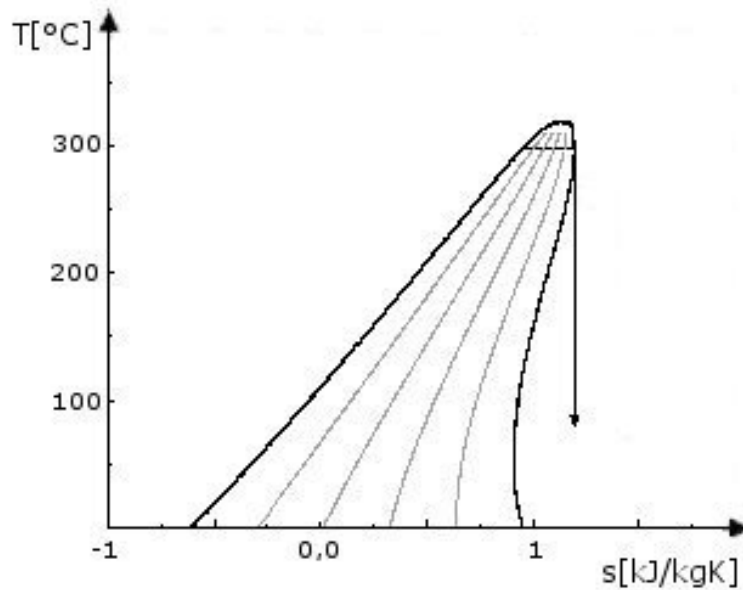


Abbildung 10: T-s Diagramm Toluol [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)]

Die dritte Gruppe der Fluide bilden die „isentropen“ Medien. Sie weisen eine senkrechte Sattdampfkurve auf.

Nachdem die Steigung der Sattdampfkurve mit dT/ds beschrieben werden kann, dieser Wert aber für isentrope Fluide unendlich wird, nimmt man zur Beschreibung wie nass oder trocken ein Fluid ist, den Kehrwert.

$$\xi = ds/dT \quad (9)$$

Mit $\xi > 0$ beschreibt man ein trockenes Fluid, mit $\xi < 0$ ein nasses und ein isentropes Fluid hat ein ξ von ungefähr 0 (Chen, Goswami, & Stefanakos, 2010).

Viele organische Medien haben im Gegensatz zu Wasser, für Temperaturen die in gängigen Wasser und Luft gekühlten Kondensatoren erreicht werden, einen Kondensationsdruck, der über Atmosphärendruck liegt.

Während Dampfkreisläufe meist mehrstufige und somit teurere Turbinen haben, brauchen Organic Rankine Cycle meist nur eine einstufige. Dies vermindert etwaige Verluste und ist zudem kostengünstiger in der Konstruktion und im Betrieb.

2.3.2 Auswahl

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des richtigen Fluids sind die thermodynamischen und physikalischen Eigenschaften. Hier muss zuerst die Art der Fluids unterschieden werden. Wie im Kapitel zuvor beschrieben, kann man Fluide in nass, trocken und isentrop einteilen. Für die Verwendung in einem ORC – Prozess sind isentrope und trockene Fluide von Vorteil, um Tröpfchenbildung während der Expansion zu vermeiden.

Auch wichtig für die Auswahl ist der Einfluss von latenter Wärme, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität. Hier gibt es zwei verschiedene Ansätze. Der erste ist eine niedrige latente Wärme und hohe Dichte um einen hohen Massendurchsatz in der Turbine zu erreichen (Yamamoto, Furuhashi, Arai, & Mori, 2001). Dagegen schlagen Maizza und Maizza vor, Fluide mit hoher latenter Wärme, hoher Dichte und niedriger spezifischer Wärmekapazität zu verwenden (Maizza & Maizza, 1996), da diese mehr Wärme im Verdampfer aufnehmen können. Durch den kleineren Massendurchfluss kann die Anlage kleiner ausgelegt werden und die benötigte Pumpenleistung wird verringert. Nach Chen et al. sind Fluide mit hoher Dichte, niedriger Wärmekapazität und hoher latenter Wärme zu bevorzugen, da sie eine höhere Turbinenleistung erzeugen (Chen, Goswami, & Stefanakos, 2010).

Des Weiteren muss auch auf den kritischen Punkt geachtet werden. Dieser sollte über der Kondensationstemperatur liegen. Aber falls man den Prozess überkritisch betreiben möchte, sollte er auch nicht zu hoch liegen, da sonst zu viel Leistung durch die Pumpe verloren geht.

Doch nicht nur hohe Temperaturen müssen berücksichtigt werden: Auch die niedrigen Temperaturen des Kreislaufs bzw. die Umgebungstemperaturen haben einen großen Einfluss auf die Auswahl. Sind diese zu niedrig, das heißt, sinken die Temperatur des Mediums unter den Schmelzpunkt/Erstarrungspunkt, besteht die Gefahr, dass sich das Medium verfestigt und so die Anlage Schaden nimmt.

Die bisherigen Anwendungsgebiete von ORC Anlagen lagen in niedrigen bis mittelhohen Temperaturbereichen. Mittlerweile werden aber auch Anlagen für höhere Temperaturen, z.B. durch Biomasseverbrennung, erforscht und betrieben. Für diese müssen aber wieder andere Medien verwendet werden, da die hier auftretenden Höchsttemperaturen meist schon über dem Flammpunkt des Fluids liegen und somit bei einem Austritt die Gefahr des Entzündens besteht.

Ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium ist das Verhalten des Mediums bei Verwendung über einen längeren Zeitraum, die thermische Stabilität. Denn organische Fluide altern und bauen bei hohen Temperaturen schneller ab. Somit ist die maximale Prozesstemperatur durch das Medium vorgegeben. Bei neuesten Studien wurde festgestellt, dass bei den meisten Medien schon nach wenigen Tagen eine geringe Konzentration von ersten Abbauprodukten zu finden war, sich diese

aber, vor allem bei n-Pentan (Abbildung 11), Toluol und Benzol nur langsam erhöhte (Andersen, 2005). Auch sollte das Fluid nicht korrosiv und Materialverträglich sein.

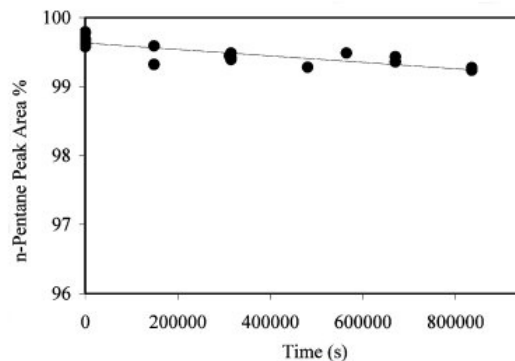


Abbildung 11: Abbau von n-Pentan bei 315°C (Andersen, 2005)

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Auswahl von organischen Medien ist die Sicherheit. Da einige der verwendeten Medien entflammbar sind, muss der entsprechende Flammpunkt möglichst weit über der Höchsttemperatur des ORC Prozesses liegen. Zusätzlich sollen sie bei einem möglichen Austritt keine Gefahr für Menschen und Umwelt darstellen, das heißt, es sollte eine Rückhaltung des Mediums gesichert sein. Betreiber und Entwickler von ORC Anlagen müssen dabei immer auf das Treibhauspotential (GWP, Global Warming Potential) und das Ozonabbaupotential (ODP, Ozone Depletion Potential) achten. Beschränkt wird die Auswahl durch das Montreal Protokoll, ein internationales Abkommen, und einer Verordnung des Europäischen Parlaments, der EU Verordnung Nr. 1005/2009 (Europäisches Parlament, 2009).

Kosten und Verfügbarkeit des Fluids sind nicht zu Vernachlässigen. Traditionell in ORC – Anlagen verwendete Kältemittel sind teuer. Diese Kosten könnten durch eine größere Produktion dieser Fluide oder durch die Verwendung von billigen Kohlenwasserstoffen verringert werden (Chen, Goswami, & Stefanakos, 2010).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die wichtigsten Kriterien für die Auswahl des richtigen ORC Mediums jene sind:

- Thermodynamische Eigenschaften
- Sicherheitsaspekte
- thermische Stabilität
- Materialverträglichkeit
- Kosten
- Verfügbarkeit

2.3.3 ORC Medien

In diesem Kapitel werden die für ORC Anlagen in Frage kommenden (Saleh, Koglbauer, Wendland, & Fischer, 2007) und in dieser Arbeit vorkommenden Medien vorgestellt und beschrieben. Alle Daten sind, falls nicht anders angegeben, aus der NIST Refprop9.

- n-Pentan (C_5H_{12})

N-Pentan zählt zu den Alkanen und ist eine farblose, sehr flüchtige, wasserunlösliche, geruchlose Flüssigkeit. Sie ist leicht entzündlich und brennt mit stark rußender Flamme. Dämpfe sind viel schwerer als Luft und bilden damit ein explosionsfähiges Gemisch. n-Pentan ist ein Hauptbestandteil von Benzin. Es ist leicht mit Alkoholen und anderen organischen Lösungsmitteln mischbar, mixt sich aber sehr schlecht mit Wasser. Gewonnen wird es aus der Leichtbenzinfraction des Erdöls (Dauderer, 1988).

Wichtige physikalische Daten: Schmelzpunkt: $-129,75 \text{ }^\circ\text{C}$ (VDI, 1997)
Siedepunkt: $309,21\text{K}$
krit. Temperatur: $469,7\text{K}$
krit. Druck: 3370 kPa

- Isopentan ($(CH_3)_2CHCH_2CH_3$)

Dieses auch unter Methylbutan bekannte Alkan ist hochentzündlich, bildet ein explosionsfähiges Gemisch und ist durch einen Benzinähnlichen Geruch wahrnehmbar (Dauderer, 1988).

Wichtige physikalische Daten: Schmelzpunkt: 160°C (VDI, 1997)
Siedepunkt: $300,98\text{K}$
krit. Temperatur: $460,35\text{K}$
krit. Druck: 3378 kPa

-
- Neopentan (C₅H₁₂)

Der wissenschaftliche Name ist 2,2-Dimethylpropan. Dieses Alkan ist farblos und ebenfalls hochentzündlich (National Center for Biotechnology Information).

Wichtige physikalische Daten: Schmelzpunkt: -16,6°C (IFA, 2014)
 Siedepunkt: 282,65K
 krit. Temperatur: 433,74K
 krit. Druck: 3196 kPa

- R134a

1,1,1,2-Tetrafluorethan oder auch R134a genannt, ist ein farbloser und schwach etherischer Fluorkohlenwasserstoff. Es ist ein nicht brennbares, geringfügig in Wasser lösliches Gas, welches schwerer als Luft ist. Daher besteht bei hohen Konzentrationen Erstickungsgefahr. Das Kältemittel findet vor allem in Klimaanlage als FCKW Ersatz Anwendung. Aufgrund seines hohen GWP's darf es aber in der EU nicht mehr für den Einsatz in Neuwagen verwendet werden.

Wichtige physikalische Daten: Schmelzpunkt: -101 °C (IFA, 2014)
 Siedepunkt: 247,076K
 krit. Temperatur: 374,21K
 krit. Druck: 4059,28 kPa

- R227ea

Das farblose und etherische Heptafluorpropan gehört ebenfalls zu den Fluorkohlenwasserstoffen. Das nicht brennbare Gas ist schwerer als Luft, dadurch droht auch hier bei zu hoher Konzentration Erstickungsgefahr.

Wichtige physikalische Daten: Schmelzpunkt: -131 °C (IFA, 2014)
 Siedepunkt: 256,81K
 krit. Temperatur: 374,9K
 krit. Druck: 2925 kPa

-
- Toluol (C₇H₈)

Ist ein aromatischer Kohlenwasserstoff, der auch unter Toluol oder Methylbenzen bekannt ist. Er ist farblos, hat einen stechenden Geruch, ist sehr leicht entzündlich und wird hauptsächlich aus Erdöl gewonnen. Seine Verwendung ist breitgefächert, denn es ist Ausgangsprodukt für viele andere Verbindungen, wie Sprengstoffe (z.B. TNT), Benzol oder Farbstoffe. Toluol wird von Menschen ständig eingeatmet, da es als Bestandteil von Benzin immer in nachweisbaren Mengen in der Umgebungsluft zu finden ist (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, 2006).

Wichtige physikalische Daten:

- Schmelzpunkt: -95,15 °C (VDI, 1997)
- Siedepunkt: 383,75K
- krit. Temperatur: 591,75K
- krit. Druck: 4126,3 kPa

- R245fa (C₃H₃F₅)

Pentafluorpropan ist ein organisches Kältemittel mit drei Kohlenstoffatomen. Es ist farb- und geruchlos und bei Umgebungstemperatur und -druck nicht brennbar. Dessen Dämpfe sind schwerer als Luft, daher droht Erstickungsgefahr (PanGas, 2013).

Wichtige physikalische Daten:

- Schmelzpunkt: -138,35°C (Honeywell, 2010)
- Siedepunkt: 288,29K
- krit. Temperatur: 427,16K
- krit. Druck: 3651 kPa

- Octamethyltrisiloxan MDM

Octamethyltrisiloxan gehört zur Familie der Siloxane, das sind Verbindungen der Elemente Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und Silizium, es sind also organische Siliziumverbindungen. Diese werden vor allem in der Kosmetikindustrie eingesetzt. Octamethyltrisiloxan ist eine viskose, transparente Flüssigkeit, deren Dämpfe mit Luft ein explosives Gemisch bilden (Umweltbundesamt, 2014).

Wichtige physikalische Daten:

- Schmelzpunkt: -82°C (Sigma-Aldrich, 2012)
- Siedepunkt: 425,66K
- krit. Temperatur: 564,09K
- krit. Druck: 1415 kPa

3. ORC – Kreislauf Modellierung

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine kurze Beschreibung und Erklärung der verwendeten Software, IPSEpro v5. Dies ist ein, von der SimTech GmbH, mit Sitz in Graz, entwickeltes Modellierungs- und Simulationsprogramm.

3.1 IPSEpro

IPSEpro ist eine flexible und umfangreiche Software zur Modellierung und Analyse von Prozessen in der Energie- und Verfahrenstechnik. Es kann aber auch in anderen Bereichen angewendet werden. Unter Verwendung verschiedener Komponenten bildet man auf einer grafischen Benutzeroberfläche den zu berechnenden Prozessablauf ab. Diese Komponenten werden in Modell-Bibliotheken zur Verfügung gestellt, welche der Anwender nach seinen Anforderungen verändern kann. Er kann aber auch neue, eigene Bibliotheken gestalten. Der entworfene Prozess ist dann das Gleichungssystem, das unter Eingabe der Prozessparameter gelöst wird. Aufgrund der grafischen Benutzeroberfläche und der nicht vordefinierten Prozesse kann jedes vom Anwender gewollte Prozessschema berechnet werden. Die gebräuchlichsten Module sind (SimTech, 2011):

- Model Development Kit (MDK)
- Process Simulation Environment (PSE)
- PSEasy
- PSServer
- PSXLink
- PSOptimize
- PSValidate
- PSEconomy

In Abbildung 12 sind die Systemarchitektur von IPSEpro und die Interaktion der Pakete untereinander dargestellt. Die in dieser Arbeit verwendeten Programm-Module sind PSE und MDK, daher werden sie hier noch etwas genauer beschrieben.

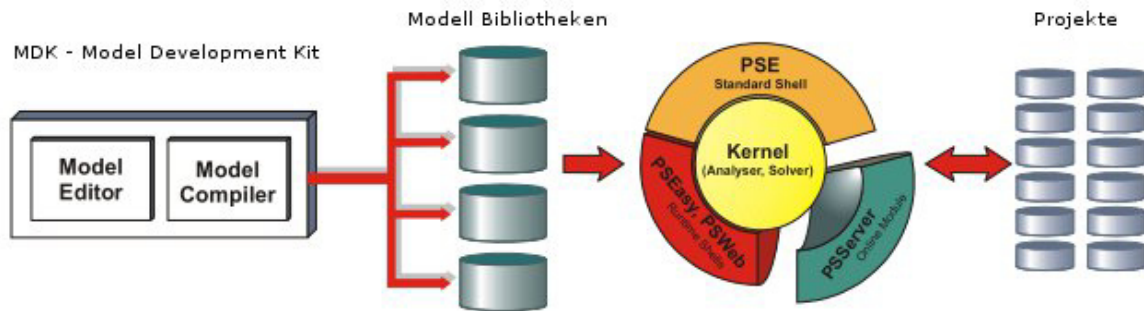


Abbildung 12: Die Systemarchitektur von IPSEpro (SimTech, 2011)

3.1.1 Process Simulation Environment (PSE)

Die Prozess Simulation Environment (PSE) ist jene Umgebung, in der man den Prozess modelliert und auf Basis der Komponenten einer Bibliothek berechnet. PSE bietet einen sogenannten grafischen Flowsheet Editor, in dem man sich die benötigten Komponenten per Menü auswählt und zum gewünschten Prozess zusammenfügt. Alle Prozessparameter werden direkt im Projekt – Fenster eingegeben, in dem auch die berechneten Resultate am Ende der Simulation ausgegeben werden. Zusätzlich erstellt PSE für jede Berechnung Protokolle (SimTech, 2011).

3.1.2 Model Development Kit (MDK)

Das Model Development Kit (MDK) ist für den Aufbau neuer Komponentenmodelle oder die Änderung bestehender. Man kann damit genau jene Komponenten und Modellbibliotheken entwerfen, die den Anforderungen des zu berechnenden Prozesses entsprechen und anschließend in die Form bringen, die für PSE erforderlich ist. Es besteht aus folgenden zwei Elementen:

- Model Editor
- Model Compiler

Im Model Editor können die einzelnen Komponentenmodelle grafisch dargestellt und mathematisch beschrieben werden. Nach der erfolgreichen Kompilierung können die nun entworfenen Komponenten in der PSE für das Prozessschema verwendet werden (SimTech, 2011).

3.1.3 Verwendete Bibliotheken

Für diese Arbeit wurden zwei Bibliotheken verwendet:

- Advanced Power Plant Library (APPLib)

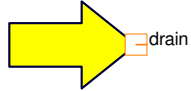

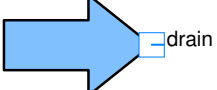
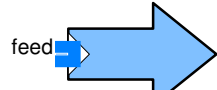
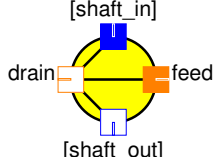
Diese Bibliothek wurde entwickelt, um mit einer großen Auswahl von thermischen Systemen arbeiten zu können. Mit ihr kann man viele verschiedene Kraftwerksprozesse simulieren, unter anderem GuD-Prozesse, Kraft-Wärme-Kopplungen und konventionelle Kraftwerke (SimTech, 2011).

- Low Temperature Process Library (LTPLib)

Die LTPLib wurde für die Simulation und Analyse von Niedrig-Temperatur Energieumwandlungsprozessen entwickelt. Im Speziellen sind dies der Organic Rankine Cycle sowie der Kalina Cycle (SimTech, 2011).

3.1.4 Verwendete Komponenten

Bevor hier auf die einzelnen Prozesse genauer eingegangen wird, sollen zuerst die in IPSEpro verwendeten Komponentenmodelle erklärt werden. Für einen ORC Prozess sind dies folgende:

Wärmequelle	
Wärmesenke	
Kühlwasserquelle	
Kühlwassersenke	
Pumpe	

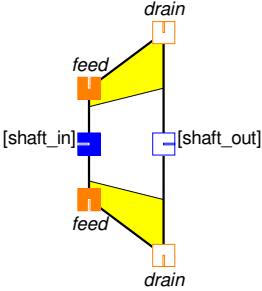
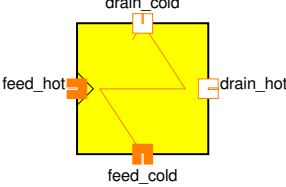
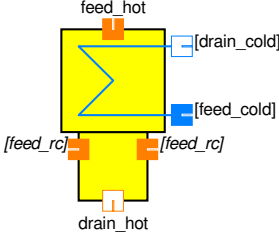
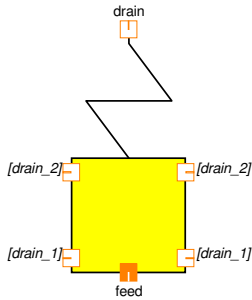

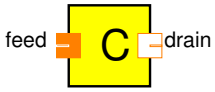

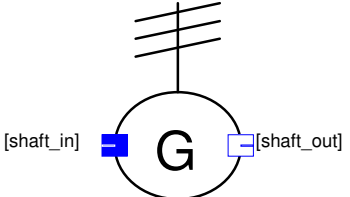
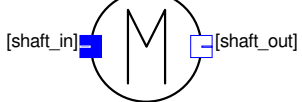
<p>Turbine</p>	
<p>Wärmetauscher</p>	
<p>Kondensator</p>	
<p>Kessel</p>	
<p>Dampfanteil Einstellung und Berechnung</p>	
<p>Connector Anschlusselement, dass die redundante Massenbilanzgleichung aus geschlossenen Kreisläufen mit organischen Arbeitsmedien entfernt.</p>	
<p>Ventil</p>	
<p>Generator</p>	
<p>Motor</p>	

Abbildung 13: verwendete Komponenten aus der Low Temperature Process Library (SimTech, 2011)

4. NIST

Das National Institute of Standards and Technology ist eine Behörde des U.S. Department of Commerce (Handelsministeriums). „NIST hat den Auftrag US Innovationen und Wettbewerbsfähigkeit durch Förderung von Messtechnik, Standards und Technologien voranzubringen, und zwar in der Art und Weise, dass die wirtschaftliche Sicherheit und unsere Lebensqualität verbessert werden.“ (NIST, www.nist.gov, 2014)

Das NIST stellt eine Datensammlung zur Verfügung, aus der physikalische und chemische Stoffdaten abgerufen werden können. Diese NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database in der Version 9 oder kurz „RefProp 9“ enthält keine Sammlung von Messungen, sondern berechnet mit Hilfe genauester Gleichungen den gesuchten Zustand des Fluids (NIST, Standard Reference Database, 2010).

4.1 Vergleich der Datenbanken

Die vorhandene und von IPSEpro v5 verwendete Datenbank, wurde aus Berechnungen von Lemmon und Span (Neopentan, Isopentan und Toluol) bzw. Span und Wagner (Pentan) erstellt (SimTech, 2011). MDM basiert auf einem intern entwickelten Code, bei dem die Zustandsgrößen durch eine sogenannte kubische Zustandsgleichung (cubic equation of state) mit einem Ansatz von Peng – Robinson berechnet werden. Auch R245fa ist eine Eigenentwicklung der SimTech GmbH. Die Ansätze für die Stoffdatenfunktion stammen aus der NIST Refprop v6 (1998), es wurden aber die numerischen Lösungsverfahren überarbeitet. Die Zustandsgleichung für R245fa basieren auf einer Arbeit von M.L. Huber und J.F. Ely (Huber & Ely, 1994).

Da diese vorhandene Datenbank nur wenige für einen ORC Prozess relevanten Stoffdaten enthielt wurde sie erweitert. Dazu wurde ein Stoffdatenbank – Prototyp, auf Basis der NIST RefProp 9, in IPSEpro v5 integriert. Um etwaige Unterschiede in den Stoffwerten zu finden, wurde die vorhandene Datenbank mit der NIST – RefProp9 verglichen. Hierzu erfolgte die Simulation einer einfachen Expansion in einer einstufigen Turbine. Der Aufbau ist in Abbildung 14 zu sehen.

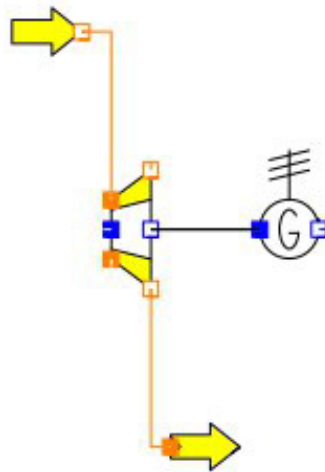


Abbildung 14: Expansion in einer einfachen Turbinenstufe (IPSEpro)

Die Simulation wurde mit den Fluiden Pentan, Isopentan, Neopentan, MDM, R245fa und Toluol durchlaufen.

Ein großer Unterschied zwischen den Datenbanken sind die Gültigkeitsbereiche der einzelnen Fluide. Während die Temperaturbereiche für alle ähnlich sind, kann man in der neueren NIST – RefProp einen großen Anstieg des definierten Druckbereichs erkennen. Diese Erhöhung ist aber für die praktische Anwendung der Medien irrelevant. Einzig MDM wies einen relativ geringen p_{max} , der nur knapp über p_{krit} liegt, auf.

Gültigkeitsbereich MDM:

	p_{max} [bar]	T_{max} [K]
ALT	20	564,4
NIST	300	673

Tabelle 1: Gültigkeitsbereich MDM

Gültigkeitsbereich Pentan:

	p_{max} [bar]	T_{max} [K]
ALT	1000	573,15
NIST	1000	600

Tabelle 2: Gültigkeitsbereich Pentan

Gültigkeitsbereich Neopentan:

	p_{\max} [bar]	T_{\max} [K]
ALT	1000	550
NIST	2000	550

Tabelle 3: Gültigkeitsbereich Neopentan

Gültigkeitsbereich Isopentan:

	p_{\max} [bar]	T_{\max} [K]
ALT	1000	500
NIST	10000	500

Tabelle 4: Gültigkeitsbereich Isopentan

Gültigkeitsbereich R245fa:

	p_{\max} [bar]	T_{\max} [K]
ALT	600	500
NIST	2000	440

Tabelle 5: Gültigkeitsbereich R245fa

Gültigkeitsbereich Toluol:

	p_{\max} [bar]	T_{\max} [K]
ALT	1000	702
NIST	5000	700

Tabelle 6: Gültigkeitsbereich Toluol

MDM	Δh [kJ/kg]	p[bar]			
	T[°C]	5	10	15	20
	0	0,4410697	0,884759	1,33209896	1,77849517
	10	0,44170963	0,89424546	1,34413655	1,778475
	20	0,4417125	0,89764275	1,35275441	1,80436323
	30	0,44896497	0,90528864	1,36474361	1,80435
	40	0,448965	0,91293862	1,37398614	1,83319155
	50	0,45721274	0,92422708	1,386871	1,833225
	60	0,457215	0,93060651	1,40046618	1,86774899
	70	0,46606363	0,94029735	1,41390313	1,867725
	80	0,466065	0,95081854	1,42955637	1,90710849
	90	0,61575458	1,09616761	1,57565637	2,05424869
	100	1,10928642	1,58903778	2,06790001	2,54589805
	110	1,95146895	2,42994235	2,90760047	3,38446164
	120	3,13616036	3,6125807	4,08831537	4,56337001
	130	4,66044754	5,13385509	5,60677006	6,07919279
	140	6,52167345	6,99075258	7,45970448	7,92845375
	150	8,717777	9,18071844	9,64425615	10,1080282
	160	11,2468118	11,7022998	12,15862	12,6157508
	170	14,1093143	14,5541903	14,9999806	15,4483383
	180	17,3066984	17,7365187	18,1692594	18,6068965
	190	20,8408632	21,2497348	21,6721827	22,1042356
	200	24,5122263	24,8967899	25,309017	25,7284143
	210	28,1085765	28,5009791	28,9051439	29,3312693
	220	31,7036675	32,062132	32,4559184	32,8627938
	230	46,6143608	35,5949688	35,9693914	36,3789126
	240	47,8301088	39,1029817	39,4448663	39,8232738
	250	49,0592853	42,6076938	42,8975043	43,2583002
	260	50,2036083	46,1702704	46,3415969	46,6390204
	270	51,388758	56,838447	49,7979286	50,0210352
	280	52,5330539	58,5271079	53,3759813	53,376

Tabelle 8: Enthalpie-Differenz Datenbank Alt, MDM

In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die Enthalpiedifferenzen, die bei der Expansion in der Turbine erreicht werden, in Abhängigkeit von Druck und Eintrittstemperatur des Thermoöls dargestellt. Da die Enthalpie – Nullpunkte aller Fluide unterschiedlich waren, musste die Enthalpiedifferenz berechnet werden, um die Datenbanken vergleichen zu können. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Simulation des Fluids MDM mit den Daten aus der NIST Datenbank dargestellt, in Tabelle 8 jene mit den Daten aus der vorhandenen Datenbank.

In Tabelle 9 wird der Unterschied der Stoffdaten verdeutlicht. Bei niedrigen Temperaturen und Drücken ist der Unterschied noch marginal, steigt aber bis auf knapp über 6,3% an, um danach wieder auf minimale Werte abzufallen.

MDM		p[bar]			
Unterschied	T[°C]	5	10	15	20
Datenbanken	0	0,607%	0,344%	0,442%	0,464%
	10	-0,082%	0,207%	0,143%	-0,735%
	20	-0,082%	-0,636%	-0,435%	-0,501%
	30	-0,926%	-1,032%	-0,791%	-1,747%
	40	-0,925%	-1,459%	-1,381%	-1,409%
	50	-1,676%	-1,519%	-1,736%	-2,711%
	60	-1,675%	-2,159%	-2,076%	-2,136%
	70	-2,449%	-2,477%	-2,471%	-3,508%
	80	-2,449%	-2,753%	-2,750%	-2,765%
	90	1,465%	-0,460%	-1,217%	-1,624%
	100	-0,548%	-1,283%	-1,680%	-1,930%
	110	-3,020%	-3,032%	-3,042%	-3,050%
	120	-4,640%	-4,456%	-4,314%	-4,201%
	130	-5,572%	-5,378%	-5,216%	-5,077%
	140	-6,071%	-5,921%	-5,785%	-5,663%
	150	-6,300%	-6,203%	-6,107%	-6,015%
	160	-6,361%	-6,306%	-6,249%	-6,191%
	170	-6,300%	-6,287%	-6,274%	-6,249%
	180	-6,155%	-6,180%	-6,202%	-6,203%
	190	-5,483%	-5,615%	-5,685%	-5,715%
	200	-4,307%	-4,488%	-4,617%	-4,722%
	210	-3,416%	-3,601%	-3,757%	-3,843%
	220	-2,651%	-2,882%	-3,057%	-3,204%
	230	-0,274%	-2,252%	-2,456%	-2,583%
	240	-0,316%	-1,856%	-1,940%	-2,126%
	250	-0,326%	-1,170%	-1,467%	-1,656%
	260	-0,360%	-0,620%	-1,018%	-1,283%
	270	-0,369%	-0,298%	-0,586%	-0,892%
	280	-0,354%	-0,422%	-0,093%	-0,561%

Tabelle 9: Prozentualer Unterschied der beiden Datenbanken für MDM

Ähnlich verhält es sich mit dem Kältemittel R245fa, wie in Tabelle 10 ersichtlich wird. Hier ist die Differenz schon bei niedrigen Temperaturen hoch, steigt dann noch leicht an und sinkt mit zunehmender Temperatur wieder. Auffallend ist, dass bei hohen Drücken der Unterschied relativ konstant über der Temperatur zu sein scheint.

R245fa	Δh [kJ/kg]	p [bar]				
	T[°C]	10	20	30	40	50
	50	3,202%	3,072%	2,952%	2,841%	2,739%
	60	3,379%	3,270%	3,168%	3,071%	2,981%
	70	3,527%	3,435%	3,348%	3,265%	3,186%
	80	3,643%	3,566%	3,492%	3,422%	3,354%
	90	1,814%	3,664%	3,602%	3,543%	3,485%
	100	1,461%	3,728%	3,678%	3,629%	3,581%
	110	1,233%	3,758%	3,719%	3,681%	3,643%
	120	1,072%	3,752%	3,726%	3,699%	3,672%
	130	0,950%	1,848%	3,696%	3,684%	3,669%
	140	0,849%	1,491%	3,616%	3,633%	3,634%
	150	0,761%	1,254%	2,171%	3,533%	3,569%
	160	0,680%	1,064%	1,676%	2,742%	3,480%

Tabelle 10: Prozentualer Unterschied der beiden Datenbanken für R245fa

Bei den anderen Medien sind die Stoffdaten sehr ähnlich oder ident, wie in Tabelle 11 am Beispiel von 200°C Turbineneintrittstemperatur dargestellt wird.

		Datenbank Alt	NIST	Differenz
Pentan	Δh Turbine	3486,9 [kJ/kg]	3486,95 [kJ/kg]	0,0014%
Toluol	Δh Turbine	146,23 [kJ/kg]	146,23 [kJ/kg]	0,000%
Isopentan	Δh Turbine	3547,95 [kJ/kg]	3547,92 [kJ/kg]	0,0008%
Neopentan	Δh Turbine	480,29 [kJ/kg]	480,3 [kJ/kg]	0,002%

Tabelle 11: Vergleich der Enthalpiedifferenzen von Pentan, Toluol, Isopentan und Neopentan

Wie man erkennt, gibt es vor allem bei den Stoffdaten der Eigenentwicklungen MDM und R245fa Unterschiede zum Stoffdatenbank – Prototyp Refprop v9. MDM wurde für die NIST Refprop v9 aus einer neuen Arbeit von Colonna, Nannan & Guardone entwickelt, die Verbesserungen durch die neu entwickelten Zustandsgleichungen sind signifikant (Colonna, Nannan, Guardone, & Lemmon, 2006). Die Zustandsgleichungen für R245fa basieren für die NIST Refprop v9 auf einer Arbeit von Lemmon & Span (Lemmon & Span, 2006).

5. Simulationen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Simulationen und Ergebnisse, unter Verwendung der Stoffdaten der NIST Refprop v9, genauer analysiert. Dabei in Betracht gezogen wurden Pentan, Toluol und MDM. Dies sind jene Medien, die aufgrund ihrer speziell für solarthermische- und Biomasseanlagen relevanten Temperaturbereiche und ihrer weiten Verbreitung, in Betracht gezogen werden. Es gibt natürlich eine viel größere Anzahl an Fluiden die für ORC Prozesse in Betracht kommen. Verglichen werden auch die Unterschiede der Kreisläufe mit und ohne Rekuperator und die daraus resultierende Auswirkungen auf den thermischen Wirkungsgrad.

Der simulierte Bereich liegt im Gültigkeitsbereich der Datenbank der Medien, der Maximaldruck wird aber mit 100 bar beschränkt. Dies ist zwar ein Druck der von heutigen sich in Betrieb befindlichen Anlagen nicht erreicht wird, grundsätzlich aber technisch möglich ist.

Einige Kriterien wurden für die ORC Prozesse angenommen, um die Medien miteinander vergleichen zu können. Die Kondensationstemperatur T_{Kond} wurde mit 100°C festgelegt, um die größtmögliche elektrische Leistung zu erzielen und zusätzlich als unterstützende Wärmequelle für ein Fernwärmenetz zu dienen. Die Temperatur der Wärmesenke, also der Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes, wurde als konstant angenommen, obwohl sie leicht variabel ist. Der Pinch Point im Rekuperator wurde mit 5°C angenommen. Die maximale berechnete ORC Prozesstemperatur ist abhängig vom jeweiligen Fluid und reicht bis zu 425°C. Weitere Einstellungen sind der Turbinenwirkungsgrad η_{Turbine} mit 80%, der Speisewasserpumpenwirkungsgrad η_{Pumpe} mit 70% und ein Massendurchfluss des Fluids im ORC Kreislaufs von 50 kg/s.

In Abbildung 15 und Abbildung 16 ist der jeweilige Aufbau des Kreislaufes in IPSEpro dargestellt. Wie man sieht, besteht er aus einer Pumpe mit Motor, einem Verdampfer, einem Connector, einer Turbine mit Generator und einem Kondensator mit Kühlwasserkreislauf. Der Kreislauf in Abbildung 16 besitzt zusätzlich noch einen Rekuperator.

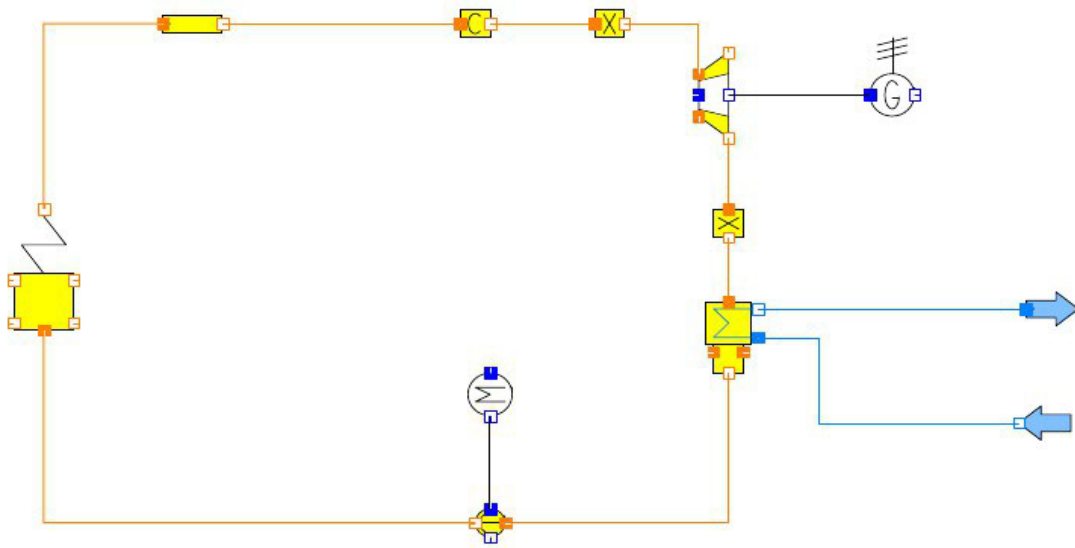


Abbildung 15: ORC Prozess ohne Rekuperator (IPSEpro)

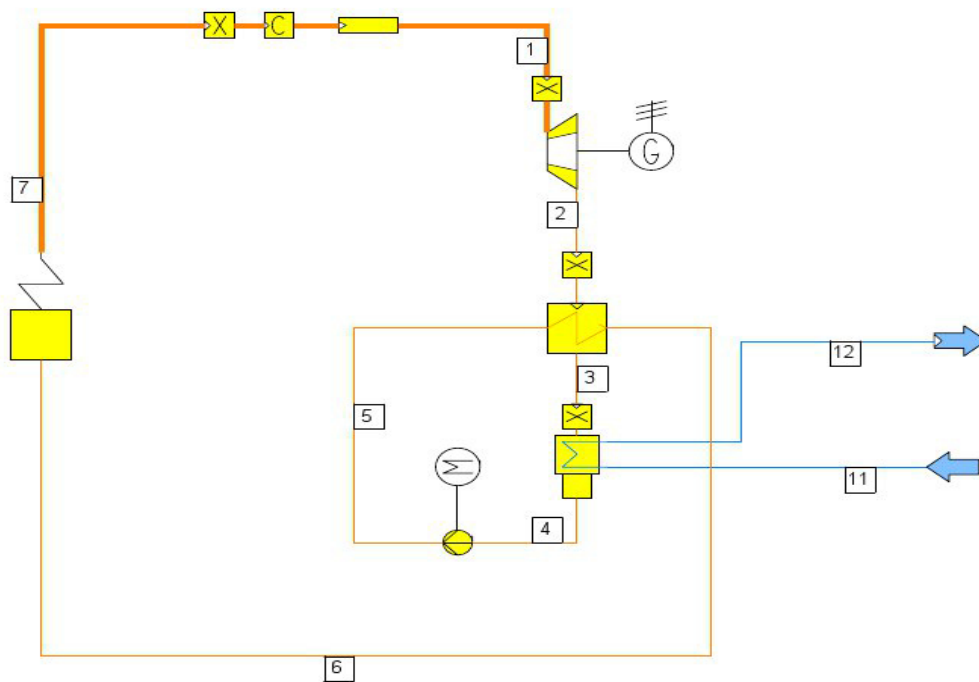


Abbildung 16: ORC Prozess mit Rekuperator (IPSEpro)

5.1 N-Pentan

N-Pentan ist ein in ORC Anlagen häufig verwendetes organisches Fluid. Es hat im Vergleich zu den anderen beiden Medien die niedrigste kritische Temperatur T_{Krit} mit 196,45 °C, aber einen relativ hohen kritischen Druck p_{krit} von 33,7 bar. Aufgrund des Gültigkeitsbereichs der Datenbank wird die Temperatur mit 325°C begrenzt.

5.1.1 Ohne Rekuperator

In Tabelle 12 und Tabelle 13 wird als Ergebnis der Simulation der thermische Wirkungsgrad η_{th} über Turbineneintrittsdruck p und -temperatur T dargestellt. Die Abstufung des Druckes erfolgt in 5 bar Schritten von 10 bis 100 bar. Hier wird erst mit einem Frischdampfdruck ab 10 bar gerechnet, da n-Pentan bei der angenommenen Kondensationstemperatur von 100°C einen Druck von 6,1 bar aufweist.

Des Weiteren wird beschrieben, ob der Druck unter- oder überkritisch ist. Bei überkritischen Drücken wird zusätzlich noch die prozentuale Überschreitung angezeigt. Für die Temperatur erfolgt die Unterteilung in 10°C Schritten von 125°C bis 325°C.

Ergebnisse für niedrige Temperaturen werden nicht angezeigt, da eine Turbineneintrittstemperatur unter der Verdampfungstemperatur nicht sinnvoll ist und daher nicht untersucht wurde.

	p[bar]	sub	sub	sub	sub	sub	sub	4%	16%	25%	33%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T[$^{\circ}\text{C}$]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-71,55	125	-	3,551%	-	-	-	-	-	-	-	-
-61,55	135	-	3,496%	-	-	-	-	-	-	-	-
-51,55	145	-	3,439%	-	-	-	-	-	-	-	-
-41,55	155	-	3,381%	5,959%	-	-	-	-	-	-	-
-31,55	165	-	3,324%	5,885%	7,391%	-	-	-	-	-	-
-21,55	175	-	3,267%	5,806%	7,346%	-	-	-	-	-	-
-11,55	185	-	3,211%	5,724%	7,278%	8,259%	-	-	-	-	-
-1,55	195	-	3,157%	5,641%	7,200%	8,227%	8,840%	-	-	-	-
8,45	205	--	3,105%	5,558%	7,115%	8,167%	8,867%	9,210%	-	-	-
18,45	215	-	3,053%	5,476%	7,027%	8,093%	8,836%	9,314%	9,478%	-	-
28,45	225	-	3,004%	5,395%	6,937%	8,011%	8,779%	9,316%	9,645%	9,726%	9,509%
38,45	235	-	2,956%	5,316%	6,847%	7,924%	8,708%	9,279%	9,675%	9,907%	9,962%
48,45	245	-	2,910%	5,239%	6,758%	7,835%	8,629%	9,221%	9,656%	9,956%	10,129%
58,45	255	-	2,865%	5,164%	6,670%	7,745%	8,545%	9,151%	9,611%	9,950%	10,184%
68,45	265	-	2,822%	5,091%	6,583%	7,654%	8,457%	9,074%	9,551%	9,916%	10,187%
78,45	275	-	2,780%	5,020%	6,498%	7,564%	8,368%	8,992%	9,481%	9,864%	10,160%
88,45	285	-	2,740%	4,951%	6,415%	7,474%	8,279%	8,907%	9,404%	9,801%	10,116%
98,45	295	-	2,701%	4,884%	6,333%	7,386%	8,189%	8,820%	9,324%	9,731%	10,058%
108,45	305	-	2,663%	4,819%	6,254%	7,299%	8,100%	8,732%	9,241%	9,655%	9,993%
118,45	315	-	2,627%	4,755%	6,176%	7,214%	8,012%	8,645%	9,157%	9,576%	9,922%
128,45	325	-	2,540%	4,694%	6,101%	7,131%	7,925%	8,557%	9,071%	9,495%	9,846%

Tabelle 12: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, Pentan NIST, ohne Rekuperator

	p[bar]	39%	44%	48%	52%	55%	58%	60%	63%	65%	66%
ΔT_{krit} [°C]	T [°C]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-71,55	125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-61,55	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-51,55	145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-41,55	155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-31,55	165	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-21,55	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11,55	185	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-1,55	195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8,45	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18,45	215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28,45	225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38,45	235	9,850%	9,680%	9,513%	9,356%	9,203%	-	-	-	-	-
48,45	245	10,177%	10,124%	10,020%	9,902%	9,781%	9,660%	9,538%	9,415%	9,292%	9,167%
58,45	255	10,321%	10,371%	10,351%	10,290%	10,210%	10,120%	10,026%	9,929%	9,828%	9,726%
68,45	265	10,376%	10,491%	10,542%	10,543%	10,511%	10,459%	10,395%	10,323%	10,246%	10,166%
78,45	275	10,383%	10,540%	10,641%	10,694%	10,708%	10,695%	10,663%	10,619%	10,566%	10,507%
88,45	285	10,361%	10,548%	10,683%	10,774%	10,827%	10,850%	10,850%	10,834%	10,805%	10,767%
98,45	295	10,321%	10,528%	10,689%	10,807%	10,891%	10,944%	10,973%	10,982%	10,977%	10,960%
108,45	305	10,269%	10,492%	10,670%	10,810%	10,917%	10,994%	11,047%	11,080%	11,096%	11,099%
118,45	315	10,207%	10,443%	10,636%	10,792%	10,916%	11,012%	11,085%	11,137%	11,172%	11,193%
128,45	325	10,140%	10,385%	10,589%	10,758%	10,896%	11,008%	11,097%	11,165%	11,216%	11,253%

Tabelle 13: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, Pentan NIST, ohne Rekuperator

Der maximal erreichbare Wirkungsgrad liegt bei 100 bar, 325°C und beträgt 11,253%. Dieser Druck wird aber, wie oben schon erwähnt, im Betrieb bisher nicht erreicht. Wenn man den Verlauf des Wirkungsgrads genauer betrachtet, erkennt man, dass er für niedrige Temperaturen mit steigendem Druck nach kurzem Anstieg wieder stark abnimmt, während er für hohe Temperaturen immer weiter zunimmt (siehe Abbildung 17).

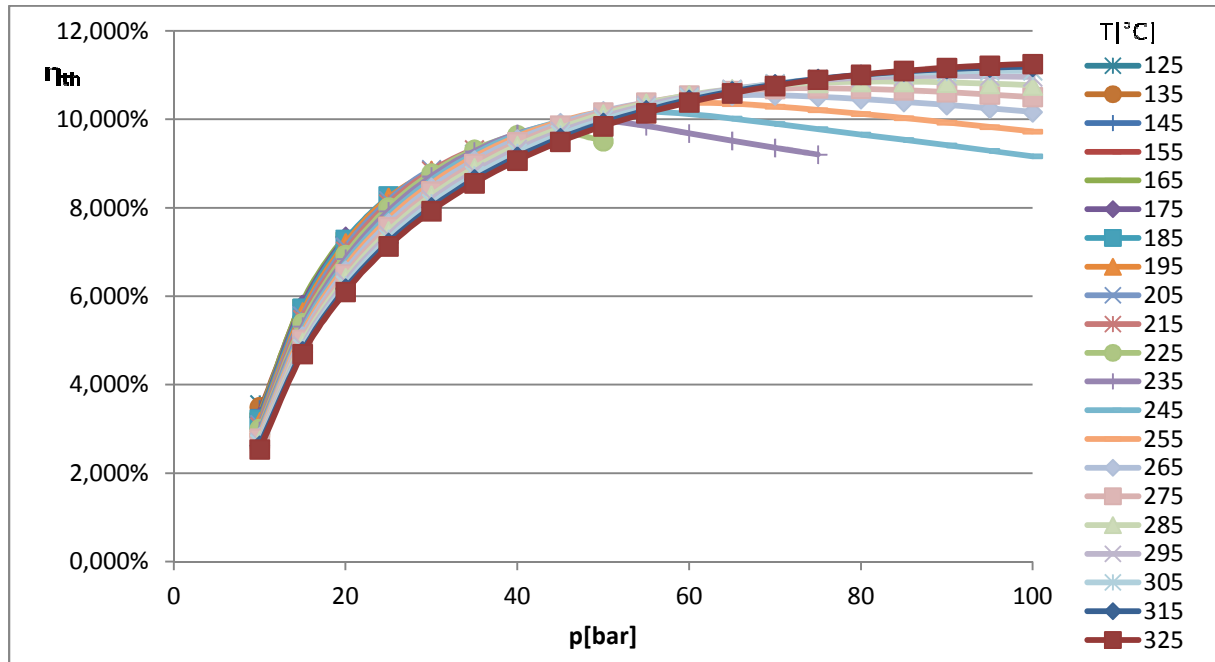


Abbildung 17: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Pentan, ohne Rekuperator

Diese Abnahme liegt daran, dass der hohe Druck nur mehr unter sehr großem Aufwand erreicht werden kann, das heißt dass sehr viel in die Pumpenarbeit investiert werden muss. Dem gegenüber steht die Expansion in der Turbine und der daraus resultierenden Leistung des Generators, der im Gegensatz dazu nur minimal gesteigert wird. Betrachtet man beispielsweise die Temperatur von 245°C: Der Wirkungsgrad steigt rasch auf sein Maximum von 10,177% bei 55 bar und sinkt danach wieder langsam auf 9,167% bei 100 bar. Die Pumpenleistung steigt zwischen den beiden Drücken um 646,5 kW während die Leistung Turbine um 31 kW sinkt.

Ein weiterer Grund ist die Abnahme der Enthalpie am Turbineneintritt: Durch die Erhöhung des Drucks bei konstanter Temperatur wird der Betriebspunkt vor der Turbine im T_s – Diagramm nach links verschoben, wodurch die Enthalpie sinkt. Dabei besteht die Gefahr, dass durch zu starke Erhöhung des Drucks, die nachfolgende Expansion in der Turbine durch das Zweiphasengebiet stattfindet. Um dies zu vermeiden sollte der maximale Druck für die jeweilige Temperatur, dargestellt in Tabelle 14, nicht überschritten werden.

Für Pentan ergibt sich eine maximale spezifische Entropie (Abbildung 8) von $s_{\text{max}} = 1,4 \text{ kJ/kgK}$. Mit dieser lässt sich für jede überkritische Temperatur der dazugehörige maximale überkritische Druck $p_{\text{max,über}}$ berechnen. In Tabelle 14 wird dieser Druck für

einige Temperaturen angezeigt. Man sieht, dass er schon für 245°C außerhalb des gewählten Druckbereiches liegt.

T [°C]	$p_{\max, \text{über}}$ [bar]
205	37,05
215	43,38
225	54,24
235	78,62
245	131,36

Tabelle 14: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, Pentan

Wenn man jetzt diese $p_{\max, \text{über}}$ mit den Ergebnissen in Tabelle 12 und Tabelle 13 vergleicht, erkennt man, dass die maximalen überkritischen Drücke immer über den Drücken der maximalen thermischen Wirkungsgrade liegen. Das heißt, dass man mit den Betriebszuständen für den berechneten maximalen thermischen Wirkungsgrad nicht durch das Zweiphasengebiet expandiert und es somit zu keiner möglichen Schädigung der Turbine kommt.

Das gleiche Phänomen, also die Abnahme des Wirkungsgrads nach Erreichen eines Maximums, sieht man bei konstantem Druck und steigender Temperatur (Abbildung 18). Hier liegt der Grund darin, dass die Enthalpiedifferenz im Überhitzer stärker ansteigt, als die Enthalpiedifferenz in der Turbine, da in der Turbine immer auf denselben Druck, den Kondensationsdruck, entspannt wird. In Abbildung 19 wird der unterschiedliche Anstieg der Enthalpien am Beispiel von 20 bar veranschaulicht.

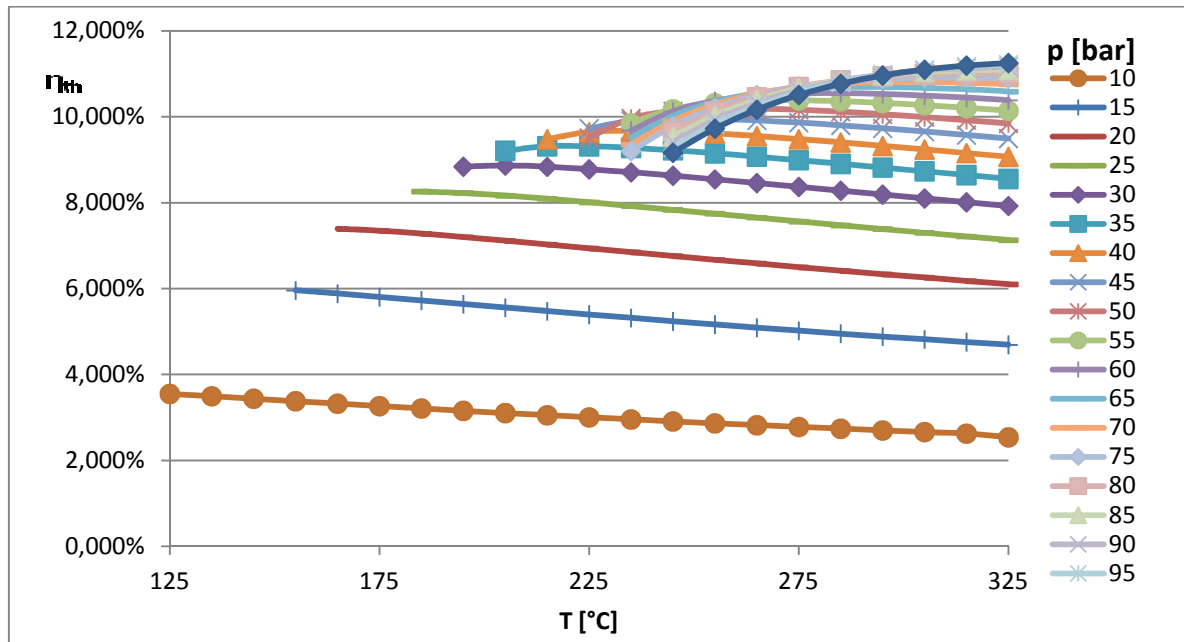


Abbildung 18: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Pentan, ohne Rekuperator

In Abbildung 18 sieht man, dass im unterkritischen Bereich der Wirkungsgrad mit ansteigender Temperatur abnimmt. Des Weiteren fällt auf, dass ab Erreichen des überkritischen Druckes, der Wirkungsgrad mit steigendem Druck und konstanter Temperatur abfällt. Mit ansteigender Temperatur nimmt jedoch auch der Wirkungsgrad bis zum Erreichen eines Maximums wieder stark zu.

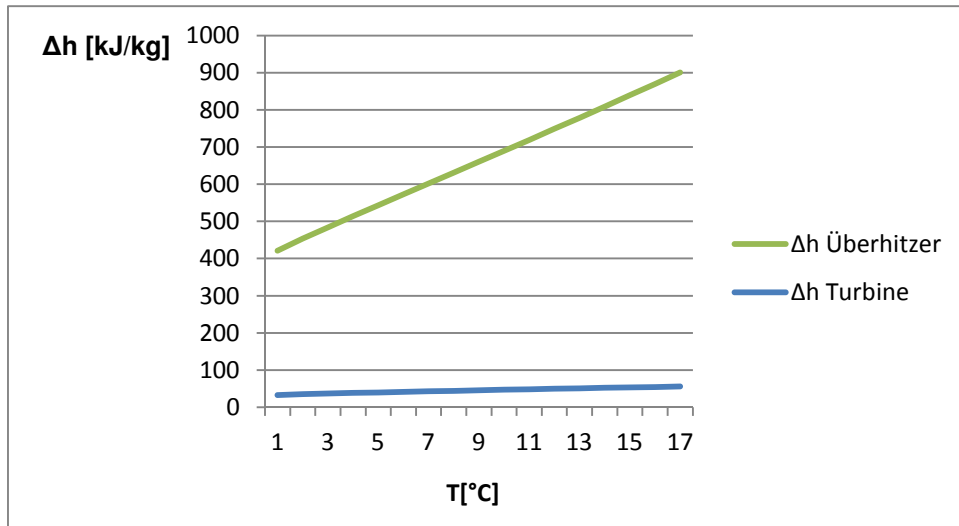


Abbildung 19: Steigung der Enthalpiedifferenzen für 20 bar

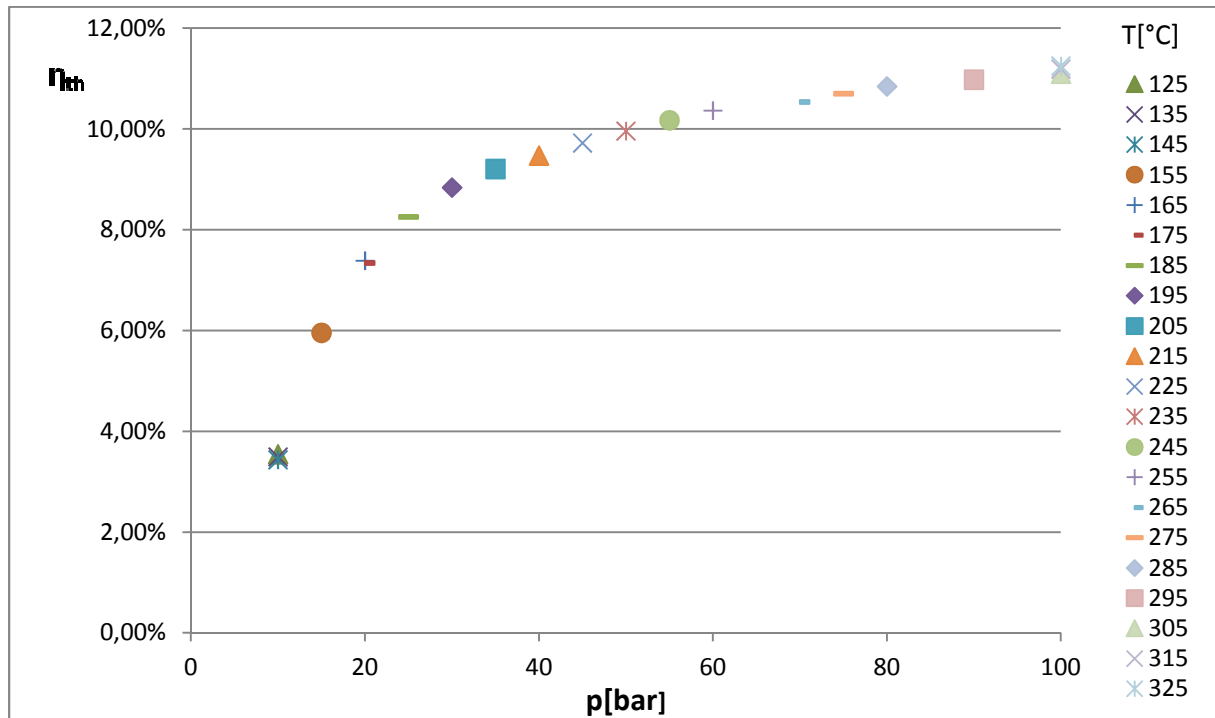


Abbildung 20: optimaler therm. Wirkungsgrad über den berechneten Druckbereich, Pentan, ohne Rekuperator

Man erkennt in Abbildung 17, dass die höchste Temperatur für einen ausgewählten Druck nicht immer den höchsten Wirkungsgrad aufweist. Am Temperaturverlauf für 325°C sieht man, dass der Wirkungsgrad erst ab ca. 85 bar die vorhergehende Temperatur übertrifft. Somit ergibt sich für jeden Druck eine optimale Temperatur bzw. umgekehrt für jede Temperatur der bestmögliche Druck, wie in Abbildung 20 dargestellt.

5.1.2 Mit Rekuperator

In Tabelle 15 und Tabelle 16 werden die Ergebnisse der Simulation eines ORC Prozesses mit Rekuperator für den thermischen Wirkungsgrad η_{th} über Druck p und Temperatur T dargestellt. Die Abstufung des Druckes erfolgt ebenfalls in 5 bar Schritten von 10 bis 100 bar. Es wird gekennzeichnet, ob der Druck unter- oder überkritisch ist und die Überschreitung prozentual angezeigt. Der Temperaturbereich beläuft sich von 125°C bis 325°C. Die Unterteilung erfolgt wiederum in 10°C Schritten. Ebenfalls angeführt wird die Abweichung zur kritischen Temperatur.

Bei 5 bar werden keine Ergebnisse angezeigt, da der Kondensationsdruck von Pentan bei 100°C bei 6,1 bar liegt.

Weiters gibt es keine Ergebnisse für niedrige Temperaturen. Hier erfolgt für die jeweiligen Drücke keine vollständige Verdampfung des Fluids.

	p[bar]	sub	sub	Sub	sub	sub	sub	4%	16%	25%	33%
$\Delta T_{krit}[^{\circ}C]$	T[$^{\circ}C$]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-71,55	125	-	3,614%	-	-	-	-	-	-	-	-
-61,55	135	-	3,810%	-	-	-	-	-	-	-	-
-51,55	145	-	3,995%	-	-	-	-	-	-	-	-
-41,55	155	-	4,170%	6,828%	-	-	-	-	-	-	-
-31,55	165	-	4,338%	7,183%	8,363%	-	-	-	-	-	-
-21,55	175	-	4,500%	7,511%	8,908%	-	-	-	-	-	-
-11,55	185	-	4,657%	7,821%	9,389%	9,979%	-	-	-	-	-
-1,55	195	-	4,810%	8,116%	9,829%	10,633%	10,642%	-	-	-	-
8,45	205	-	4,960%	8,400%	10,232%	11,200%	11,526%	11,087%	-	-	-
18,45	215	-	5,107%	8,673%	10,622%	11,707%	12,220%	12,233%	11,564%	-	-
28,45	225	-	5,251%	8,939%	10,983%	12,182%	12,827%	13,053%	12,875%	12,196%	11,120%
38,45	235	-	5,393%	9,197%	11,341%	12,623%	13,376%	13,744%	13,791%	13,526%	12,941%
48,45	245	-	5,532%	9,449%	11,674%	13,048%	13,889%	14,363%	14,552%	14,494%	14,209%
58,45	255	-	5,670%	9,696%	12,010%	13,449%	14,368%	14,930%	15,224%	15,301%	15,191%
68,45	265	-	5,806%	9,937%	12,322%	13,842%	14,827%	15,462%	15,839%	16,014%	16,023%
78,45	275	-	5,940%	10,175%	12,642%	14,215%	15,264%	15,963%	16,410%	16,663%	16,761%
88,45	285	-	6,073%	10,408%	12,939%	14,584%	15,687%	16,443%	16,948%	17,266%	17,434%
98,45	295	-	6,204%	10,638%	13,245%	14,936%	16,093%	16,900%	17,459%	17,831%	18,059%
108,45	305	-	6,335%	10,864%	13,529%	15,286%	16,490%	17,343%	17,948%	18,369%	18,647%
118,45	315	-	6,464%	11,087%	13,825%	15,621%	16,873%	17,770%	18,418%	18,881%	19,203%
128,45	325	-	6,593%	11,309%	14,099%	15,956%	17,249%	18,186%	18,872%	19,374%	19,735%

Tabelle 15: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, Pentan, mit Rekuperator

	p[bar]	39%	44%	48%	52%	55%	58%	60%	63%	65%	66%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
18,45	215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28,45	225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38,45	235	12,186%	11,555%	11,081%	10,698%	10,369%	-	-	-	-	-
48,45	245	13,730%	13,168%	12,659%	12,238%	11,882%	11,568%	11,284%	11,019%	10,769%	10,531%
58,45	255	14,921%	14,531%	14,093%	13,677%	13,310%	12,986%	12,693%	12,424%	12,172%	11,938%
68,45	265	15,893%	15,650%	15,329%	14,977%	14,632%	14,313%	14,021%	13,752%	13,500%	13,263%
78,45	275	16,732%	16,599%	16,385%	16,118%	15,827%	15,537%	15,259%	14,998%	14,752%	14,522%
88,45	285	17,483%	17,434%	17,307%	17,120%	16,895%	16,650%	16,402%	16,159%	15,925%	15,701%
98,45	295	18,171%	18,190%	18,132%	18,013%	17,850%	17,657%	17,448%	17,234%	17,020%	16,813%
108,45	305	18,812%	18,885%	18,885%	18,824%	18,716%	18,573%	18,406%	18,225%	18,037%	17,847%
118,45	315	19,414%	19,534%	19,582%	19,570%	19,509%	19,412%	19,285%	19,139%	18,981%	18,816%
128,45	325	19,985%	20,147%	20,235%	20,265%	20,246%	20,188%	20,100%	19,987%	19,859%	19,718%

Tabelle 16: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, Pentan mit Rekuperator

Der maximal erreichbare Druck liegt bei 70 bar und 325°C und beträgt 20,265%. Auch hier erkennt man, dass nach Erreichen eines Maximums der Wirkungsgrad mit steigendem Druck wieder abnimmt. Veranschaulicht wird das in Abbildung 21. Zudem ist ersichtlich, dass bei niedrigen Temperaturen der Wirkungsgrad stärker abnimmt. Der Grund für diese Abnahme ist neben der erhöhten Pumpenarbeit, auch die Abnahme der Enthalpie am Turbineneintritt mit steigendem Druck für konstante Temperaturen. Zusätzlich erfolgt die Expansion mit zunehmendem Druck immer näher an die Sattdampfkurve, wodurch der Vorteil eines Rekuperators verloren geht.

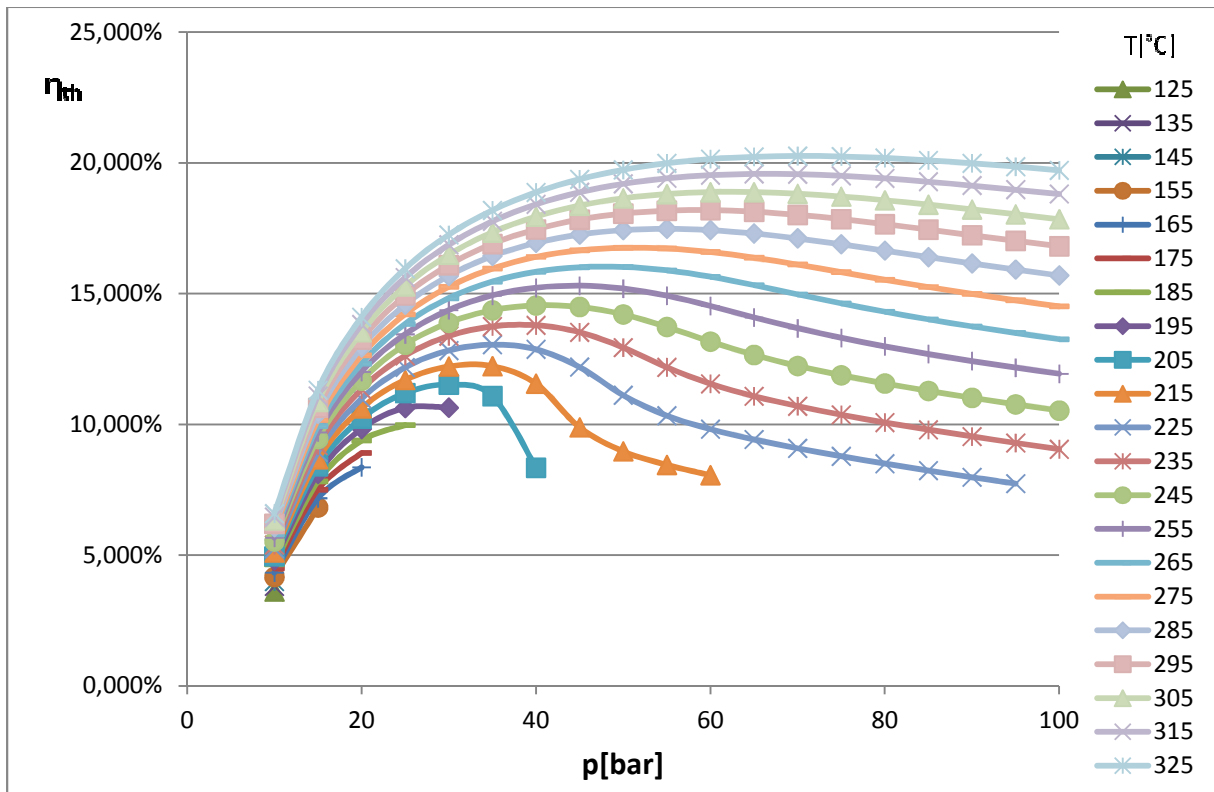


Abbildung 21: thermischer Wirkungsgrad für T = konst. in Abhängigkeit von p, Pentan, mit Rekuperator

In Abbildung 22 sieht man, dass im unterkritischen Bereich der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur ansteigt. Auch hier fällt auf, dass ab Erreichen des überkritischen Druckes, der Wirkungsgrad mit steigendem Druck und konstanter Temperatur abfällt. Mit ansteigender Temperatur nimmt jedoch auch der Wirkungsgrad bis zum Erreichen eines Maximums wieder stark zu (Abbildung 22).

Auch im Prozess mit Rekuperator liegen die Betriebszustände des maximalen thermischen Wirkungsgrads unter $p_{\text{max,über}}$ (Tabelle 14).

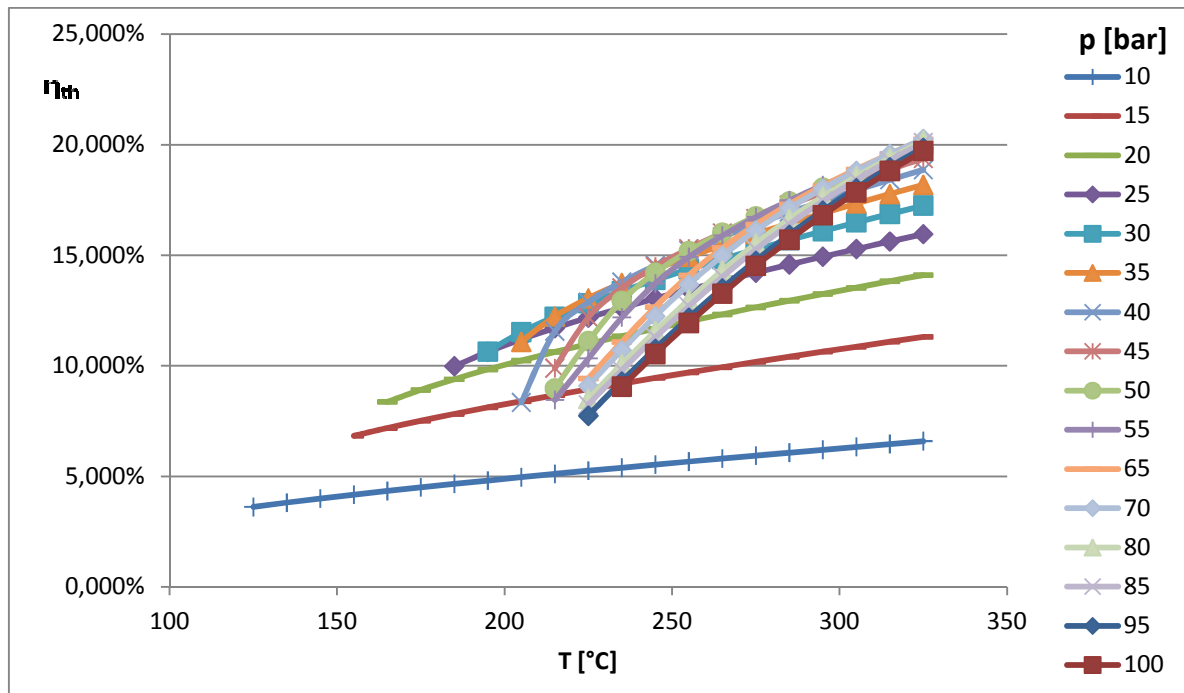


Abbildung 22: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Pentan, mit Rekuperator

5.1.3 Vergleich

Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen der maximale thermische Wirkungsgrad für die gewählten Randbedingungen bei überkritischer Betriebsweise erreicht wird. Sie liegen immer unterhalb des maximalen überkritischen Drucks der jeweiligen Turbineneintrittstemperatur. Durch den Einsatz eines Rekuperators wird der thermische Wirkungsgrad, vor allem im überkritischen Bereich, noch signifikant gesteigert. Während beim Prozess ohne internen Wärmetauscher der maximale Wirkungsgrad bei 100 bar liegt, erreicht man ihn mit Rekuperator schon bei 70 bar. Man erkennt auch, dass mit Rekuperator der maximale Wirkungsgrad über den gesamten Druckbereich immer mit der höchsten Temperatur erreicht wird, also mit 325°C. Ohne Rekuperator muss, um den maximalen Wirkungsgrad zu erzielen, für jeden Druck eine bestimmte Temperatur gewählt werden. Ein weiterer Unterschied ist, dass ohne Rekuperator der thermische Wirkungsgrad für einen konstanten Druck mit zunehmender Temperatur im unterkritischen Bereich sinkt, während er mit Rekuperator zunimmt.

5.2 Toluol

Das nächste berechnete Medium ist Toluol. Auch dieses Fluid ist sehr häufig in ORC Anlagen im Einsatz. Es eignet sich aufgrund seines hohen kritischen Punkts, der bei 41,26 bar und 324,6°C liegt, gut für hohe Temperaturen. Hier befindet sich der Temperaturbereich der Simulation zwischen 105°C und dem Maximum des Gültigkeitsbereichs von 425°C. Die Berechnungsschritte erfolgen alle 10°C. Die Drücke liegen hier zwischen 5 bar und 100 bar und werden in 5 bar Schritten unterteilt. Die prozentuelle Überschreitung des kritischen Drucks wird ebenfalls angezeigt.

5.2.1 Ohne Rekuperator

Der Aufbau der Simulation ist derselbe wie bei Pentan und ist in Abbildung 15 zu sehen. Auch die Einstellungen sind die gleichen wie oben genannt. Die Kondensationstemperatur liegt bei 100°C, der Pumpenwirkungsgrad bei 70%, der Turbinenwirkungsgrad bei 80% und der Massendurchfluss des ORC Prozesses bei 50 kg/s.

Die Ergebnisse für die Berechnung des thermischen Wirkungsgrads werden in Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt. In Abbildung 23 ist der Verlauf des Wirkungsgrads abgebildet. Auch hier werden aufgrund der nicht stattfindenden Verdampfung des Fluids bei niedrigen Temperaturen keine Resultate angezeigt.

Der maximale thermische Wirkungsgrad tritt bei 100 bar und 425°C auf und beträgt 17,251%. Wie man aber in Abbildung 26 erkennen kann, ist der Verlauf über das Druckspektrum relativ konstant, sodass der Wirkungsgrad bei niedrigen Drücken nur gering unter dem Maximum liegt. Es bleibt daher bei der Planung einer ORC Anlage abzuwägen, ob sich der für höher Drücke notwendige Aufwand rentiert.

Des Weiteren tritt für jede Temperatur wieder ein Wirkungsgradmaximum auf. Im Gegensatz zu Pentan erreicht man dieses aber schon bei niedrigeren Drücken. Hier kommt aber aufgrund des höheren Temperaturbereichs hinzu, dass auch für jeden Druck ein Temperaturoptimum auftritt.

	p[bar]	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	8%	17%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T[$^{\circ}\text{C}$]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-139,6	185	9,689%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-129,6	195	9,614%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-119,6	205	9,536%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-109,6	215	9,455%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-99,6	225	9,373%	12,549%	-	-	-	-	-	-	-	-
-89,6	235	9,290%	12,464%	-	-	-	-	-	-	-	-
-79,6	245	9,207%	12,375%	13,978%	-	-	-	-	-	-	-
-69,6	255	9,123%	12,283%	13,902%	-	-	-	-	-	-	-
-59,6	265	9,040%	12,188%	13,818%	14,813%	-	-	-	-	-	-
-49,6	275	8,957%	12,092%	13,729%	14,747%	-	-	-	-	-	-
-39,6	285	8,874%	11,994%	13,635%	14,671%	15,355%	-	-	-	-	-
-29,6	295	8,792%	11,897%	13,539%	14,586%	15,297%	15,760%	-	-	-	-
-19,6	305	8,712%	11,799%	13,441%	14,497%	15,226%	15,730%	-	-	-	-
-9,6	315	8,632%	11,701%	13,342%	14,404%	15,147%	15,676%	16,036%	-	-	-
0,4	325	8,553%	11,604%	13,241%	14,308%	15,061%	15,609%	16,003%	16,254%	-	-
10,4	335	8,476%	11,508%	13,141%	14,210%	14,971%	15,532%	15,949%	16,246%	16,415%	-
20,4	345	8,399%	11,413%	13,041%	14,111%	14,878%	15,450%	15,883%	16,206%	16,431%	16,545%
30,4	355	8,324%	11,318%	12,941%	14,012%	14,783%	15,363%	15,808%	16,149%	16,405%	16,578%
40,4	365	8,251%	11,225%	12,841%	13,912%	14,686%	15,272%	15,726%	16,082%	16,357%	16,562%
50,4	375	8,178%	11,133%	12,743%	13,812%	14,589%	15,179%	15,642%	16,007%	16,296%	16,521%
60,4	385	8,107%	11,042%	12,645%	13,713%	14,491%	15,085%	15,553%	15,927%	16,227%	16,467%
70,4	395	8,037%	10,953%	12,549%	13,614%	14,393%	14,990%	15,463%	15,844%	16,152%	16,403%
80,4	405	7,969%	10,865%	12,453%	13,516%	14,295%	14,895%	15,371%	15,757%	16,073%	16,333%
90,4	415	7,902%	10,779%	12,359%	13,419%	14,197%	14,799%	15,278%	15,669%	15,991%	16,257%
100,4	425	7,836%	10,694%	12,266%	13,323%	14,101%	14,703%	15,185%	15,579%	15,906%	16,178%

Tabelle 17: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, Toluol, NIST, ohne Rekuperator

	p[bar]	39%	44%	48%	52%	55%	58%	60%	63%	65%	66%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0,4	325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10,4	335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20,4	345	16,475%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30,4	355	16,660%	16,628%	16,543%	16,469%	16,405%	-	-	-	-	-
40,4	365	16,700%	16,766%	16,758%	16,710%	16,658%	16,608%	16,560%	16,514%	16,467%	16,422%
50,4	375	16,690%	16,803%	16,861%	16,869%	16,846%	16,812%	16,776%	16,738%	16,701%	16,663%
60,4	385	16,655%	16,796%	16,892%	16,947%	16,964%	16,957%	16,938%	16,914%	16,886%	16,857%
70,4	395	16,605%	16,764%	16,885%	16,970%	17,022%	17,046%	17,051%	17,043%	17,028%	17,010%
80,4	405	16,546%	16,718%	16,856%	16,962%	17,038%	17,088%	17,117%	17,129%	17,130%	17,123%
90,4	415	16,479%	16,662%	16,812%	16,933%	17,027%	17,097%	17,146%	17,178%	17,195%	17,202%
100,4	425	16,407%	16,599%	16,758%	16,890%	16,998%	17,083%	17,148%	17,196%	17,229%	17,251%

Tabelle 18: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, Toluol NIST, ohne Rekuperator

Simulationen

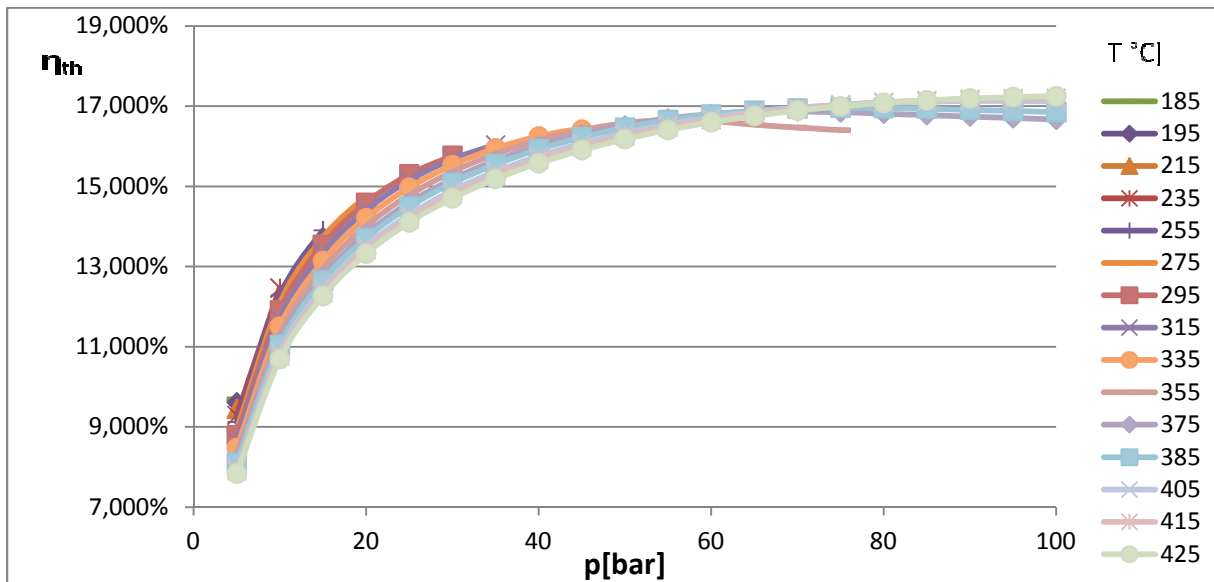


Abbildung 23: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Toluol , ohne Rekuperator

In Abbildung 23 wird der Verlauf des thermischen Wirkungsgrads für konstante Temperaturen über den berechneten Druckbereich und in Abbildung 24 der Verlauf des thermischen Wirkungsgrads für konstante Drücke über den berechneten Temperaturbereich dargestellt. Man erkennt, dass der Unterschied zwischen den einzelnen Wirkungsgradverläufen für konstante Temperatur relativ gering ist. Zudem ist festzustellen, dass im unterkritischen Bereich der thermische Wirkungsgrad für konstante Drücke mit steigender Temperatur abnimmt. Im überkritischen Bereich ändert sich dies und η_{th} steigt mit zunehmendem Druck wieder. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Einfluss der Turbineneintrittstemperatur im Gegensatz zum –eintrittsdruck geringer ist.

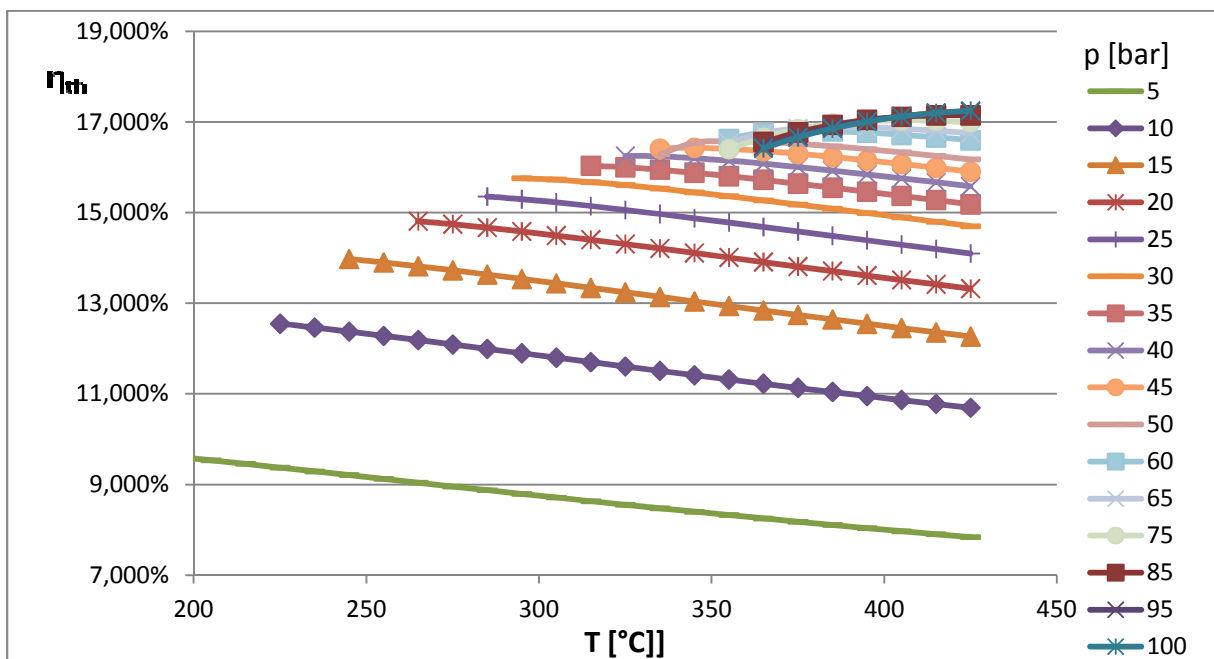


Abbildung 24: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Toluol, ohne Rekuperator

Abbildung 25 zeigt für den berechneten Druckbereich die besten Wirkungsgrade und die dazu benötigten Turbineneintrittstemperaturen. Bei hohen Drücken ($p > 40$ bar) kann, trotz deutlicher Erhöhung der Temperatur, der thermische Wirkungsgrad nur mehr geringfügig gesteigert werden.

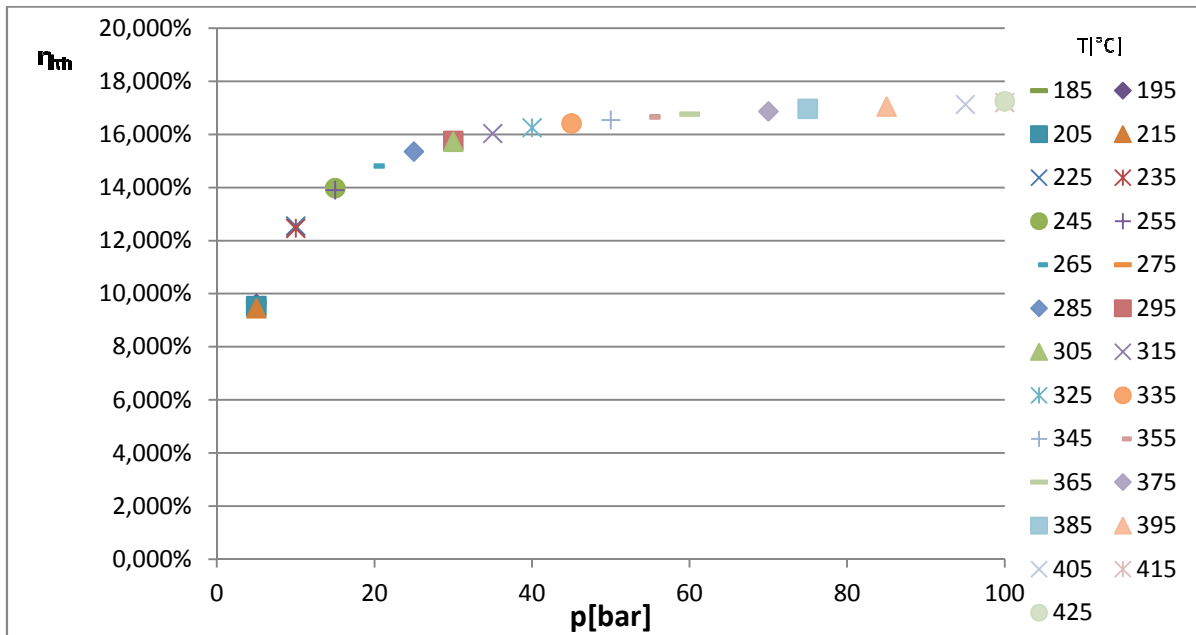


Abbildung 25: optimaler thermischer Wirkungsgrad über den berechneten Druckbereich, Toluol NIST, ohne Rekuperator

Für Toluol wurde eine maximale Entropie $s_{max} = 1,2$ kJ/kgK berechnet. Dadurch ergeben sich folgende, in Tabelle 19 dargestellte, maximale überkritische Drücke $p_{max,über}$. Man sieht, dass der Druck für die Turbineneintrittstemperatur von 365°C schon außerhalb des berechneten Druckbereichs liegt. Daher werden höhere Drücke nicht mehr angezeigt.

T [°C]	$p_{max,über}$ [bar]
325	43,63
335	49,31
345	57,93
355	76,02
365	116,54

Tabelle 19: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, Toluol

Vergleicht man diese $p_{max,über}$ mit den Betriebsbedingungen der berechneten maximalen thermischen Wirkungsgrade, erkennt man, dass die Turbineneintrittsdrücke unterhalb von $p_{max,über}$ liegen und daher keine Expansion durch das bzw. ins Zweiphasengebiet stattfindet.

Wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, beträgt der Wirkungsgrad bei 5 bar und 215°C noch knapp 9,5%. Aufgrund dieses hohen Wirkungsgrads bei geringem Druck wurden zusätzlich auch die Drücke von 1 – 5 bar berechnet. Diese geringen Drücke sind aufgrund des niedrigen Kondensationsdrucks ($p_{\text{Kond}} = 0,78\text{bar}$) von Toluol bei 100°C möglich. Die Ergebnisse kann man in Tabelle 20 sehen. Dabei fällt auf, dass schon bei sehr geringen Drücken und Temperaturen relativ hohe thermische Wirkungsgrade erzielt werden können.

	P [bar]	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
-209,6	115	0,836%	-	-	-	-	-	-	-
-199,6	125	0,831%	-	-	-	-	-	-	-
-189,6	135	0,825%	3,325%	-	-	-	-	-	-
-179,6	145	0,819%	3,297%	4,993%	-	-	-	-	-
-169,6	155	0,813%	3,267%	4,950%	6,218%	7,226%	-	-	-
-159,6	165	0,806%	3,237%	4,906%	6,165%	7,168%	7,996%	-	-
-149,6	175	0,800%	3,206%	4,861%	6,111%	7,108%	7,932%	8,630%	9,233%
-139,6	185	0,793%	3,174%	4,815%	6,055%	7,045%	7,865%	8,560%	9,162%
-129,6	195	0,786%	3,143%	4,768%	5,998%	6,982%	7,796%	8,488%	9,088%
-119,6	205	0,779%	3,111%	4,721%	5,941%	6,917%	7,726%	8,415%	9,011%
-109,6	215	0,772%	3,080%	4,674%	5,883%	6,851%	7,655%	8,339%	8,933%
-99,6	225	0,765%	3,048%	4,627%	5,826%	6,786%	7,584%	8,263%	8,853%
-89,6	235	0,757%	3,017%	4,581%	5,768%	6,720%	7,512%	8,187%	8,773%
-79,6	245	0,750%	2,986%	4,534%	5,711%	6,655%	7,440%	8,110%	8,693%
-69,6	255	0,743%	2,956%	4,489%	5,654%	6,590%	7,369%	8,034%	8,613%
-59,6	265	0,737%	2,926%	4,443%	5,598%	6,526%	7,298%	7,958%	8,533%
-49,6	275	0,730%	2,896%	4,399%	5,543%	6,462%	7,228%	7,883%	8,453%
-39,6	285	0,723%	2,867%	4,355%	5,488%	6,399%	7,159%	7,808%	8,374%
-29,6	295	0,716%	2,838%	4,311%	5,434%	6,337%	7,091%	7,735%	8,296%
-19,6	305	0,710%	2,810%	4,269%	5,381%	6,276%	7,023%	7,662%	8,219%
-9,6	315	0,703%	2,782%	4,227%	5,329%	6,216%	6,957%	7,590%	8,143%
0,4	325	0,697%	2,755%	4,186%	5,278%	6,157%	6,891%	7,520%	8,068%
10,4	335	0,691%	2,729%	4,146%	5,228%	6,099%	6,827%	7,450%	7,994%
20,4	345	0,684%	2,702%	4,106%	5,178%	6,042%	6,764%	7,382%	7,921%
30,4	355	0,678%	2,677%	4,068%	5,130%	5,986%	6,702%	7,315%	7,850%
40,4	365	0,672%	2,652%	4,030%	5,082%	5,931%	6,641%	7,249%	7,780%
50,4	375	0,667%	2,627%	3,993%	5,036%	5,878%	6,581%	7,184%	7,711%
60,4	385	0,661%	2,603%	3,956%	4,991%	5,825%	6,523%	7,121%	7,644%
70,4	395	0,655%	2,580%	3,921%	4,946%	5,773%	6,465%	7,059%	7,577%
80,4	405	0,650%	2,557%	3,886%	4,903%	5,723%	6,409%	6,998%	7,512%
90,4	415	0,645%	2,534%	3,852%	4,860%	5,674%	6,354%	6,938%	7,449%
100,4	425	0,639%	2,513%	3,819%	4,818%	5,625%	6,300%	6,880%	7,387%

Tabelle 20: thermischer Wirkungsgrad für $p < 5$ bar, Toluol NIST, ohne Rekuperator

5.2.2 Mit Rekuperator

Der Aufbau des simulierten Kreislaufs wird in Abbildung 16 gezeigt. Die Annahmen und Einstellungen für den Kreislauf sind dieselben wie oben genannt. Berechnet wurde der Bereich von 105 – 425°C und von 5 – 100 bar.

Dargestellt werden aber auch hier nur die Temperaturen ab 185°C, da darunter keine Verdampfung des Fluids stattfindet.

Der hier berechnete maximale Wirkungsgrad liegt bei 425°C, 60 bar und beträgt 28,625% – er liegt somit im überkritischen Bereich. Durch die Verwendung des Rekuperators wird das Wirkungsgradmaximum für jeden Druck erst bei der Höchsttemperatur erreicht. Anders verhält es sich bei konstanter Temperatur. Hier wird der optimale Druck schon sehr früh erreicht, im spätesten Fall bei 60 bar (395°C).

Wie in Tabelle 21 und Tabelle 22 ersichtlich, erfolgt ein signifikanter Anstieg des Wirkungsgrads durch den Einsatz eines Rekuperators.

In Abbildung 26 wird der Verlauf des thermischen Wirkungsgrads für konstante Temperaturen über den berechneten Druckbereich und in Abbildung 27 der Verlauf des thermischen Wirkungsgrads für konstante Drücke über den berechneten Temperaturbereich dargestellt. Man erkennt am Verlauf für $T = \text{konst.}$, dass nach Erreichen eines Maximums der Wirkungsgrad mit steigendem Druck wieder abnimmt. Vor allem bei Erreichen des kritischen Punkts (Linie 325°C, Abbildung 27) fällt der thermische Wirkungsgrad stark ab. Dies liegt daran, dass bei konstanter Temperatur und mit steigendem Druck die Enthalpie am Turbineneintritt geringer wird.

Der Wirkungsgradverlauf für konstante Drücke steigt im Gegensatz zum Prozess ohne Rekuperator, mit zunehmenden Temperaturen für alle Drücke und nicht nur für überkritische. Somit gilt unter Voraussetzung der verwendeten Randbedingungen, dass mit Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur auch eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads einhergeht.

	p[bar]	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	8%	17%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-99,6	225	12,691%	15,732%	-	-	-	-	-	-	-	-
-89,6	235	12,968%	16,135%	-	-	-	-	-	-	-	-
-79,6	245	13,242%	16,524%	17,737%	-	-	-	-	-	-	-
-69,6	255	13,510%	16,901%	18,227%	-	-	-	-	-	-	-
-59,6	265	13,776%	17,268%	18,690%	19,209%	-	-	-	-	-	-
-49,6	275	14,038%	17,626%	19,136%	19,772%	-	-	-	-	-	-
-39,6	285	14,297%	17,976%	19,559%	20,299%	20,464%	-	-	-	-	-
-29,6	295	14,552%	18,319%	19,976%	20,789%	21,090%	20,871%	-	-	-	-
-19,6	305	14,805%	18,656%	20,372%	21,262%	21,660%	21,658%	-	-	-	-
-9,6	315	15,055%	18,986%	20,767%	21,710%	22,187%	22,318%	22,074%	-	-	-
0,4	325	15,303%	19,311%	21,142%	22,143%	22,689%	22,911%	22,849%	22,407%	-	-
10,4	335	15,548%	19,631%	21,513%	22,566%	23,164%	23,460%	23,511%	23,313%	22,737%	-
20,4	345	15,791%	19,946%	21,877%	22,973%	23,624%	23,978%	24,110%	24,043%	23,755%	23,145%
30,4	355	16,032%	20,257%	22,235%	23,375%	24,064%	24,470%	24,666%	24,688%	24,543%	24,214%
40,4	365	16,270%	20,563%	22,585%	23,761%	24,494%	24,942%	25,190%	25,278%	25,226%	25,038%
50,4	375	16,507%	20,866%	22,930%	24,145%	24,909%	25,396%	25,688%	25,829%	25,845%	25,748%
60,4	385	16,742%	21,165%	23,269%	24,514%	25,316%	25,837%	26,166%	26,351%	26,420%	26,388%
70,4	395	16,974%	21,460%	23,602%	24,884%	25,711%	26,263%	26,626%	26,849%	26,960%	26,980%
80,4	405	17,205%	21,752%	23,931%	25,239%	26,100%	26,679%	27,071%	27,326%	27,474%	27,535%
90,4	415	17,434%	22,040%	24,255%	25,595%	26,477%	27,083%	27,503%	27,787%	27,966%	28,061%
100,4	425	17,662%	22,325%	24,575%	25,938%	26,850%	27,479%	27,923%	28,232%	28,439%	28,564%

Tabelle 21: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, Toluol NIST, mit Rekuperator

	p[bar]	39%	44%	48%	52%	55%	58%	60%	63%	65%	66%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-99,6	225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-89,6	235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-79,6	245	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-69,6	255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-59,6	265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-49,6	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-39,6	285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-29,6	295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-19,6	305	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9,6	315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4	325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10,4	335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20,4	345	22,030%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30,4	355	23,645%	22,840%	22,194%	21,792%	21,505%	-	-	-	-	-
40,4	365	24,704%	24,207%	23,604%	23,090%	22,722%	22,445%	22,219%	22,024%	21,851%	21,690%
50,4	375	25,542%	25,225%	24,805%	24,335%	23,919%	23,591%	23,331%	23,114%	22,925%	22,756%
60,4	385	26,266%	26,059%	25,771%	25,418%	25,042%	24,698%	24,410%	24,170%	23,964%	23,783%
70,4	395	26,919%	26,786%	26,588%	26,332%	26,035%	25,726%	25,437%	25,184%	24,966%	24,779%
80,4	405	27,522%	27,445%	27,311%	27,126%	26,901%	26,649%	26,390%	26,145%	25,922%	25,724%
90,4	415	28,087%	28,054%	27,969%	27,839%	27,671%	27,473%	27,257%	27,037%	26,825%	26,633%
100,4	425	28,623%	28,625%	28,579%	28,492%	28,369%	28,217%	28,043%	27,857%	27,667%	27,483%

Tabelle 22: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, Toluol NIST, mit Rekuperator

Simulationen

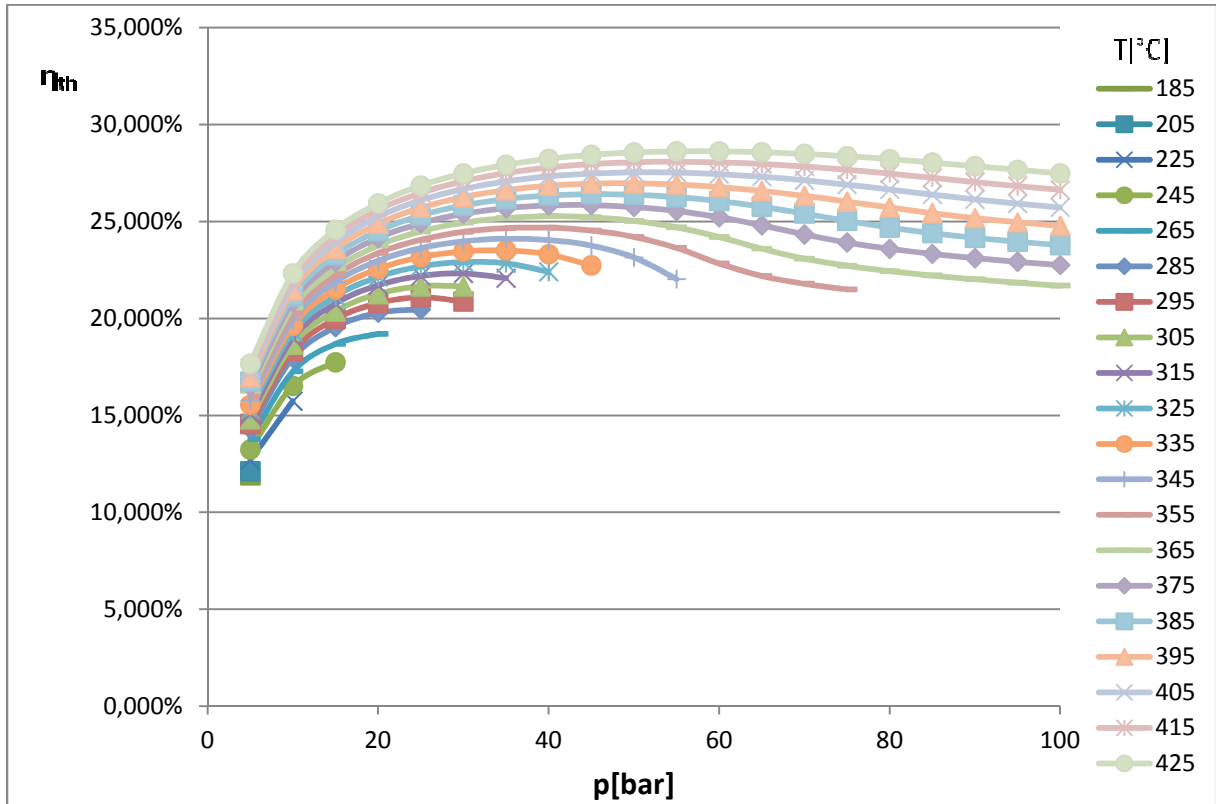


Abbildung 26: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Toluol NIST, mit Rekuperator

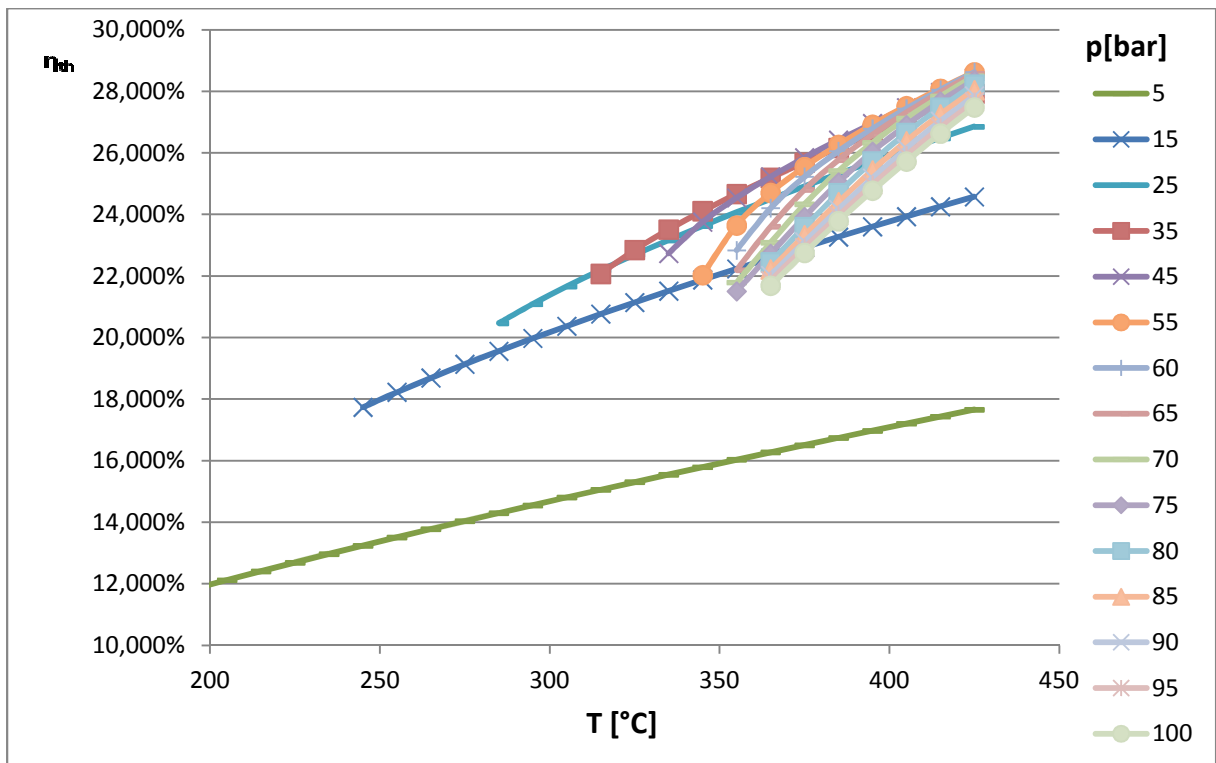


Abbildung 27: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Toluol NIST, mit Rekuperator

Wenn man hier $p_{\text{max,über}}$ (Tabelle 19) mit den Turbineneintrittsdrücken der maximalen thermischen Wirkungsgrade im überkritischen Bereich vergleicht, erkennt man, dass eben diese $p_{\text{max,über}}$ immer über den berechneten Betriebszuständen liegen.

Da auch mit Rekuperator der Wirkungsgrad bei 5 bar sehr hoch ist, wurde zusätzlich der Bereich bis 5 bar berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 23 gezeigt. Zu erkennen ist, dass mit Toluol schon bei geringen Temperaturen und Drücken hohe Wirkungsgrade zu erreichen sind.

	P [bar]	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub	sub
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
-209,6	115	1,293%	-	-	-	-	-	-	-
-199,6	125	1,334%	-	-	-	-	-	-	-
-189,6	135	1,374%	3,978%	-	-	-	-	-	-
-179,6	145	1,414%	4,090%	5,817%	-	-	-	-	-
-169,6	155	1,454%	4,202%	5,978%	7,258%	8,226%	-	-	-
-159,6	165	1,493%	4,312%	6,136%	7,450%	8,458%	9,254%	-	-
-149,6	175	1,532%	4,421%	6,293%	7,648%	8,681%	9,504%	10,178%	10,739%
-139,6	185	1,571%	4,529%	6,448%	7,833%	8,902%	9,750%	10,447%	11,030%
-129,6	195	1,610%	4,637%	6,601%	8,026%	9,117%	9,990%	10,709%	11,311%
-119,6	205	1,648%	4,743%	6,753%	8,207%	9,332%	10,228%	10,967%	11,589%
-109,6	215	1,687%	4,849%	6,903%	8,396%	9,541%	10,460%	11,220%	11,859%
-99,6	225	1,725%	4,954%	7,052%	8,572%	9,750%	10,691%	11,470%	12,127%
-89,6	235	1,763%	5,059%	7,200%	8,757%	9,954%	10,917%	11,715%	12,388%
-79,6	245	1,801%	5,163%	7,347%	8,930%	10,159%	11,142%	11,958%	12,648%
-69,6	255	1,839%	5,267%	7,493%	9,113%	10,359%	11,363%	12,197%	12,902%
-59,6	265	1,877%	5,370%	7,637%	9,283%	10,560%	11,584%	12,434%	13,155%
-49,6	275	1,914%	5,472%	7,781%	9,462%	10,756%	11,800%	12,667%	13,402%
-39,6	285	1,952%	5,574%	7,924%	9,629%	10,954%	12,016%	12,900%	13,650%
-29,6	295	1,989%	5,676%	8,067%	9,807%	11,147%	12,229%	13,128%	13,891%
-19,6	305	2,027%	5,777%	8,208%	9,972%	11,342%	12,441%	13,356%	14,134%
-9,6	315	2,064%	5,878%	8,349%	10,147%	11,532%	12,650%	13,581%	14,370%
0,4	325	2,102%	5,978%	8,489%	10,309%	11,723%	12,859%	13,804%	14,608%
10,4	335	2,139%	6,078%	8,628%	10,482%	11,911%	13,065%	14,025%	14,841%
20,4	345	2,176%	6,178%	8,767%	10,643%	12,100%	13,271%	14,245%	15,074%
30,4	355	2,213%	6,277%	8,914%	10,814%	12,285%	13,473%	14,462%	15,302%
40,4	365	2,250%	6,376%	9,042%	10,982%	12,472%	13,676%	14,679%	15,532%
50,4	375	2,287%	6,475%	9,188%	11,143%	12,655%	13,876%	14,893%	15,757%
60,4	385	2,324%	6,574%	9,315%	11,308%	12,839%	14,076%	15,106%	15,983%
70,4	395	2,361%	6,672%	9,460%	11,468%	13,020%	14,274%	15,317%	16,204%
70,4	395	2,398%	6,770%	9,586%	11,632%	13,203%	14,471%	15,528%	16,427%
80,4	405	2,434%	6,867%	9,730%	11,789%	13,381%	14,666%	15,736%	16,645%
90,4	415	2,471%	6,965%	9,855%	11,952%	13,562%	14,862%	15,944%	16,865%

Tabelle 23: thermischer Wirkungsgrad für $p < 5$ bar, Toluol NIST, mit Rekuperator

5.2.3 Vergleich

Dadurch, dass Toluol ein sogenanntes trockenes Medium ist, das heißt eine positive Steigung der Sattdampfkurve im T-s Diagramm aufweist, ist von einer deutlichen Steigerung des Wirkungsgrads durch die Verwendung eines Rekuperators auszugehen. Diese wurde durch die Berechnungen auch festgestellt. Teilweise ist eine Erhöhung um 12%-Punkte zu beobachten, welche beinahe einer Verdoppelung entspricht.

Es ist zu erkennen, dass bei beiden Kreisläufen der maximale Wirkungsgrad im überkritischen Bereich liegt. Doch während der Wirkungsgrad beim Prozess ohne Rekuperator mit zunehmendem Druck relativ konstant bleibt, fällt er mit Rekuperator wieder ab. Bei konstantem Druck steigt der thermische Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur im Prozess mit Rekuperator, ohne Rekuperator sinkt er dagegen.

Ein weiterer Vorteil des Rekuperators ist das frühere Erreichen des Wirkungsgradmaximums. Durch die geringeren Drücke kann der Wärmetauscher weniger massiv konstruiert werden und auch die Sicherheitsaufwendungen sind geringer. Beides führt zu Kostenersparnissen.

5.3 MDM

MDM oder auch Octamethyltrisiloxan genannt, ist ein weiteres Medium welches in vielen ORC Anlagen zum Einsatz kommt. Durch die starke positive Steigung der Satttdampfkurve sollte es vor allem für den Gebrauch in Anlagen mit internem Wärmetauscher sehr gut geeignet sein. Weil es außerdem eine relativ hohe kritische Temperatur, die bei 290,9°C liegt, aufweist, ist es für die Nutzung von Wärme mit hoher Temperatur gut geeignet. Durch den niedrigen kritischen Druck von 14,16 bar kann es ohne größeren Aufwand (Sicherheitsvorkehrungen, Verstärkungen, etc.) im überkritischen Bereich verwendet werden. Der hier berechnete Bereich liegt bei 5 – 100 bar und 105 – 395°C.

5.3.1 Ohne Rekuperator

Der Aufbau der Simulation ist derselbe wie bei Pentan und Toluol und ist in Abbildung 15 zu sehen. Auch die Einstellungen sind die gleichen, wie oben genannt. Die Kondensationstemperatur liegt bei 100°C, was einem Kondensationsdruck von 0,2 bar entspricht. Der Pumpenwirkungsgrad wurde mit 70%, der Turbinenwirkungsgrad mit 80% angenommen und der Massendurchfluss des ORC Prozesses bei 50 kg/s.

Die Ergebnisse der Berechnung werden in Tabelle 24 und Tabelle 25 angezeigt. Die Resultate für die Temperaturen zwischen 105°C und 235°C werden nicht dargestellt, da in diesem Spektrum im unterkritischen Bereich keine Verdampfung des Fluids stattfindet.

Der maximale thermische Wirkungsgrad für MDM ohne Rekuperator ist mit den gegebenen Randbedingungen 9,239% bei 345°C und 35 bar und liegt daher im überkritischen Bereich. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass der maximale Wirkungsgrad über das berechnete Druckspektrum fast konstant bei knapp über 9% liegt. Im unterkritischen Bereich ($p < 14,16$ bar) erkennt man einen etwas geringeren thermischen Wirkungsgrad.

	p[bar]	sub	sub	5,6%	29,2%	43,4%	52,8%	59,5%	64,6%	68,5%	71,7%
$\Delta T_{\text{krit}}[\text{°C}]$	T[°C]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-55,9	235	8,044%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-45,9	245	7,867%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-35,9	255	7,702%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25,9	265	7,546%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15,9	275	7,399%	8,821%	-	-	-	-	-	-	-	-
-5,9	285	7,260%	8,676%	-	-	-	-	-	-	-	-
4,1	295	7,128%	8,538%	9,179%	-	-	-	-	-	-	-
14,1	305	7,002%	8,405%	9,037%	9,209%	-	-	-	-	-	-
24,1	315	6,883%	8,278%	8,920%	9,203%	9,223%	9,205%	9,176%	9,140%	9,099%	9,055%
34,1	325	6,770%	8,155%	8,806%	9,137%	9,227%	9,232%	9,217%	9,192%	9,161%	9,125%
44,1	335	6,662%	8,038%	8,696%	9,049%	9,201%	9,236%	9,237%	9,224%	9,203%	9,176%
54,1	345	6,558%	7,925%	8,588%	8,957%	9,148%	9,219%	9,239%	9,239%	9,227%	9,209%
64,1	355	6,460%	7,816%	8,483%	8,864%	9,080%	9,184%	9,224%	9,238%	9,237%	9,227%
74,1	365	6,365%	7,712%	8,381%	8,772%	9,005%	9,134%	9,196%	9,224%	9,233%	9,232%
84,1	375	6,275%	7,611%	8,282%	8,680%	8,927%	9,075%	9,156%	9,198%	9,219%	9,226%
94,1	385	6,188%	7,514%	8,185%	8,590%	8,847%	9,010%	9,108%	9,164%	9,195%	9,211%
104,1	395	6,105%	7,420%	8,092%	8,501%	8,767%	8,941%	9,053%	9,122%	9,164%	9,188%

Tabelle 24: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, MDM NIST, ohne Rekuperator

	p[bar]	74,3%	76,4%	78,2%	79,8%	81,1%	82,3%	83,3%	84,3%	85,1%	85,8%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T [°C]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-55,9	235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-45,9	245	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-35,9	255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25,9	265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15,9	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-5,9	285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,1	295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,1	305	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24,1	315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34,1	325	9,086%	9,044%	8,999%	8,952%	8,903%	8,852%	8,800%	8,747%	8,692%	8,637%
44,1	335	9,144%	9,109%	9,071%	9,031%	8,988%	8,944%	8,898%	8,850%	8,801%	8,751%
54,1	345	9,185%	9,156%	9,125%	9,091%	9,054%	9,016%	8,975%	8,934%	8,890%	8,845%
64,1	355	9,210%	9,189%	9,164%	9,136%	9,105%	9,072%	9,037%	9,000%	8,961%	8,922%
74,1	365	9,223%	9,208%	9,189%	9,167%	9,141%	9,114%	9,083%	9,052%	9,018%	8,983%
84,1	375	9,224%	9,216%	9,203%	9,186%	9,166%	9,143%	9,118%	9,091%	9,061%	9,031%
94,1	385	9,217%	9,215%	9,208%	9,196%	9,181%	9,163%	9,142%	9,119%	9,094%	9,067%
104,1	395	9,201%	9,205%	9,204%	9,197%	9,187%	9,173%	9,156%	9,137%	9,116%	9,094%

Tabelle 25: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, MDM NIST, ohne Rekuperator

In Abbildung 28 ist der Wirkungsgradverlauf über den berechneten Druckbereich für konstante Temperaturen und in Abbildung 29 der Wirkungsgradverlauf für konstante Drücke dargestellt. Man erkennt nur geringe Unterschiede im Verlauf des maximalen Wirkungsgrads von 20 – 100 bar für Temperaturen ab knapp 300°C, was dem überkritischen Bereich entspricht.

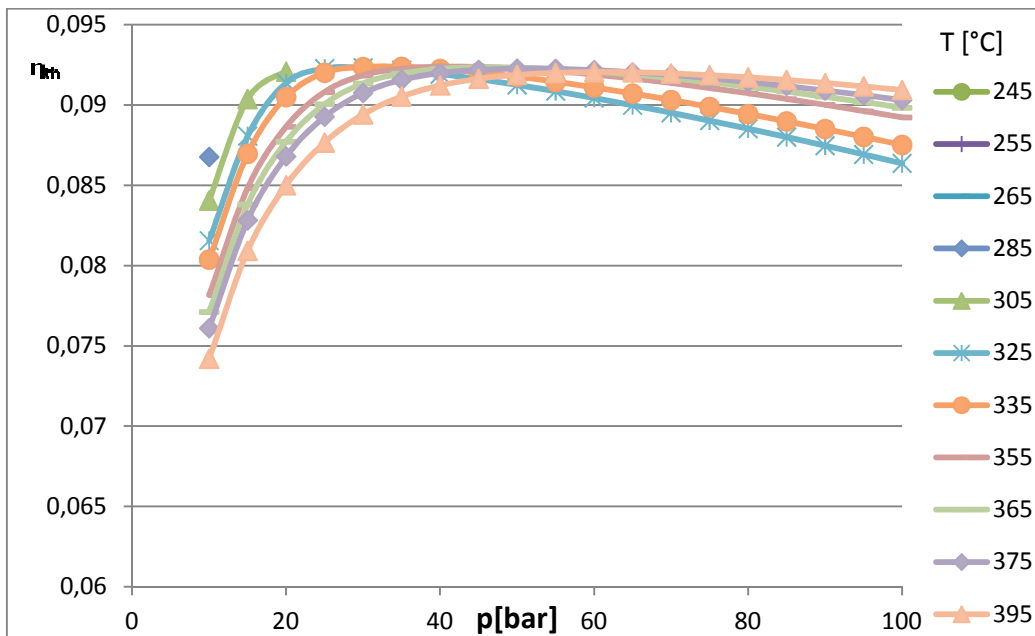


Abbildung 28: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , MDM, ohne Rekuperator

Auffallend ist die starke Abnahme des Wirkungsgrads für konstante unterkritische Drücke mit steigender Temperatur. Dagegen weisen die thermischen Wirkungsgrade bei überkritischen Drücke einen ansteigenden Verlauf auf.

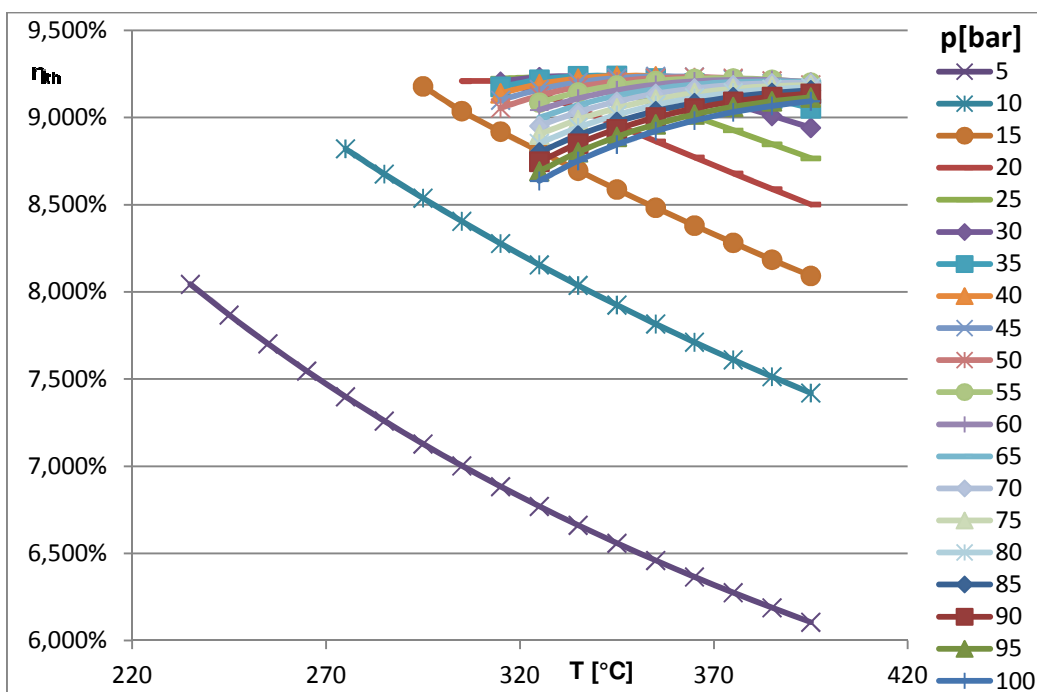


Abbildung 29: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , MDM, ohne Rekuperator

Die Berechnung der maximalen Entropie s_{\max} ergab einen Wert von 0,718 kJ/kgK. Dadurch ergeben sich folgende $p_{\max, \text{über}}$:

T [°C]	$p_{\max, \text{über}}$ [bar]
295	14,94
305	20,06
315	53,56
325	163,28

Tabelle 26: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, MDM

Betrachtet man die Drücke der maximalen thermischen Wirkungsgrade, erkennt man, dass sie nahe an den $p_{\max, \text{über}}$ liegen. Um eine Expansion durch das Zweiphasengebiet zu vermeiden, sollte der Turbineneintrittsdruck vermindert werden.

5.3.2 Mit Rekuperator

Der Aufbau des simulierten Kreislaufs ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Annahmen und Einstellungen für den Kreislauf sind dieselben, wie oben genannt. Berechnet wurde der Bereich bis 395°C und von 0 – 100 bar.

Dargestellt werden aber nur die Temperaturen ab 235°C, da darunter keine Verdampfung des Fluids stattfindet.

Wie in Tabelle 27 und Tabelle 28 ersichtlich, erfolgt auch hier, wie erwartet, ein signifikanter Anstieg des Wirkungsgrads durch den Einsatz eines Rekuperators.

In Abbildung 30 ist der Wirkungsgradverlauf über den berechneten Druckbereich für konstante Temperaturen und in Abbildung 31 der Wirkungsgradverlauf für konstante Drücke dargestellt

Der hier berechnete maximale Wirkungsgrad liegt bei 395°C, 30 bar und beträgt 26,238% – er liegt somit im überkritischen Bereich. Durch die Verwendung des Rekuperators wird das Wirkungsgradmaximum für jeden Druck erst bei der Höchsttemperatur erreicht. Anders verhält es sich bei konstanter Temperatur: Hier wird der optimale Druck schon sehr früh erreicht, im spätesten Fall bei 30 bar (395°C).

Da der optimale Betriebspunkt schon bei geringen Drücken erreicht wird, sind für den Betrieb der Anlage die Sicherheitsvorkehrungen und Verstärkungen der Konstruktion nicht massiv zu erhöhen.

	p[bar]	sub	sub	5,6%	29,2%	43,4%	52,8%	59,5%	64,6%	68,5%	71,7%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T[$^{\circ}\text{C}$]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-55,9	235	16,097%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-45,9	245	16,471%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-35,9	255	16,839%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25,9	265	17,189%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15,9	275	17,545%	19,324%	-	-	-	-	-	-	-	-
-5,9	285	17,874%	19,830%	-	-	-	-	-	-	-	-
4,1	295	18,218%	20,288%	19,817%	-	-	-	-	-	-	-
14,1	305	18,532%	20,742%	21,087%	19,939%	-	-	-	-	-	-
24,1	315	18,867%	21,157%	21,725%	21,055%	20,558%	20,292%	20,073%	19,873%	19,684%	19,500%
34,1	325	19,169%	21,565%	22,278%	22,065%	21,494%	21,194%	20,969%	20,769%	20,582%	20,403%
44,1	335	19,481%	21,964%	22,783%	22,825%	22,389%	22,060%	21,827%	21,628%	21,444%	21,269%
54,1	345	19,787%	22,349%	23,263%	23,458%	23,207%	22,884%	22,647%	22,450%	22,270%	22,100%
64,1	355	20,091%	22,729%	23,715%	24,023%	23,926%	23,661%	23,430%	23,237%	23,062%	22,898%
74,1	365	20,389%	23,095%	24,154%	24,547%	24,566%	24,384%	24,173%	23,988%	23,821%	23,663%
84,1	375	20,685%	23,460%	24,574%	25,040%	25,149%	25,049%	24,876%	24,706%	24,548%	24,397%
94,1	385	20,976%	23,811%	24,987%	25,511%	25,691%	25,665%	25,538%	25,389%	25,243%	25,103%
104,1	395	21,265%	24,163%	25,383%	25,962%	26,202%	26,238%	26,161%	26,040%	25,909%	25,780%

Tabelle 27: thermischer Wirkungsgrad für p < 50 bar, MDM NIST, mit Rekuperator

	p[bar]	74,3%	76,4%	78,2%	79,8%	81,1%	82,3%	83,3%	84,3%	85,1%	85,8%
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T[$^{\circ}\text{C}$]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-55,9	235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-45,9	245	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-35,9	255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25,9	265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15,9	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-5,9	285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,1	295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,1	305	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24,1	315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34,1	325	20,228%	20,056%	19,886%	19,718%	19,551%	19,385%	19,219%	19,055%	18,891%	18,727%
44,1	335	21,099%	20,932%	20,767%	20,604%	20,442%	20,280%	20,120%	19,960%	19,801%	19,644%
54,1	345	21,935%	21,773%	21,614%	21,456%	21,299%	21,143%	20,987%	20,832%	20,678%	20,524%
64,1	355	22,738%	22,582%	22,428%	22,276%	22,124%	21,973%	21,823%	21,673%	21,523%	21,375%
74,1	365	23,510%	23,360%	23,212%	23,065%	22,919%	22,773%	22,628%	22,483%	22,338%	22,193%
84,1	375	24,252%	24,108%	23,967%	23,826%	23,685%	23,545%	23,405%	23,265%	23,125%	22,986%
94,1	385	24,965%	24,829%	24,694%	24,559%	24,424%	24,290%	24,155%	24,020%	23,885%	23,749%
104,1	395	25,651%	25,523%	25,394%	25,266%	25,138%	25,009%	24,880%	24,750%	24,620%	24,490%

Tabelle 28: thermischer Wirkungsgrad für p > 50 bar, MDM NIST, mit Rekuperator

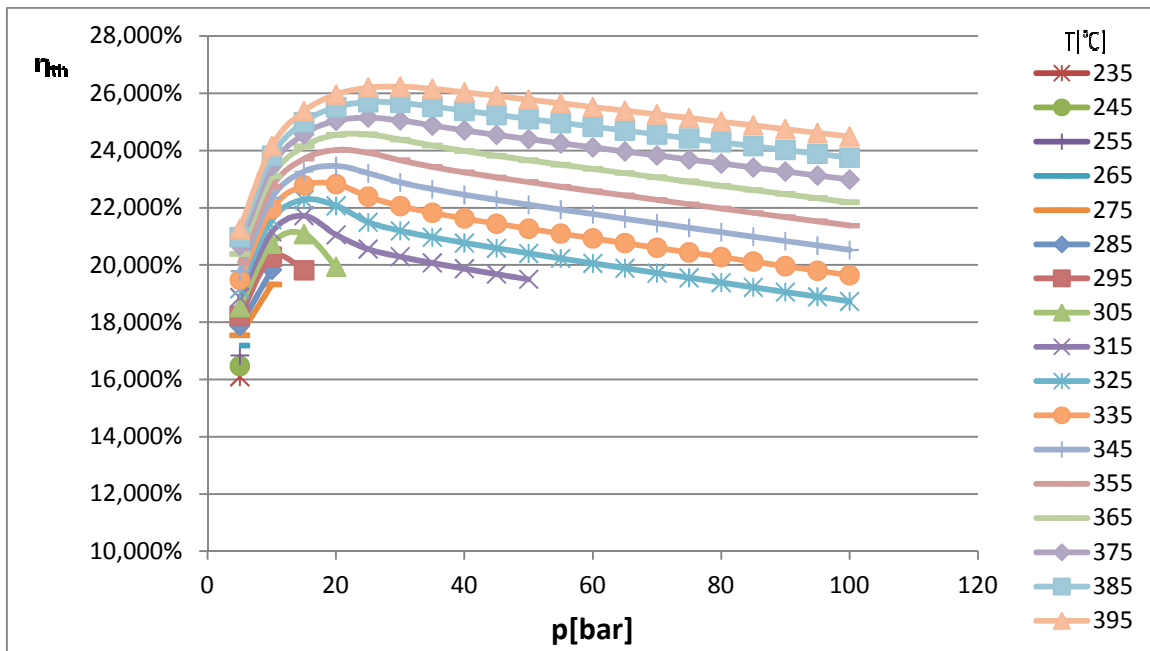


Abbildung 30: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , MDM, mit Rekuperator

Man erkennt in Abbildung 31 den Anstieg des thermischen Wirkungsgrads bei konstantem Druck und steigender Temperatur für alle Drücke. Bei überkritischen Drücken wird dieser Anstieg noch stärker. Des Weiteren sieht man, dass schon bei Drücken unter 5 bar hohe thermische Wirkungsgrade erreicht werden. Daher wurden auch diese berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 29 dargestellt.

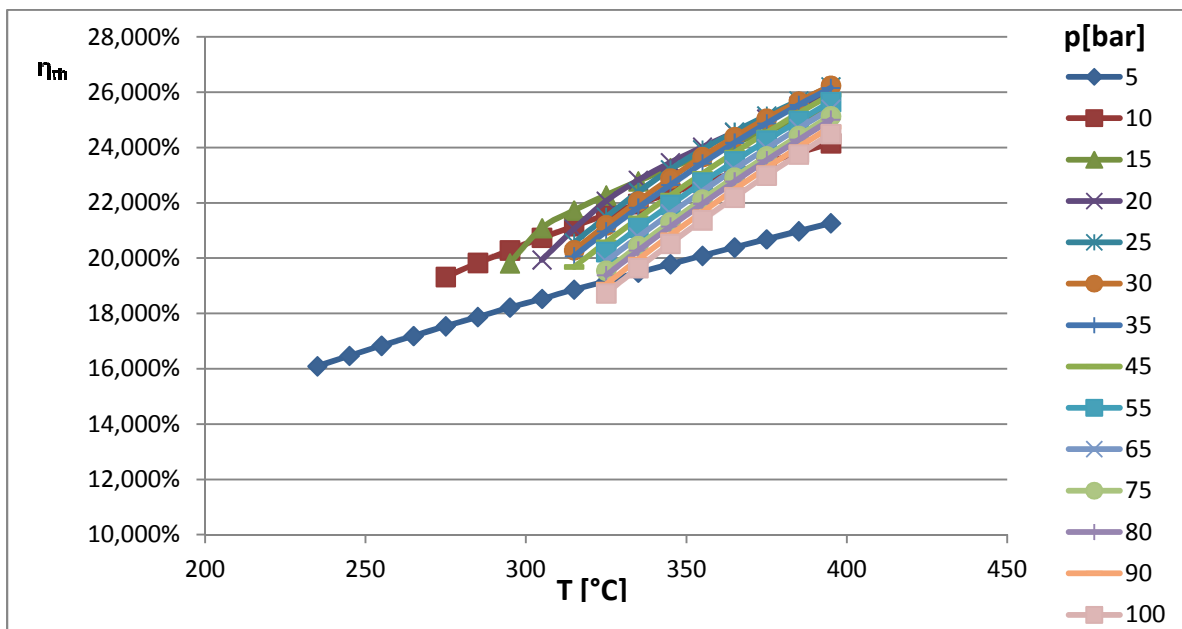


Abbildung 31: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , MDM, mit Rekuperator

Da durch den Rekuperator die maximalen thermischen Wirkungsgrade schon bei geringeren Drücken erreicht werden, liegt man auch immer unter $p_{\text{max,über}}$ (Tabelle 26) und vermeidet so die Expansion durchs Zweiphasengebiet.

	p[bar]									
$\Delta T_{\text{krit}} [^{\circ}\text{C}]$	T[$^{\circ}\text{C}$]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
-155,9	135	3,838%	-	-	-	-	-	-	-	-
-145,9	145	3,944%	-	-	-	-	-	-	-	-
-135,9	155	4,052%	7,474%	-	-	-	-	-	-	-
-125,9	165	4,155%	7,669%	-	-	-	-	-	-	-
-115,9	175	4,261%	7,868%	9,719%	-	-	-	-	-	-
-105,9	185	4,363%	8,050%	9,966%	11,189%	-	-	-	-	-
-95,9	195	4,468%	8,245%	10,199%	11,461%	12,355%	-	-	-	-
-85,9	205	4,569%	8,423%	10,436%	11,730%	12,655%	13,349%	-	-	-
-75,9	215	4,673%	8,615%	10,662%	11,993%	12,946%	13,666%	14,227%	14,671%	-
-65,9	225	4,773%	8,790%	10,893%	12,254%	13,234%	13,977%	14,561%	15,028%	15,404%
-55,9	235	4,875%	8,978%	11,114%	12,509%	13,515%	14,281%	14,886%	15,373%	15,771%
-45,9	245	4,974%	9,150%	11,341%	12,764%	13,793%	14,581%	15,205%	15,711%	16,127%
-35,9	255	5,076%	9,336%	11,557%	13,012%	14,066%	14,875%	15,517%	16,041%	16,474%
-25,9	265	5,174%	9,505%	11,779%	13,261%	14,337%	15,164%	15,824%	16,364%	16,813%
-15,9	275	5,275%	9,689%	11,991%	13,504%	14,603%	15,449%	16,126%	16,681%	17,144%
-5,9	285	5,373%	9,855%	12,210%	13,747%	14,867%	15,731%	16,424%	16,993%	17,470%
4,1	295	5,473%	10,036%	12,419%	13,985%	15,127%	16,009%	16,717%	17,300%	17,790%
14,1	305	5,570%	10,200%	12,634%	14,224%	15,385%	16,284%	17,006%	17,603%	18,105%
24,1	315	5,669%	10,380%	12,839%	14,458%	15,640%	16,555%	17,292%	17,901%	18,415%
34,1	325	5,765%	10,542%	13,051%	14,693%	15,893%	16,824%	17,574%	18,195%	18,720%
44,1	335	5,864%	10,720%	13,253%	14,923%	16,142%	17,089%	17,853%	18,486%	19,021%
54,1	345	5,960%	10,880%	13,463%	15,154%	16,391%	17,352%	18,129%	18,773%	19,319%
64,1	355	6,058%	11,056%	13,662%	15,380%	16,636%	17,612%	18,401%	19,057%	19,612%
74,1	365	6,153%	11,214%	13,869%	15,607%	16,880%	17,871%	18,672%	19,338%	19,903%
84,1	375	6,251%	11,389%	14,066%	15,830%	17,121%	18,126%	18,939%	19,615%	20,190%
94,1	385	6,345%	11,545%	14,270%	16,054%	17,362%	18,379%	19,204%	19,890%	20,473%
104,1	395	6,443%	11,719%	14,464%	16,273%	17,599%	18,630%	19,466%	20,162%	20,754%

Tabelle 29: thermischer Wirkungsgrad für p < 5 bar, MDM NIST, mit Rekuperato

5.3.3 Vergleich

Auch bei MDM ist, wie aufgrund der extremen positiven Steigung der Sattdampfkurve im T-s Diagramm zu erwarten war, eine signifikante Erhöhung des Wirkungsgrads durch den Einsatz eines Rekuperators eingetreten. Während bei niedrigen Temperaturen die Steigerung nur gering ist und bei knapp 2% liegt, kann der thermische Wirkungsgrad bei hohen Temperaturen fast verdreifacht werden.

Der maximale Wirkungsgrad liegt bei beiden Prozessen im überkritischen Bereich. Da MDM aber einen relativ niedrigen kritischen Druck hat, wird der optimale Betriebspunkt schon bei geringen Drücken erreicht. Somit können zusätzliche Verstärkungen der Konstruktion und erhöhte Sicherheitsvorkehrungen vernachlässigt werden.

Zusätzlich erreicht man mit Rekuperator schon bei sehr geringen Drücken ($p < 5$ bar) relativ hohe thermische Wirkungsgrade.

6. Vergleich n-Pentan – Toluol – MDM

In Tabelle 30 und Tabelle 31 ist eine Aufstellung der besten Wirkungsgrade über den berechneten Druck- und Temperaturbereich, unter Verwendung des dazu benötigten Fluids, dargestellt. Die Randbedingungen sind dieselben wie in Kapitel 6 und sind: 100°C Kondensationstemperatur, 80% Turbinenwirkungsgrad, 70% Pumpenwirkungsgrad und 50kg/s Massendurchfluss im ORC Prozess.

Zusätzlich wird noch zwischen über- und unterkritischem Zustand des Fluids unterschieden. Der nicht gekennzeichnete Bereich kann mit den untersuchten Medien nicht abgedeckt werden, da es mit diesen Betriebszuständen bei keinem der Fluide zur Verdampfung kommt.

Es ist zu erkennen, dass jedes Fluid einen bestimmten Bereich abdeckt. Das bestätigt wiederum, dass die Auswahl des Fluids von entscheidender Relevanz ist.

Auffallend ist, dass unter den gewählten Randbedingungen, alle maximalen thermischen Wirkungsgrade mit Rekuperator erreicht werden.

Man bemerkt außerdem Unterschiede im Temperaturbereich. Mit Pentan erreicht man die besten Wirkungsgrade bei niedrigeren Temperaturen, während Toluol bei hohen Drücken und hohen Temperaturen von Vorteil ist.

p[bar]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
T[°C]										
125	-	3,614%	-	-	-	-	-	-	-	-
135	-	3,810%	-	-	-	-	-	-	-	-
145	-	3,995%	-	-	-	-	-	-	-	-
155	-	4,170%	6,828%	-	-	-	-	-	-	-
165	-	4,338%	7,183%	8,363%	-	-	-	-	-	-
175	-	4,500%	7,511%	8,908%	-	-	-	-	-	-
185	11,524%	4,657%	7,821%	9,389%	9,979%	-	-	-	-	-
195	11,825%	4,810%	8,116%	9,829%	10,633%	10,642%	-	-	-	-
205	12,120%	4,960%	8,400%	10,232%	11,200%	11,526%	11,087%	-	-	-
215	12,408%	5,107%	8,673%	10,622%	11,707%	12,220%	12,233%	11,564%	-	-
225	12,691%	15,732%	8,939%	10,983%	12,182%	12,827%	13,053%	12,875%	12,196%	11,120%
235	16,097%	16,135%	9,197%	11,341%	12,623%	13,376%	13,744%	13,791%	13,526%	12,941%
245	16,471%	16,524%	17,737%	11,674%	13,048%	13,889%	14,363%	14,552%	14,494%	14,209%
255	16,839%	16,901%	18,227%	12,010%	13,449%	14,368%	14,930%	15,224%	15,301%	15,191%
265	17,189%	17,268%	18,690%	19,209%	13,842%	14,827%	15,462%	15,839%	16,014%	16,023%
275	17,545%	19,324%	19,136%	19,772%	14,215%	15,264%	15,963%	16,410%	16,663%	16,761%
285	17,874%	19,830%	19,559%	20,299%	20,464%	15,687%	16,443%	16,948%	17,266%	17,434%
295	18,218%	20,288%	19,976%	20,789%	21,090%	20,871%	16,900%	17,459%	17,831%	18,059%
305	18,532%	20,742%	21,087%	21,262%	21,660%	21,658%	17,343%	17,948%	18,369%	18,647%
315	18,867%	21,157%	21,725%	21,710%	22,187%	22,318%	22,074%	19,873%	19,684%	19,500%
325	19,169%	21,577%	22,278%	22,143%	22,689%	22,911%	22,849%	22,407%	20,582%	20,403%
335	19,481%	21,964%	22,783%	22,825%	23,164%	23,460%	23,511%	23,313%	22,737%	21,269%
345	19,787%	22,349%	23,263%	23,458%	23,624%	23,978%	24,110%	24,043%	23,755%	23,145%
355	20,091%	22,729%	23,715%	24,023%	24,064%	24,470%	24,666%	24,688%	24,543%	24,214%
365	20,389%	23,095%	24,154%	24,547%	24,566%	24,942%	25,190%	25,278%	25,226%	25,038%
375	20,685%	23,460%	24,574%	25,040%	25,149%	25,396%	25,688%	25,829%	25,845%	25,748%
385	20,976%	23,811%	24,987%	25,511%	25,691%	25,837%	26,166%	26,351%	26,420%	26,388%
395	21,265%	24,163%	25,383%	25,962%	26,202%	26,263%	26,626%	26,849%	26,960%	26,980%
405	17,205%	21,752%	23,931%	25,239%	26,100%	26,679%	27,071%	27,326%	27,474%	27,535%
415	17,434%	22,040%	24,255%	25,595%	26,477%	27,083%	27,503%	27,787%	27,966%	28,061%
425	17,662%	22,325%	24,575%	25,938%	26,850%	27,479%	27,923%	28,232%	28,439%	28,564%

Tabelle 30: Einsatzbereiche für n-Pentan, Toluol, MDM, für p<50 bar

P[bar]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
T[°C]										
205	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
235	12,186%	11,555%	11,081%	10,698%	10,369%	-	-	-	-	-
245	13,730%	13,168%	12,659%	12,238%	11,882%	11,568%	11,284%	11,019%	10,769%	10,531%
255	14,921%	14,531%	14,093%	13,677%	13,310%	12,986%	12,693%	12,424%	12,172%	11,938%
265	15,893%	15,650%	15,329%	14,977%	14,632%	14,313%	14,021%	13,752%	13,500%	13,263%
275	16,732%	16,599%	16,385%	16,118%	15,827%	15,537%	15,259%	14,998%	14,752%	14,522%
285	17,483%	17,434%	17,307%	17,120%	16,895%	16,650%	16,402%	16,159%	15,925%	15,701%
295	18,171%	18,190%	18,132%	18,013%	17,850%	17,657%	17,448%	17,234%	17,020%	16,813%
305	18,812%	18,885%	18,885%	18,824%	18,716%	18,573%	18,406%	18,225%	18,037%	17,847%
315	19,414%	19,534%	19,582%	19,570%	19,509%	19,412%	19,285%	19,139%	18,981%	18,816%
325	20,228%	20,147%	20,235%	20,265%	20,246%	20,188%	20,100%	19,987%	19,859%	19,718%
335	21,099%	20,932%	20,767%	20,604%	20,442%	20,280%	20,120%	19,960%	19,801%	19,644%
345	22,030%	21,773%	21,614%	21,456%	21,299%	21,143%	20,987%	20,832%	20,678%	20,524%
355	23,645%	22,840%	22,428%	22,276%	22,124%	21,973%	21,823%	21,673%	21,523%	21,375%
365	24,704%	24,207%	23,604%	23,090%	22,919%	22,773%	22,628%	22,483%	22,338%	22,193%
375	25,542%	25,225%	24,805%	24,335%	23,919%	23,591%	23,405%	23,265%	23,125%	22,986%
385	26,266%	26,059%	25,771%	25,418%	25,042%	24,698%	24,410%	24,170%	23,964%	23,783%
395	26,919%	26,786%	26,588%	26,332%	26,035%	25,726%	25,437%	25,184%	24,966%	24,779%
405	27,522%	27,445%	27,311%	27,126%	26,901%	26,649%	26,390%	26,145%	25,922%	25,724%
415	28,087%	28,054%	27,969%	27,839%	27,671%	27,473%	27,257%	27,037%	26,825%	26,633%
425	28,623%	28,625%	28,579%	28,492%	28,369%	28,217%	28,043%	27,857%	27,667%	27,483%

Tabelle 31: Einsatzbereiche für n-Pentan, Toluol, MDM für p>50 bar

Mit Rekuperator:

 Pentan unterkritisch
 Pentan überkritisch

 Toluol unterkritisch
 Toluol überkritisch

 MDM unterkritisch
 MDM überkritisch

In Abbildung 32 werden die maximalen thermischen Wirkungsgrade der Fluide, die Drücke bei denen sie erreicht werden und der kritische Druck des Mediums miteinander verglichen. Man erkennt die Steigerung von η_{th} durch die Verwendung des Rekuperators. Weiters sieht man, dass der Druck bei dem η_{th} erreicht wird, immer über dem kritischen Druck des jeweiligen Fluids liegt. Bei Pentan und Toluol ohne Rekuperator erkennt man das sehr deutlich, bei MDM liegt er nur wenig darüber.

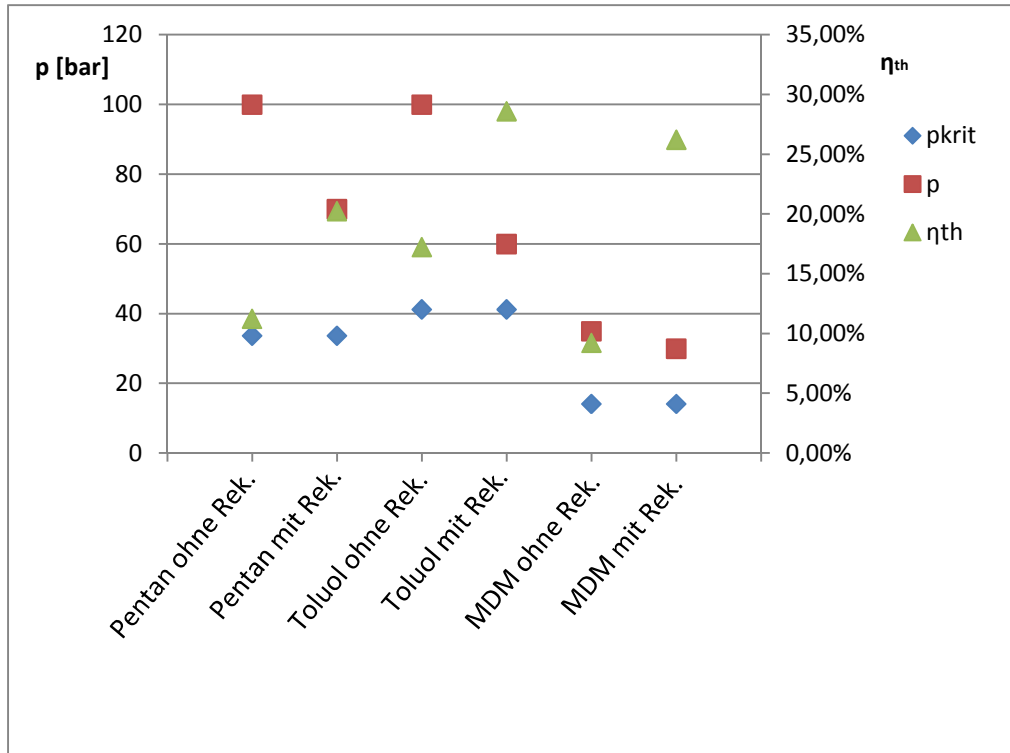


Abbildung 32: Vergleich des maximalen η_{th} , des dazugehörigen Drucks und p_{krit} der jeweiligen Fluide

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im ersten Teil meiner Arbeit sollte der Refprop9 Stoffdatenbank – Prototyp in das verwendete Programm IPSEpro (Version 5) eingefügt werden, da in der im Programm vorhandenen Datenbank, nur wenige für Organic Rankine Cycle verwendbare Stoffe erfasst waren. Zum Abgleich der beiden Datenbanken wurden die Gültigkeitsbereiche der in dieser Arbeit vorkommenden Stoffe betrachtet. Dabei ist festzustellen, dass die neuen Stoffwerte einen größeren Bereich abdecken. Vor allem bei den Stoffwerten von MDM und R245fa, die eine Eigenentwicklung der SimTech GmbH waren, konnten Unterschiede festgestellt werden.

Anschließend wurden verschiedene Kreisläufe eines ORC Prozesses modelliert und mit den Medien n-Pentan, Toluol und MDM mit Hilfe von IPSEpro berechnet. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass durch die Verwendung eines Rekuperators der Wirkungsgrad signifikant gesteigert werden kann. Ein weiterer wichtiger Faktor für die erreichbare Erhöhung ist die Auswahl des Mediums. Während der Wirkungsgrad für n-Pentan, durch den Einsatz des Rekuperators verdoppelt wird, kann er bei MDM, einem sogenannten stark trockenem Medium, sogar verdreifacht werden. Der Vorteil eines Rekuperators nimmt mit zunehmender Temperatur zu, ist aber bei niedrigen Temperaturen wenig bis gar nicht vorhanden.

Des Weiteren ist festzustellen, dass es für jeden Druck bzw. jede Temperatur einen maximalen Wirkungsgrad gibt. Das heißt, dass Druck und Temperatur vor der Turbine beliebig gesteigert werden können, der Wirkungsgrad nach Erreichen seines Maximums aber wieder sinkt. Durch die Verwendung eines Rekuperators kann dieses Maximum in Richtung geringerer Drücke verschoben werden. Daraus kann man schließen, dass durch einen internen Wärmetauscher nicht nur der Wirkungsgrad gesteigert, sondern auch die Anlage bei geringeren Drücken betrieben werden kann. Durch die nicht so hohen Sicherheitsvorkehrungen bei niedrigen Drücken kann die Anlage kostengünstiger ausgeführt bzw. konstruiert werden.

Die hier angenommene Kondensationstemperatur wurde so gewählt, dass die Restwärme noch in ein Fernwärmenetz eingespeist werden kann. Verzichtet man darauf oder speist die Restwärme in ein Niedertemperatur – Nahwärmenetz und senkt die Kondensationstemperatur, kann der Wirkungsgrad dementsprechend gesteigert werden. Aber bei einer Senkung der Kondensationstemperatur auf 50°C beträgt die Erhöhung des Wirkungsgrads 2%.

Der maximale Wirkungsgrad liegt bei allen untersuchten Kreisläufen und Fluiden, unter den gewählten Randbedingungen, im überkritischen Bereich. Beim Betrieb im überkritischen Bereich sollte aber darauf geachtet werden, dass bei zu hohen Drücken die Expansion ins Zweiphasengebiet führen würde.

Der Untersuchung der Medien zeigt zudem, dass die richtige Auswahl des Fluids für die vorhandenen Betriebsparameter sehr wichtig ist, denn dadurch kann der Wirkungsgrad stellenweise um 10%-Punkte gesteigert werden.

Anschließend an diese Arbeit bietet sich eine genaue Untersuchung des Wärmeübergangs im Wärmetauscher im überkritischen Bereich an. Zusätzlich wäre die Ausarbeitung von Kennfeldern möglich. Für jedes Medium könnte aus den Ergebnissen dieser Arbeit ein Modell zur Leistungsoptimierung erarbeitet werden. Damit könnte für vorhandene Frischdampftemperaturen der dazugehörige optimale Frischdampfdruck gewählt werden.

8. Literaturverzeichnis

- Andersen, W. C. (2005). Rapid Screening of Fluids for Chemical Stability in Organic Rankine Cycle Applications. *Ind. Eng. Chem. Res.* (44), S. 5560-5566.
- BMWFJ, & Lebensministerium. (2014). *Energiestrategie Österreich*. Abgerufen am 7. 4 2014 von www.energiestrategie.at
- Bundesregierung, P. u. (2014). www.bundesregierung.de. Abgerufen am 7. 4 2014 von www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/05-kernenergie.html
- Chen, J., Goswami, Y., & Stefanakos, E. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , S. 3059-3067.
- Colonna, P., Nannan, N., Guardone, A., & Lemmon, E. (20. Juni 2006). Multiparameter equations of state for selected siloxanes. *Fluid Phase Equilibria* , 244 (2), S. 193-211.
- Curran, H. M. (Juli 1981). Use of Organic Working Fluids in Rankine Engines. *Journal of Energy* (4), S. 218 - 223.
- Dauderer. (12 1988). www.toxcenter.org. Abgerufen am 28. 2 2014 von <http://toxcenter.org/stoff-infos/p/n-pentan.pdf>
- Dauderer. (12 1988). www.toxcenter.org. Abgerufen am 4. 4 2014 von <http://www.toxcenter.org/stoff-infos/p/i-pentan.pdf>
- Drescher, B. (2007). Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power plants. *Applied Thermal Engineering* 27 , S. 223-228.
- Europäisches Parlament, E. (16. September 2009). Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen.
- Haider, P. M. (2010). *Angewandte Thermodynamik, Institut für Energietechnik und Thermodynamik TU Wien*. Wien: Eigenverlag.
- Honeywell. (8. 11 2010). www.tega.de. Abgerufen am 3. 3 2014 von http://www.tega.de/uploads/downloads/R245fa_nov0.pdf
- <http://www.bios-bioenergy.at>. (kein Datum). Abgerufen am 24. Februar 2014 von http://www.bios-bioenergy.at/uploads/pics/admont2_02.jpg
- Huber, M., & Ely, J. (1994). predictive extended corresponding states model for pure and mixed refrigerants including an equation of state for R134a. *International Journal of Refrigeration* , 17 (1), S. 18-31.

IFA, I. f. (29. 3 2014). *GESTIS-Stoffdatenbank*. Abgerufen am 5. 3 2014 von <http://gestis.itrust.de:www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank>

IPSEpro. (2014).

Karellas, S., & Schuster, A. (9 2008). Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications. *Int. Journal of Thermodynamics Vol.11* , S. 101-108.

Lemmon, E., & Span, R. (11. April 2006). Short Fundamental Equations of State for 20 Industrial Fluids. *Journal of Chemical & Engineering Data* , 51 (3), S. 785-850.

Maizza, V., & Maizza, A. (1996). Working fluids in non-steady flows for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering* , 16, S. 579-590.

McMahan. (2006). Design & Optimization of Organic Rankin Cycle Solar Thermal Powerplants. 8. University of Wisconsin-Madison.

National Center for Biotechnology Information. (2014). *National Center for Biotechnology Information*. Abgerufen am 4. 4 2014 von pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary/summary.cgi?cid=10041&loc=ec_rcs#x291

NIST. (2010). *Standard Reference Database*. Abgerufen am 16. 4 2014 von <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>

NIST. (1 2014). *www.nist.gov*. Abgerufen am 6. 3 2014 von http://www.nist.gov/public_affairs/general_information.cfm

Obernberger, I., Hammerschmid, A., & Bini, R. (2001). Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses - EU-Thermie-Projekt Admont (A). *Tagungsband zur VDI-Tagung „Thermische Nutzung von fester Biomasse“* (S. 283-302). Salzburg: VDI-Gesellschaft Energietechnik.

Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (30. 1 2006). *www.ibo.at*. Abgerufen am 3. 3 2014 von IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie: <http://www.ibo.at/documents/merktoluol.pdf>

PanGas. (12. 4 2013). *www.pangas.ch*. Abgerufen am 3. 3 2014 von [http://www.pangas.ch/international/web/lg/ch/likeIgchpangasde.nsf/repositorybyalias/pangas_sdb_R245fa/\\$file/pangas_sdb_r245_-fa-1-1-1-3-3-pentafluorpropan_d.pdf](http://www.pangas.ch/international/web/lg/ch/likeIgchpangasde.nsf/repositorybyalias/pangas_sdb_R245fa/$file/pangas_sdb_r245_-fa-1-1-1-3-3-pentafluorpropan_d.pdf)

Preißinger, W. (2011). Supercritical ORC for waste heat recovery at high temperatures.

Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., & Fischer, J. (Juli 2007). Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy* , 32 (7), S. 1210-1221.

Sigma-Aldrich. (17. 9 2012). *sigma-aldrich.com*. Abgerufen am 3. 3 2014 von <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=DE&language=de&brand=FLUKA&productNumber=74815>

SimTech. (2011). IPSEpro User Documentation v5.0. Graz.

Turboden s.r.l. (2014). *Turboden: Der Rankine Cycle*. Von <http://www.turboden.eu/de/rankine/rankine-history.php> abgerufen

Umweltbundesamt. (2014). www.umweltbundesamt.at/. Abgerufen am 28. 2 2014 von http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/schadstoff/schadstoffe_einleitung/silox/

VDI. (1997). VDI Wärmeatlas Tabellenteil, 8. Auflage. (V. D. Ingenieure, Hrsg.) Springer Verlag.

Yamamoto, T., Furuhashi, T., Arai, N., & Mori, K. (2001). Design and testing of the organic Rankine cycle. *Energy*, 26 (3), S. 239-251.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ORC Anlage bei der Anlieferung in Admont (http://www.bios-bioenergy.at).....	3
Abbildung 2: ORC Kreislauf (Saleh, Koglbauer, Wendland, & Fischer, 2007).....	5
Abbildung 3: T-s Diagramm (Haider, 2010).....	6
Abbildung 4: Vergleich Carnot - Rankine Prozess [abgeänderte Darstellung (Haider, 2010)].....	6
Abbildung 5: Ts-Diagramm ohne und mit (strichlierte Linie) Überhitzung [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)].....	8
Abbildung 6: Vergleich T-s Diagramm Wasser und organisches Medium, [Abgeänderte Darstellung (Karellas & Schuster, 2008)].....	9
Abbildung 7: Ts-Diagramm. Vergleich Über- und Unterkritischer Prozess. [Abgeänderte Darstellung (Karellas & Schuster, 2008)].....	10
Abbildung 8: Darstellung der maximalen Entropie [Abgeänderte Darstellung (Preißinger, 2011)].....	10
Abbildung 9: T-s Diagramm Wasser [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)]..	12
Abbildung 10: T-s Diagramm Toluol [Abgeänderte Darstellung (McMahan, 2006)]..	13
Abbildung 11: Abbau von n-Pentan bei 315°C (Andersen, 2005).....	15
Abbildung 12: Die Systemarchitektur von IPSEpro (SimTech, 2011).....	20
Abbildung 13: verwendete Komponenten aus der Low Temperature Process Library (SimTech, 2011).....	22
Abbildung 14: Expansion in einer einfachen Turbinenstufe (IPSEpro).....	24
Abbildung 15: ORC Prozess ohne Rekuperator (IPSEpro).....	31
Abbildung 16: ORC Prozess mit Rekuperator (IPSEpro).....	31
Abbildung 17: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Pentan, ohne Rekuperator.....	35
Abbildung 18: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Pentan, ohne Rekuperator.....	36
Abbildung 19: Steigung der Enthalpiedifferenzen für 20 bar.....	37
Abbildung 20: optimaler therm. Wirkungsgrad über den berechneten Druckbereich, Pentan, ohne Rekuperator.....	37
Abbildung 21: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Pentan, mit Rekuperator.....	41

Abbildung 22: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Pentan, mit Rekuperator..... 42

Abbildung 23: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Toluol, ohne Rekuperator..... 46

Abbildung 24: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Toluol, ohne Rekuperator..... 46

Abbildung 25: optimaler thermischer Wirkungsgrad über den berechneten Druckbereich, Toluol NIST, ohne Rekuperator..... 47

Abbildung 26: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , Toluol NIST, mit Rekuperator..... 52

Abbildung 27: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , Toluol NIST, mit Rekuperator..... 52

Abbildung 28: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , MDM, ohne Rekuperator..... 58

Abbildung 29: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , MDM, ohne Rekuperator..... 58

Abbildung 30: thermischer Wirkungsgrad für $T = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von p , MDM, mit Rekuperator..... 62

Abbildung 31: thermischer Wirkungsgrad für $p = \text{konst.}$ in Abhängigkeit von T , MDM, mit Rekuperator..... 62

Abbildung 32: Vergleich des maximalen η_{th} , des dazugehörigen Drucks und p_{krit} der jeweiligen Fluide..... 68

10. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Gültigkeitsbereich MDM.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 2: Gültigkeitsbereich Pentan.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 3: Gültigkeitsbereich Neopentan.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 4: Gültigkeitsbereich Isopentan.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 5: Gültigkeitsbereich R245fa.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 6: Gültigkeitsbereich Toluol.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 7: Enthalpie-Differenz NIST, MDM.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 8: Enthalpie-Differenz Datenbank Alt, MDM.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 9: Prozentualer Unterschied der beiden Datenbanken für MDM.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 10: Prozentualer Unterschied der beiden Datenbanken für R245fa.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 11: Vergleich der Enthalpiedifferenzen von Pentan, Toluol, Isopentan und Neopentan.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 12: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, Pentan NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 13: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, Pentan NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 14: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, Pentan.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 15: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, Pentan, mit Rekuperator.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 16: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, Pentan mit Rekuperator.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 17: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, Toluol, NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 18: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, Toluol NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 19: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, Toluol.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 20: thermischer Wirkungsgrad für $p < 5$ bar, Toluol NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabelle 21: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, Toluol NIST, mit Rekuperator.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 22: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, Toluol NIST, mit Rekuperator.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 23: thermischer Wirkungsgrad für $p < 5$ bar, Toluol NIST, mit Rekuperator.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabelle 24: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, MDM NIST, ohne Rekuperator.....</i>	<i>56</i>

Tabelle 25: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, MDM NIST, ohne Rekuperator 57

Tabelle 26: maximaler überkritischer Druck für ausgewählte Temperaturen, MDM . 59

Tabelle 27: thermischer Wirkungsgrad für $p < 50$ bar, MDM NIST, mit Rekuperator 60

Tabelle 28: thermischer Wirkungsgrad für $p > 50$ bar, MDM NIST, mit Rekuperator 61

Tabelle 29: thermischer Wirkungsgrad für $p < 5$ bar, MDM NIST, mit Rekuperato... 63

Tabelle 30: Einsatzbereiche für n-Pentan, Toluol, MDM, für $p < 50$ bar 66

Tabelle 31: Einsatzbereiche für n-Pentan, Toluol, MDM für $p > 50$ bar 67