

e!Mission.at

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

16/01/2016

Projekttitel:

RaCiA – Rankine Cycle für industrielle
Abwärmen

Projektnummer: 843.891

Ausschreibung	4. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01/06/2014
Projektende	30/11/2015
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	18 Monate
Projektnehmer (Institution)	Forschung Burgenland GmbH
Ansprechpartner	Jürgen Krail
Postadresse	Steinamangerstraße 21, A-7423 Pinkafeld
Telefon	+43 (5) 7705 - 5432
Fax	+43 (5) 7705 - 1299
E-Mail	juergen.krail@forschung-burgenland.at
Website	www.forschung-burgenland.at

RaCiA

Rankine Cycle für industrielle Abwärmen

AutorInnen:

Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Dr. Beckmann
Georg Beckmann

Forschung Burgenland GmbH
Jürgen Krail
Doris Rixrath

Fachhochschule Burgenland GmbH
Richard Krotil

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung und Zielsetzung des Projekts RaCiA.....	7
2 Energieeinsatz in der Zementindustrie	8
2.1 Energieeinsatz und spezifische Kennzahlen der Österreichischen Zementindustrie.....	8
2.2 Abwärmenutzung	9
3 Stromerzeugung aus Abwärme	12
3.1 Stromerzeugung aus industriellen Abwärmern	12
3.2 Stromerzeugung aus der Abluft in der Zementindustrie	13
3.2.1 Prozessparameter in der Zementindustrie.....	13
3.2.2 Marktüberblick Abwärmenutzung in Zementanlagen	15
4 Kreisprozesse zur Stromproduktion aus Niedertemperatur-wärme.....	18
4.1 Der Wasser/Dampf Kreisprozess	18
4.2 Der ORC- Kreisprozess.....	20
4.2.1 Unterkritischer ORC- Kreisprozess.....	20
4.2.2 Die neueste ORC-Technologie.....	21
4.3 Der KALINA Kreisprozess	23
4.4 Der Flash-Prozess im Bereich der geothermischen Stromerzeugung.....	25
5 Ökologische Prozessbewertung.....	30
5.1 LCA Zementindustrie.....	30
5.2 LCA Nutzung industrieller Abwärme	31
5.3 LCA Energiesysteme / Komponentenbewertung	31
6 Patentrecherche.....	33
6.1 Patentrecherche zu Projektbeginn.....	33
6.2 Patentrecherche zu Projektende	33
7 Thermodynamische Betrachtung	34
7.1 Prozesssimulation und -analyse	34
7.2 Prozessbedingungen.....	34
7.3 Komponentenbeschreibung.....	34
7.3.1 Abhitzeessel und Wärmetauscher	34
7.3.2 Pumpe.....	35
7.3.3 Ventilator.....	35
7.3.4 Generator.....	36
7.3.5 Antriebsmotor	36
8 Innovativer Dampfprozess RaCiA	37
8.1 Prozessbeschreibung.....	37
8.2 Morphologische Matrix zur Variantenauswahl	38
8.2.1 Allgemeines und Aufstellen der Morphologischen Matrix.....	38
8.2.2 Morphologische Matrix für konventionelle Dreidruckprozesse	40
8.2.3 Morphologische Matrix für den innovativen Dreidruckprozess	43

8.2.4	Lastanpassung	44
8.2.5	Wärmeauskopplung	46
8.2.6	Fazit	47
8.3	Prozessspezifische Komponentenbeschreibung	48
8.3.1	Kondensatableiter	48
8.3.2	Dampfturbine.....	50
8.4	Basisauslegung und Parametervariation	54
9	Vergleichsprozess Eindruck- Wasserdampfprozess.....	61
9.1	Prozessbeschreibung	61
9.2	Prozessspezifische Komponentenbeschreibung	62
9.2.1	Dampfturbine.....	62
9.2.2	Dampftrommel.....	62
9.3	Basisauslegung und Parametervariation	62
10	Vergleichsprozess ORC- Prozess.....	67
10.1	Prozessbeschreibung	67
10.2	Prozessspezifische Komponentenbeschreibung	69
10.2.1	Dampfturbine.....	69
10.2.2	Pumpe.....	70
10.3	Basisauslegung und Parametervariation.....	70
11	Vergleichsprozess überkritischer CO ₂ - Prozess.....	74
11.1	Prozessbeschreibung	74
11.2	Prozessspezifische Komponentenbeschreibung	76
11.2.1	Turbine.....	76
11.2.2	Verdichter.....	76
11.3	Basisauslegung und Parametervariation.....	76
12	Vergleich innovativer Dampfprozess mit konkurrierenden Prozessen	81
12.1	Prozessvergleich	81
12.2	Bereitgestellte Energiemengen	84
13	Sicherheitstechnische Fragestellungen beim innovativen Dampfprozess.....	85
13.1	Allgemeines	85
13.2	Notwendigkeit eines Abluft-Bypasses	85
13.3	Anforderungen druckführende Behälter	85
13.4	Fazit.....	86
14	Betrachtung der Umweltauswirkungen.....	87
14.1	Einleitung/Allgemeines Ökobilanz	87
14.2	Ziel und Rahmenbedingungen	88
14.2.1	Ziel	88
14.2.2	Systembeschreibung / Systemgrenzen	88
14.2.3	Funktionelle Einheit.....	89
14.3	Sachbilanz	89

14.3.1	Allokation und Vereinfachungen (Abschneidekriterien).....	89
14.3.2	Daten (Materialien und Arbeitsmedien)	89
14.4	Innovativer Dampfprozess RaCiA	90
14.4.1	Herstellung der Komponenten	90
14.4.2	Betrieb inkl. Wartung	92
14.4.3	Entsorgung	93
14.5	ORC- Prozess.....	93
14.5.1	Herstellung der Komponenten	94
14.5.2	Betrieb inkl. Wartung	95
14.5.3	Entsorgung	95
14.6	Wirkungsbilanz	95
14.6.1	Ergebnisse RaCiA Prozess	96
14.6.2	Ergebnisse ORC- Prozess	97
14.6.3	Ergebnisse – Vergleich RaCiA Prozess zu ORC- Prozess	97
14.7	Schlussfolgerungen	100
15	Ökonomische Betrachtung.....	101
15.1	Ökonomische Betrachtung RaCiA Prozess	101
15.2	Ökonomische Betrachtung Vergleichsprozesse	102
15.2.1	ORC-Anlage in der Zementindustrie.....	102
15.2.2	Wärmerückgewinnungs-Anlage in der Zementindustrie	103
15.2.3	Geothermische Kraftwerke	104
16	Zusammenfassung und Ausblick	106
Anhang.....		108
A 1	Detaillierte Patentrecherche	108
A.1.1	Detaillierte Patentrecherche zu Projektbeginn	108
A.1.2	Detaillierte Patentrecherche zu Projektende	109
A 2	Literaturverzeichnis	110
A 3	Abbildungsverzeichnis	116
A 4	Tabellenverzeichnis.....	120
Kontaktdaten		122

1 Einleitung und Zielsetzung des Projekts RaCiA

Abwärmenutzung, insbesondere durch Verstromung, ist heute ein wichtiges Thema zur Energieeffizienzsteigerung und Treibhausgasreduktion. Energierückgewinnungsanlagen, die nach dem Prinzip der Wärmekraftmaschine funktionieren, wie Dampfkraft- und ORC-Prozesse, Stirling-Motoren usw. wurden hierfür entwickelt und stehen teilweise schon seit geraumer Zeit zur Verfügung. Trotzdem ist die breite Umsetzung der Abwärmenutzung durch Verstromung in der Industrie noch nicht in Schwung gekommen.

Für industrielle Abwärmen aus Abgas, Abluft und Druckluft im Temperaturbereich von 140-550 °C wird im Projekt RaCiA ein innovativer Dampf-Rankine-Cycle vorgeschlagen, welcher bei der Dreidruckdampf-Erzeugung sowie der -Turbine unkonventionelle Wege geht und Vorteile gegenüber dem Organic-Rankine-Cycle als Benchmark bezüglich der Energie- und Kosten-Effizienz, der Akzeptanz, der Nachhaltigkeit und des Replikationspotentials erwarten lässt. Ausgehend vom Beispiel der Stromerzeugung aus der Abluft von Klinkerkühlern in der Zementindustrie stecken thermodynamische Variantenstudien und Optimierungen sowie anlagentechnische Engineering-Arbeiten die Potentiale ab und sollen zu belastbaren Auslegungen und Vorteilen führen sowie den Bedarf der weitergehenden Industriellen Forschung festlegen. Verglichen mit der Benchmark sind um 12-15 % höhere Stromausbeuten sowie signifikante Kostensenkungen realistisch und ein günstigeres Ergebnis der Life Cycle Analysis wahrscheinlich. Mit Hilfe dieser ökologischen Validierung werden Verfahren auf ihre Sinnhaftigkeit überprüft. Die Replizierbarkeit gründen sich u.a. darauf, dass die vorgeschlagene Technologie mehrere Abwärmequellen (prozessinterner oder hybrider Herkunft) gleichzeitig nutzen kann. Die einjährige Sondierung bereitet eine industrielle Forschung mit Blick auf weitere Kooperationspartner aus dem Feld der Betreiber, der Komponentenhersteller, der Anlagenbauer vor. Angestrebt werden Erkenntnisse über das validierte Design-Konzept für den beschriebenen Prozess, gesicherte Aussagen über Effizienzsteigerung und Wirtschaftlichkeit sowie über die Beschaffbarkeit der Komponenten. Konkrete Rahmenbedingungen für eine weitere Industrielle Forschung und letztlich über die sinnvolle Vermarktung runden das Ergebnis ab.

2 Energieeinsatz in der Zementindustrie

2.1 Energieeinsatz und spezifische Kennzahlen der Österreichischen Zementindustrie

Der Gesamtenergiebedarf der Österreichischen Zementwerke beträgt im Jahr 2007 4.600 GWh, 4.012 GWh davon fallen auf thermische Energie (siehe Abbildung 2-1), 588 GWh auf elektrische Energie. Das Nutzbare Abwärmepotenzial der Österreichischen Zementindustrie wird in einer Auftragsstudie der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie mit 419 GWh (ca. 10.5% des Brennstoffenergieeinsatzes) beziffert. (Berger, et al., o.J.)

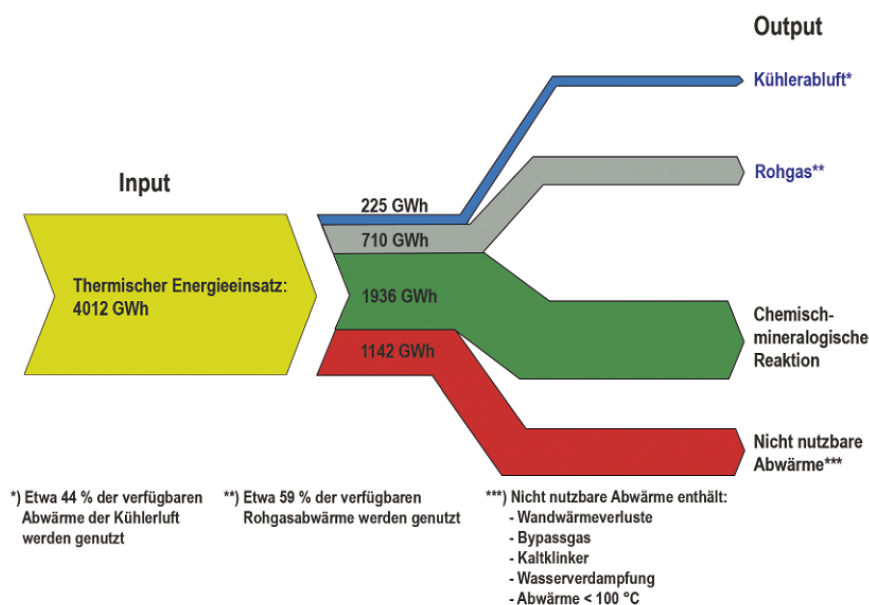


Abbildung 2-1: Energiebilanz der Österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007 (Berger, et al., o.J.)

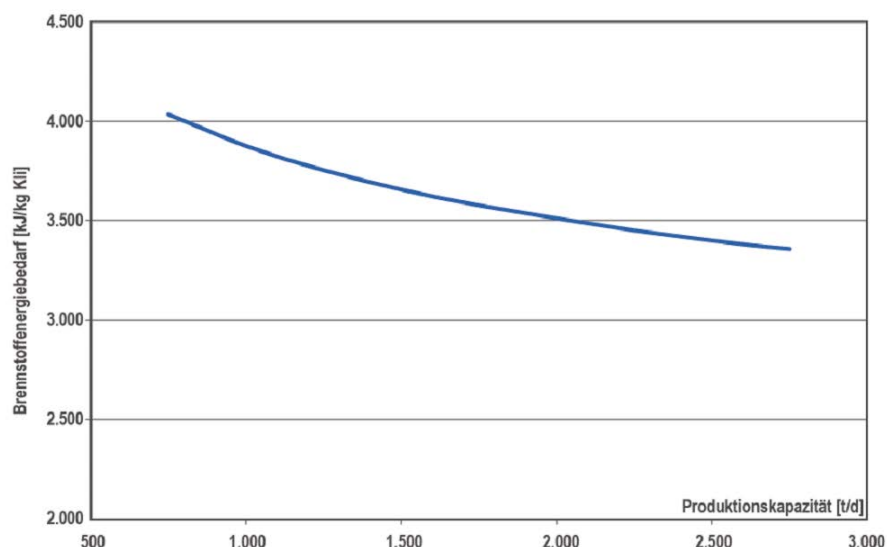
Im Bereich der Abwärmeverwertung wird die ORC- Technologie als derjenige Prozess mit dem höchsten Potenzial von ca. 49 GWh und einer Amortisationszeit von 9 Jahren genannt. Optimierungsmöglichkeiten mit statischen Amortisationszeiten kleiner 3 Jahre werden aus wirtschaftlich umsetzbar beurteilt, weswegen die Abwärmenutzung mittels ORC zum gegenwärtigen Zeitpunkt als unwirtschaftlich gilt. (Berger, et al., o.J.)

Im Rahmen der genannten Studie wurden neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie drei Mahlwerke für Zement und eine Umladestation für Zement analysiert. Auf Basis einer Erhebung aus dem Jahr 2007 können folgende Branchenkennzahlen gemäß Tabelle 2-1 für die in Österreich betriebenen Zementwerke (ohne Zementmahlwerke) angegeben werden. (Berger, et al., o.J.)

Tabelle 2-1: Branchenkennzahlen der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)

Kennwert	Mittelwert	Einheit
Energiebedarf, Strom	113	kWh/t _{Zement}
Energiebedarf, Brennstoff	3.618	kJ/kg _{Klinker}
Energiebedarf, Brennstoff	2.776	kJ/kg _{Zement}
Energiebedarf, gesamt	3.183	kJ/kg _{Zement}
Ersatzbrennstoffe als Anteil des gesamten thermischen Energieeinsatzes	46	%
Rohmehl/Klinker-Faktor	1,58	kg _{Rohmehl} /kg _{Klinker}
Klinker/Zement-Faktor	0,73	kg _{Klinker} /kg _{Zement}
spez. CO ₂ - Emissionen	0,81	kg _{CO2} /kg _{Klinker}

Die mittlere erzeugte Klinkermenge der in Österreich betriebenen Zementwerke beträgt 1.450 t_{Klinker}/d je Drehrohrofenanlage mit einer Schwankungsbreite von 700 t_{Klinker}/d – 3.000 t_{Klinker}/d. Aus der Analyse von Istdaten ist ersichtlich, dass der spezifische Brennstoffenergiebedarf mit steigender Produktionskapazität abnimmt (siehe Abbildung 2-2). Der Grund dafür liegt in den höheren spezifischen Wärmeverlusten des Drehrohrofens und ggf. Calzinators. (Berger, et al., o.J.)

**Abbildung 2-2: Brennstoffenergiebedarf in Abhängigkeit der Produktionskapazität (Berger, et al., o.J.)**

2.2 Abwärmenutzung

Eine Abwärmenutzung zur Versorgung von Wärmeverbrauchern mittels Fernwärmenetz wurde mit Stand 2007 nur in einem Zementwerk (Standort Kirchdorf) realisiert. An diesem Standort werden ca. 10 GWh/a an Wärme ins Fernwärmenetz eingespeist und damit u.a. ein Einkaufszentrum und ein Krankenhaus versorgt. (Berger, et al., o.J.) Eine Abwärmenutzung durch Verstromung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt in keinem der Österreichischen Standorte im Einsatz.

Die Abwärme aus dem Rohgas wird primär zur Trocknung des Rohmaterials verwendet. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Rohmaterialfeuchte und genutztem Abwärmepotenzial aus dem Rohgas, gemäß Abbildung 2-3.

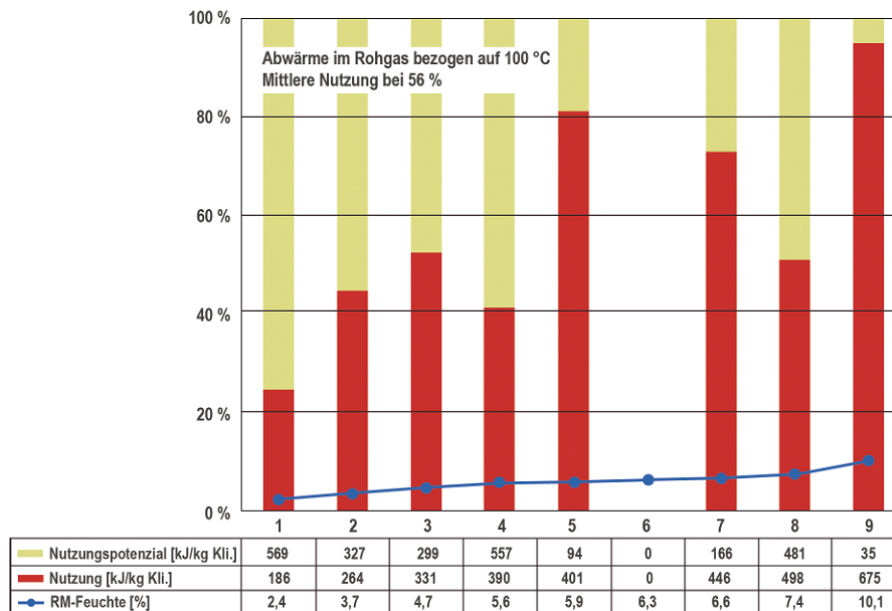


Abbildung 2-3: Abwärme im Rohgas – Nutzung und verbleibendes Potenzial sowie Rohmaterialfeuchte (Berger, et al., o.J.)

Die Rückgewinnung der Abluftwärme des Klinkerkühlers ist ein wesentlicher Faktor für den Energieverbrauch einer Drehrohrofenanlage. Diese Abluft kann unter gewissen Umständen zum Trocknen, zur Rekuperation in Heizanlagen oder zur Verstromung genutzt werden. Im Gegensatz zu Rostkühlern, kann bei Satellitenkühlern bauartbedingt keine Abwärmenutzung erfolgen, da die gesamte Abluft durch den Kühler in den Drehrohrofen geführt wird. (Berger, et al., o.J.)

Abbildung 2-4 zeigt die Energiebilanz nach tatsächlicher Nutzung und Nutzungspotenzial der Österreichischen Zementindustrie mit Stand 2007. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Abwärme bis zu einem Temperaturniveau von 100 °C genutzt werden kann.

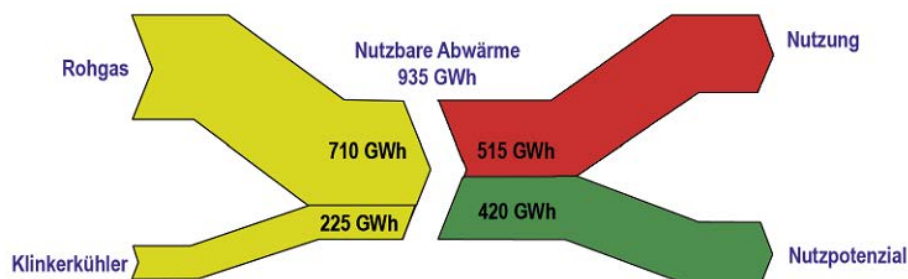


Abbildung 2-4: Nutzpotenzial und Nutzung von Abwärme in der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)

Aufgeschlüsselt nach unterschiedlichen Standorten in Österreich, ergibt sich für das Abwärmepotenzial das folgende Bild (siehe Abbildung 2-5). Die Primärachse zeigt dabei die Abwärmeleistung, die Sekundärachse, das Abwärmepotenzial unter Berücksichtigung der Vollaststunden der Anlage.

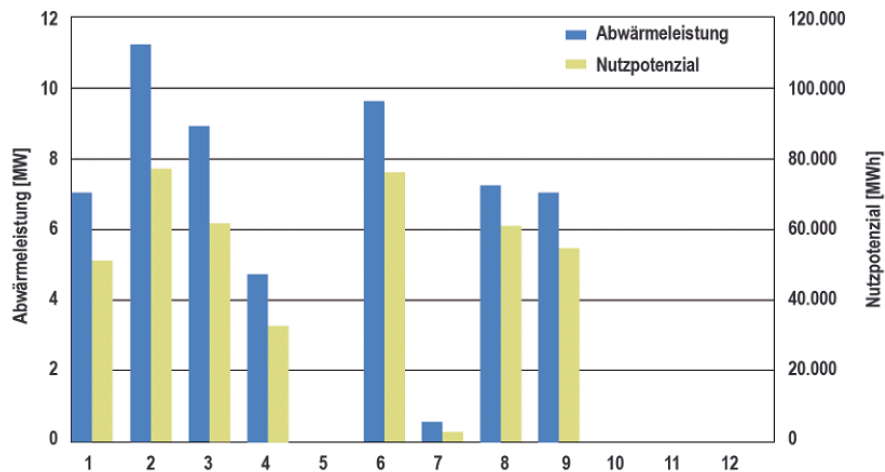


Abbildung 2-5: Abwärme an den Standorten der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)

In der Studie der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.), wird der ORC- Prozess mit einem elektrischen Wirkungsgrad zwischen 15 % – 23 % als „Best Available Technology (BAT)“ angesehen. Unter Berücksichtigung des Standes der Technik zum Zeitpunkt der Studie, wurden die installierbaren Leistungen sowie das Potenzial an elektrischer Energie von ORC- Anlagen für die Österreichischen Standorte ermittelt (siehe Abbildung 2-6). Unter den zu diesem Zeitpunkt geltenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird bei allen Anlagen von einer Amortisationszeit größer 5 Jahre ausgegangen.

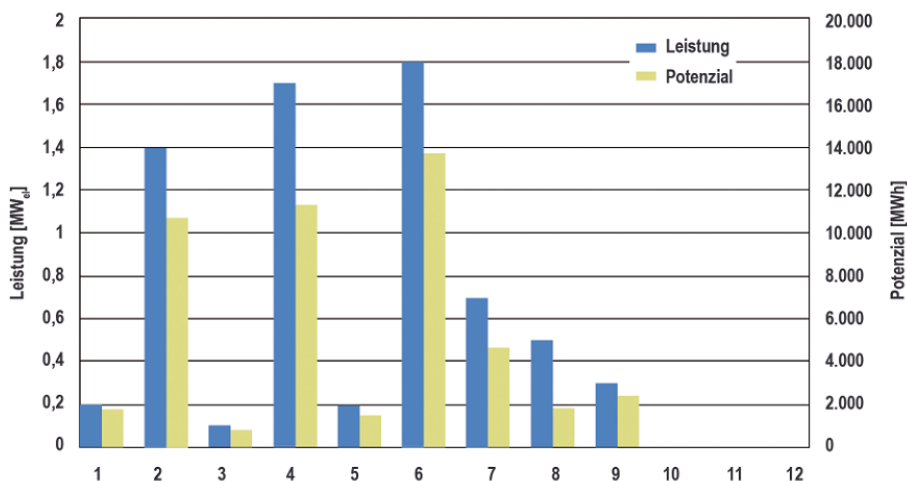


Abbildung 2-6: Potenzial ORC- Prozess in der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)

3 Stromerzeugung aus Abwärme

3.1 Stromerzeugung aus industriellen Abwärmern

Eine ausführliche deutsche Studie über die Nutzung industrieller Abwärmern (Pehnt, et al., 2010) listet Prozesse und Maßnahmen für verschiedene Industrie-Branchen auf (Tabelle 3-1); bei Temperaturen über 140 °C wird ein technisch-wirtschaftliches Nutzungspotenzial gesehen und die zur Verfügung stehende Abwärme wird mit 316 PJ/a angegeben (Pehnt, et al., 2010).

Tabelle 3-1: Beispiele für industrielle Abwärmenutzung, nach (Pehnt, et al., 2010)

Branche	Beschreibung des Prozesses	Beispielhafte Maßnahmen
Lebensmittelindustrie	Abgase eines Produktionsprozesses gelangen in eine thermische Nachverbrennung, in der unverbrannter Kohlenstoff und Luftschadstoffe verbrannt werden.	Einbau von Abgas/Wasser-Wärmetauschern in die Abgasstränge der einzelnen Prozesse.
Waschmittelproduktion	Bei der Herstellung von pulverförmigen Waschmitteln durch Dampftrocknung fällt Abwärme an.	Der Großteil der Kondensationswärme des Trocknungsprozesses wird über einen Wärmetauscher an die Fernwärme abgegeben.
Lebensmittelindustrie	Kältebereitstellung zur Kühlung von Lebensmitteln	Abwärme der Kältemaschinen wird mittels Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gehoben; Wärme wird an das Fernwärmenetz weitergegeben.
Textilindustrie/Wäschereien	Dampf zur Kondensation im Waschprozess	In einem Sammelbecken werden warme Abwässer zusammengeführt, die zur Erwärmung des enthärteten Frischwassers durch einen speziellen Abwasserwärmetauscher genutzt werden.
Automobilindustrie	Abwärme aus diversen Prozessen	Die Abwärme der Kompressoren wird im Rücklauf der Warmwasserversorgung genutzt.
Kläranlage	Abführung warmen Abwassers	Einbau eines neuen Kanals, in dem ein Abwasserwärmetauscher integriert wurde.
Gießerei	Abwärme aus Hauptschmelz- und Prozessöfen	Einbau eines Abgas/Wasser-Wärmetauschers in den Hauptkanal und Einspeisung in ein Nahwärmenetz
Lackiererei	Mit der thermischen Nachverbrennung werden Lösemitteldämpfe, welche aus der Lackieranlage bzw. Trocknungsräumen abgesaugt werden, verbrannt.	Das Abgas der thermischen Nachverbrennung wird per Abgas/Wasser-Wärmetauscher abgekühlt. Abwärme wird direkt über die am Rande des Werkgeländes gelegene Fernwärmeheizzentrale in das Fernwärmenetz eingespeist.
Zementindustrie	Abwärme aus der Klinkerkühlanlage	Stromerzeugung mit ORC-Prozess
Metallverarbeitende Industrie	Abgaswärme im Schmelzofen	Stromerzeugung mit ORC-Prozess
Verpackungsindustrie	Abwärme aus diversen Prozessen	Abwärme wird mit Prozessdampf vorgeheizt und ins Fernwärmenetz eingespeist
Stahlindustrie	Abwärme aus Öfen	Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.
Lebensmittelindustrie	Abwärme aus Kühlprozessen	Gasmotor-Wärmepumpe heizt Kühlturmwasser vor; Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.
Chemieindustrie	Abwärme aus Schwefelsäureanlage	Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.

Für Abgas- und Abluftströme wird die Stromerzeugung angeführt und - typisch für europäische Verhältnisse - der Organic RANKINE Cycle (ORC) als Umwandlungs-Technologie genannt. Im betrachteten Bereich der Eintrittstemperaturen unter 550 °C zeigt der einfache, konventionelle Eindruck-Dampfkreislauf effizienzmäßige Schwächen, weshalb in diesem Bereich auch Kreisläufe mit anderen Kreislaufmedien Platz ergriffen haben. Folgende Prozesse sind Stand der Technik bzw. Stand des Wissens:

- Der Organic RANKINE Cycle
- Der KALINA-Cycle
- Der herkömmliche Dampfprozess.

3.2 Stromerzeugung aus der Abluft in der Zementindustrie

3.2.1 Prozessparameter in der Zementindustrie

Die verwertbare Prozessabwärme fällt zum Großteil im Bereich Kühlerabluft sowie im Rohgas an. Die Primäre Verwertung nutzbarer Abwärme erfolgt zur Trocknung der Zementrohstoffe in Mahltrocknungsanlagen. Zusätzlich kann nutzbare Abwärme prozessintern zur Trocknung von Hüttensand oder Rohkohle verwendet werden. Für die Verstromung können prinzipiell folgende Abwärmequellen genutzt werden (Berger, et al., o.J.):

- Abluft aus Klinkerkühler
- Abgas aus Wärmetauscher vor dem Ofen
- Abgas aus Chlorbypass

Die Abluft des Klinkerkühlers eignet sich zur Wärmerückgewinnung auf Grund der günstigen Prozesstemperaturen. Bei neueren Anlagen mit Mittenluftentnahme kann ohne signifikante Veränderung der Prozessparameter die Ablufttemperatur des Klinkerkühlers in diesem Bereich von 250 °C auf 450 °C gehoben werden. (Harder, 2013)

Die Abgastemperatur des Wärmetauschers vor dem Ofen ist von der Anzahl der Zyklonstufen des Zyklonvorwärmers abhängig, welche im Zusammenhang mit der Rohmaterialfeuchte steht (siehe Tabelle 3-2). Die meisten Anlagen verwenden 5-stufige Wärmetauscher. (Harder, 2013)

Tabelle 3-2: Erforderliche Wärmeenergie für Ofensysteme, nach Harder (2013)

Rohmaterial Feuchte [%]	Anzahl an Zyklonstufen	Spezifischer Wärmehalt [kJ/kg]	Austritts-temperatur [°C]
< 6	6	3.000 – 3.400	220 – 280
6 – 8	5	3.100 – 3.500	260 – 320
8 – 12	4	3.200 – 3.600	300 – 360
> 12	3	3.400 – 3.800	340 – 460

Die Abbildung 3-1 zeigt eine Beispielrechnung für die aus Klinkerkühlluft und Ofenabgas entnehmbaren Wärmemengen. In diesem Fall ist die Wärmemenge aus dem Kühler größer als jene des Ofenabgases,

da rund $400 \text{ kJ/kg}_{\text{Klinker}}$ für Trocknungszwecke bereitgestellt werden. Inkl. Kühlerabluft stehen $600 \text{ kJ/kg}_{\text{Klinker}}$ an Wärme für den Abhitzekeessel zur Verfügung was bei einem Anlagenwirkungsgrad von 25 % $41,7 \text{ kWh/t}_{\text{Klinker}}$ an elektrischer Energie bedeutet (vgl. Abbildung 3-3). (Harder, 2013)

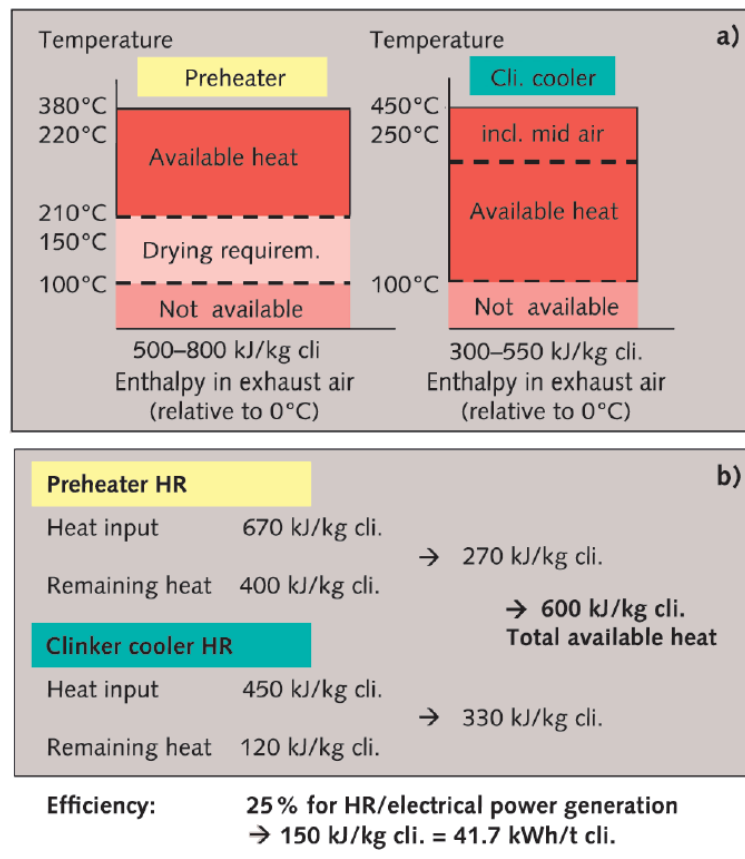


Abbildung 3-1: Spannweiten der Prozessparameter für Wärmerückgewinnungsanlagen in der Zementindustrie (Harder, 2013)

Die Abbildung 3-2 zeigt mögliche Anlagenleistungen in Abhängigkeit der Prozessparameter Abluftvolumenstrom und –temperatur für unterschiedliche Industriezweige.

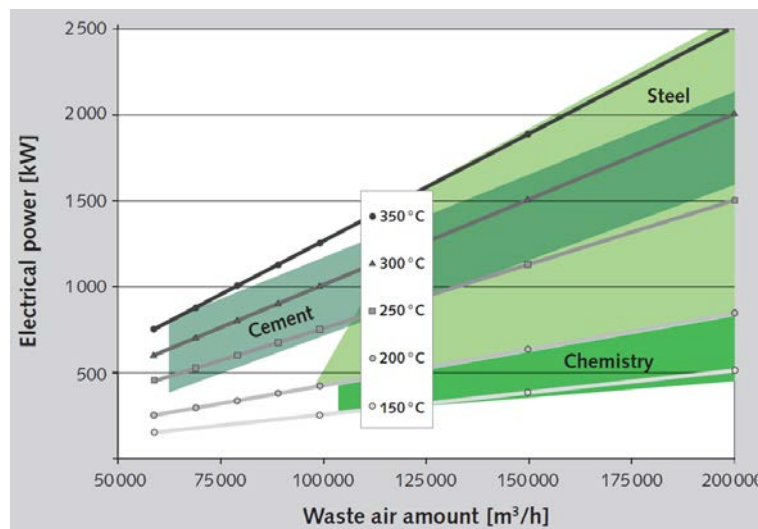


Abbildung 3-2: Mögliche Anlagenleistungen in Abhängigkeit von Prozessparametern (Harder, 2011)

In Abbildung 3-2 sind erzielbare Anlagenleistungen der Klinkerkapazität dargestellt. Die Österreichischen Zementwerke liegen mit einer Produktionskapazität von 700 – 3.000 $t_{\text{Klinker}}/\text{d}$ (Berger, et al., o.J.) im unteren Bereich des Diagramms. Unter der Annahme einer durchschnittlich erforderlichen elektrischen Antriebsleistung von 110 kWh/ t_{Zement} und einem Klinkerfaktor von 0,75 können ca. 20 – 31% der benötigten Energie für die Zementerzeugung aus Abwärme produziert werden (Harder, 2011). Die erzielbaren elektrischen Leistungen liegen nach Abbildung 3-2 im Bereich 1,3 – 1,9 MW/(1.000 $t_{\text{Klinker}}/\text{d}$).

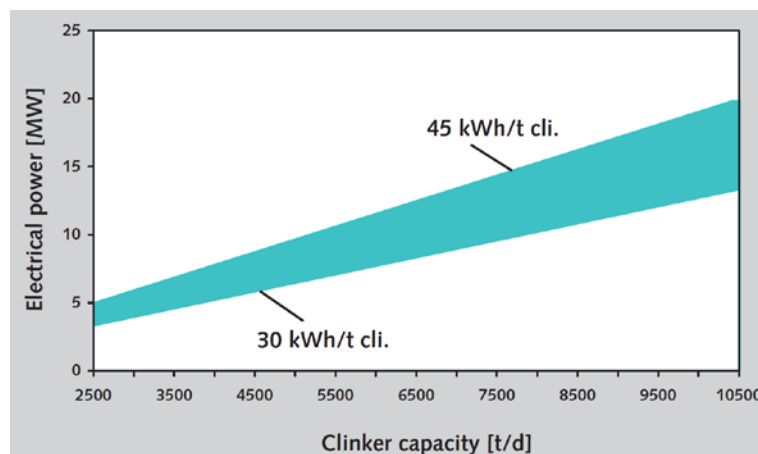


Abbildung 3-3: Typische Anlagenleistungen in Abhängigkeit der Klinkerkapazität (Harder, 2011)

3.2.2 Marktüberblick Abwärmenutzung in Zementanlagen

Harder gibt einen Überblick über die weltweite Entwicklung von Anlagen zur Abwärmenutzung in Zementanlagen. Der Bericht aus dem Jahr 2011 (Harder, 2011) wurde im Jahr 2013 aktualisiert (Harder, 2013).

Die erste Wärmerückgewinnungsanlage zur Nutzung von Kühlerabluft mit konventionellem Dampfkreislauf und einer Leistung von 15 MW wurde im Jahr 1982 in Japan in Betrieb genommen. Im Jahr 1999 wurde bei Heidelberg Cement die erste Wärmerückgewinnungsanlage nach dem ORC- Verfahren mit Prozessmedium Pentan installiert. Die ORC- Anlage liefert eine Leistung von 1,2 MW_{el,Netto}, was einer

Reduktion des Eigenstromverbrauchs von 12 % entspricht. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme im Jahr 1999 waren in Japan bereits 20 Anlagen zur Wärmerückgewinnung in Betrieb. (Harder, 2011)

Mit steigender Umweltdiskussion erfuhren derartige Anlagen einen rasanten Aufschwung. Im Jahre 2009 verfügt China bereits 455 Anlagen zur Abwärmenutzung, weltweit sind es 525 Anlagen. 99 % der Anlagen sind dabei Wasserdampfprozesse (Harder, 2011). Die Zahl der Anlagen ist bis zum Jahr 2012 bereits auf weltweit 865 gestiegen, wobei sich die Anzahl der nicht konventionellen Verfahren dabei merklich erhöht hat. Die konventionelle Dampfturbinentechnik wird allerdings nach wie vor noch bevorzugt angewendet. (Harder, 2013)

Eine Vorreiterrolle haben dabei Hersteller aus China und Japan (siehe Abbildung 3-4). Diese beiden Länder haben auch den höchsten Marktanteil an errichteten Anlagen (siehe Abbildung 3-5).

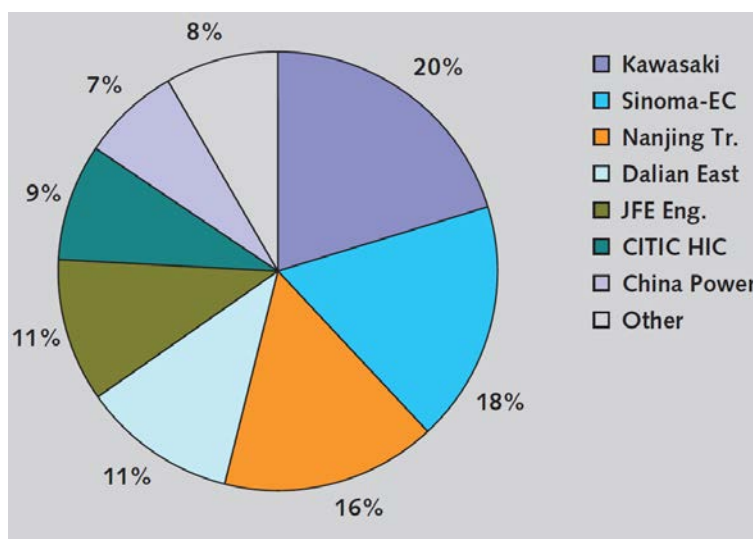


Abbildung 3-4: Marktanteile, Hersteller von Wärmerückgewinnungsanlagen (Harder, 2011)

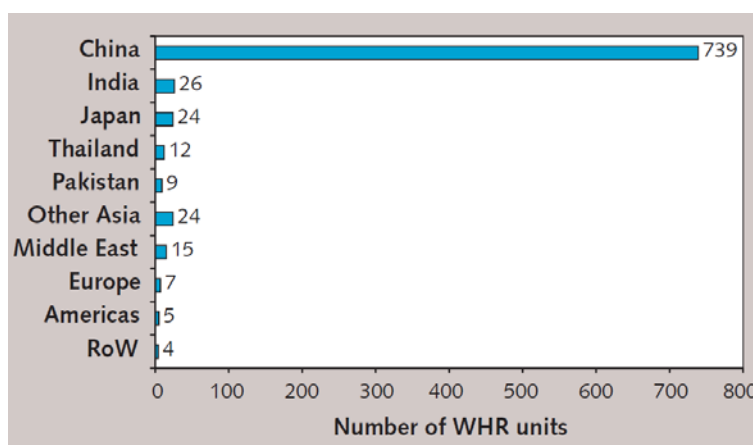


Abbildung 3-5: Ausgeführte Wärmerückgewinnungsanlagen nach Ländern (Harder, 2013)

Typische Wärmerückgewinnungsanlagen mit konventionellem Dampfkreislauf arbeiten mit Dampfparametern 300 °C und 15 – 20 bar. Für die Wirkungsgradverbesserung werden zunehmend zwei- und mehrstufige Turbinen verwendet. ORC- Anlagen, die mit organischem Arbeitsmedium Butan oder Pentan betrieben werden, weisen deutlich niedrigere Verdampfungstemperaturen bei gleichzeitig hohem

Dampfdruck auf, was im Niedertemperaturbereich unter 350 °C Vorteile zu konventionellen Wasser-Dampf Prozessen verspricht. Kalina- Anlagen, die als Arbeitsmedium ein Ammoniak-Wasser Gemisch verwenden, und im Niedertemperaturbereich höchste Wirkungsgrade versprechen, sind im Bereich der Zementindustrie noch nicht im Betrieb bzw. nur als Pilotanlagen ausgeführt. (Harder, 2011)

Rund 40 % der errichteten Anlagen in China sind im Rahmen des Kyoto- Protokolls als CDM- Projekte (CDM = Clean Development Mechanism) ausgewiesen. Durch die JI- Initiative (JI = Joint Implementation) zwischen Industrieländern und Drittstaaten werden in diesen Ländern kostengünstigere Umweltmaßnahmen ermöglicht. Die Unternehmen in den Drittstaaten können durch den Handel mit CERs (CER = Certified Emission Reduction Units) Einnahmen generieren. Dem zertifikatepflichtigen Unternehmen im Industriestaat werden im gleichen Ausmaß CO₂- Emissionsrechte eingeräumt. (Harder, 2011)

Ein weiterer Aspekt für die Investitionsentscheidung in den Asiatischen Staaten ist möglicherweise auch die Reduktion der Abhängigkeit vom Verbundnetz und die Aufrechterhaltung eines reduzierten Betriebs bei Stromausfällen. (Leibinger, 2014)

4 Kreisprozesse zur Stromproduktion aus Niedertemperaturwärme

4.1 Der Wasser/Dampf Kreisprozess

Unter den Umwandlungsprozessen zur Stromerzeugung aus der Klinkerkühlerabluft hat der Dampfprozesses - außerhalb von Europa - den höchsten Anteil (Harder, 2011). Nachstehend werden die herkömmlichen Dampfprozesse beschrieben, um auch aus der Analyse der Schwächen die neuartigen Modifikationen und Verbesserungen herzuleiten. Die Abbildung 4-2 zeigt das Schaltbild des herkömmlichen Eindruck-Dampfprozesses, der heiße Abgase nutzt: der Abhitzeessel (exhaust gas boiler) weist einen Speisewasser-Vorwärmer (preheater), einen Verdampfer (evaporator) sowie einen Überhitzer (superheater), also insgesamt drei Heizflächen, auf.

Der Frischdampf wird in einer Dampfturbine (steam turbine) entspannt, wobei Strom erzeugt wird, und im Kondensator (condenser) niedergeschlagen, wobei die Kondensationswärme an die Umgebung abgeführt werden muss. Im „hot well“ erfolgt die Entgasung und Vorhaltung des Speisewassers. Die Speisewasserpumpe (feedwater pump) schließt den Kreislauf. Derartige Systeme werden z.B. auch zur Nutzung der Auspuffwärme (ca. 280 °C heiß) für große Schiffsdiesel gebaut, woraus sich eine Mehrleistung an dem Dampfturbinengenerator, bezogen auf aktuelle Motorenwellenleistung, um 4,5 bis 4,9 % ergibt (MAN B&W Diesel A/S, 2005). Die angegebenen Werte gelten bei einer Teillast der Hauptmaschine von 85 % der maximalen Dauerleistung. Will man diese verfügbare Technologie für den gegenständlichen Anwendungsfall nutzen, so kommt man selbst nach einer Optimierung zu bescheidenen Dampfdrücken und Wirkungsgraden.

Die Abbildung 4-1 zeigt, wodurch der Dampfdruck und damit auch die Thermodynamik beschränkt werden: Das T/Q - Diagramm des Abhitzeessels zeigt zunächst die Temperaturabnahme des Abgases und im Gegenzug die Aufheizung vom Wasser bzw. Dampf; am Verdampfungsbeginn ist die Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Wasser/Dampf am geringsten (Pinch-Point). Der „optimierte“ Dampfdruck ergibt sich zu 7 bar (Annahmen: Pinch-Point mindestens 20 °C). Höhere Dampfdrücke würden zwar die Thermodynamik verbessern, jedoch steigt dann die Abgastemperatur nach dem Abhitzeessel.

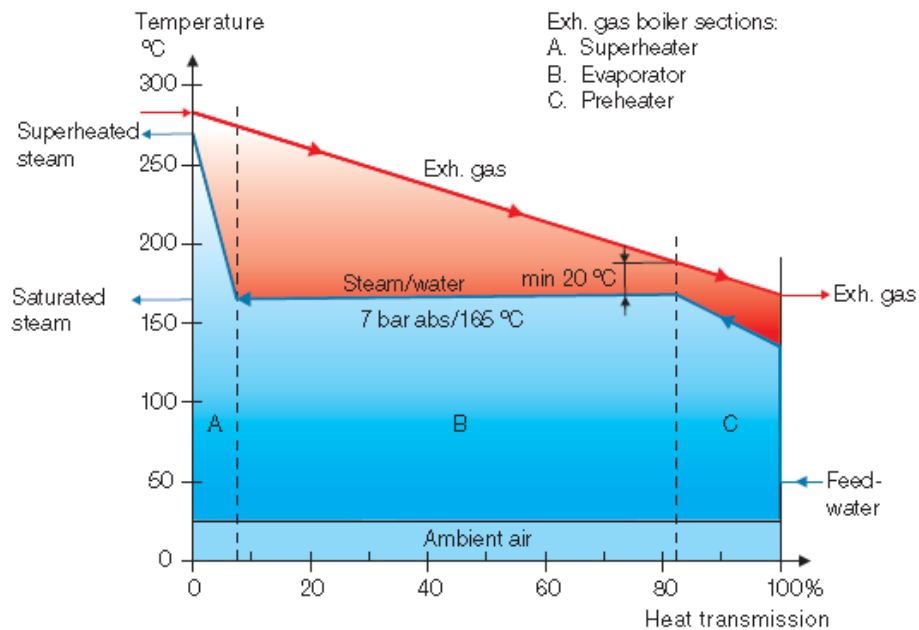


Abbildung 4-1: T/Q-Diagramm des Eindruck-Abhitzekeessels (MAN B&W Diesel A/S, 2005)

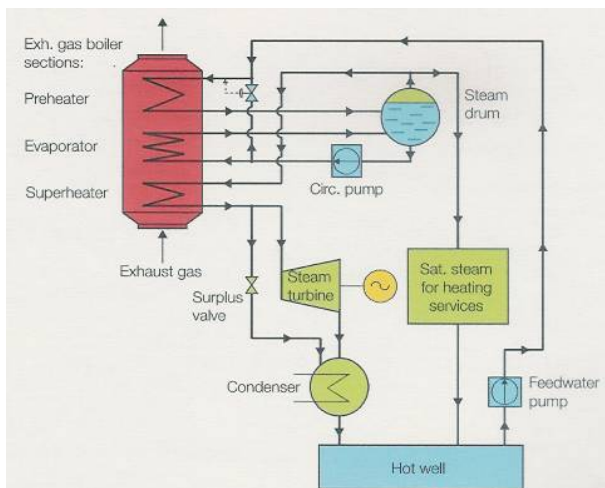


Abbildung 4-2: Herkömmlicher Eindruck-Dampfprozess zur Nutzung der Abgaswärme (MAN B&W Diesel A/S, 2005)

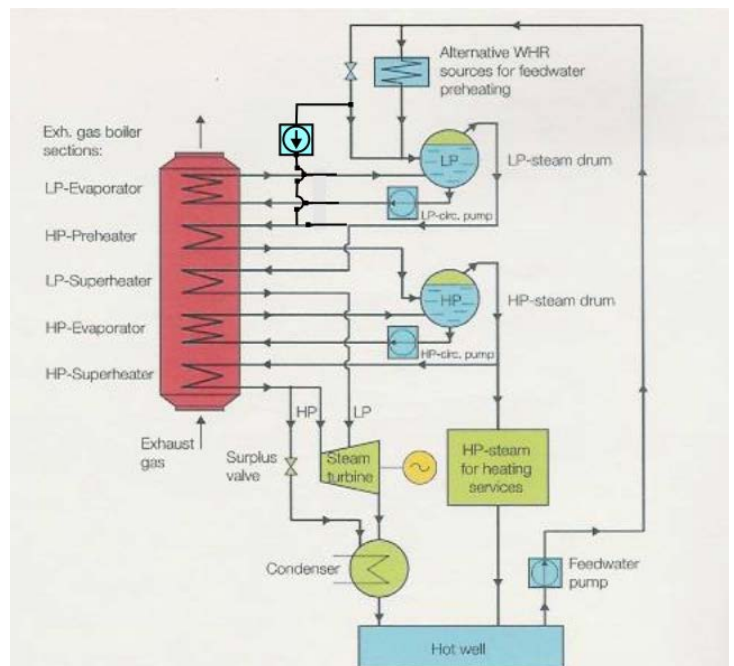


Abbildung 4-3: Zweidruck-Dampfprozess zur Verbesserung der Nutzung der Abgaswärme, aber mit einem höheren Aufwand gegenüber dem Eindruck-Dampfprozess gemäß der Abbildung 4-2 (MAN B&W Diesel A/S, 2005)

Eine Erhöhung des Wirkungsgrades ist möglich, wenn man einen Zweidruck-Dampfprozess gemäß Abbildung 4-3 vorsieht, wenngleich unter Inkaufnahme des Mehraufwandes (zwei Dampferzeuger-Systeme: „Hoch“-Druck und Nieder-Druck - die Dampfturbine ist als Einspeiseturbine auszuführen).

In der Groß-Kraftwerkstechnik sind zur Nutzung der Abgaswärme hinter Gasturbinen im Kombiprozess (Gas- und Dampfturbinenprozess) sogar Dreidruck-Dampfprozesse Stand der Technik, wobei dort der beträchtliche Mehraufwand vertretbar ist.

4.2 Der ORC- Kreisprozess

4.2.1 Unterkritischer ORC- Kreisprozess

Der ORC-Prozess wird in zahlreichen Veröffentlichungen neueren Datums als erprobter Stand der Technik beschrieben (ABB, 2011) (Harder, 2011) (Pehnt, et al., 2010) (VÖZ, 2010) (Heidelberger Zement AG, 2001). Die Abbildung 4-4 zeigt diesen Kreisprozess (Heidelberger Zement AG, 2001) für die besagte Abwärmenutzung: die im Elektrofilter entstaubte Klinkerkühler-Abluft wird in einem Abhitzekeessel mittels eines Thermoölkreislaufes abgekühlt (der Abhitzekeessel kann mit Absperr- und Bypassklappen umgangen werden): Die ausgekoppelte Wärme versorgt die ORC-Stromerzeugungsanlage. In dieser wird z. B. Pentan als organisches Kreislaufmedium vorgewärmt, verdampft und in einer Turbine unter Abgabe von mechanischer/elektrischer Energie entspannt. Das organische Kreislaufmedium hat gegenüber Wasser/Dampf eine vorteilhaft geringere Verdampfungs-Wärme; sein Dampf überhitzt bei einer Expansion, weshalb ein Rekuperator vor dem Kondensator erforderlich ist. In einer Untersuchung der Anlageneffizienz einer 1999 ausgeführten Anlage (Heidelberger Zement AG, 2001) (Pehnt, et al., 2010) können folgende charakteristische Prozessdaten festgehalten werden:

Aus 150.000 m³/h Klinkerkühlerabluft mit 275 °C, entsprechend einer Abgasenthalpie von 14 MW_{th} (bezogen auf 25 °C) werden rund 8 MW_{th} für die ORC-Anlage ausgekoppelt und netto ca. 1,1 MW_{el} elektrische Energie gewonnen; die Abgastemperatur am Abhitzekeessel- Austritt beträgt 125 °C.

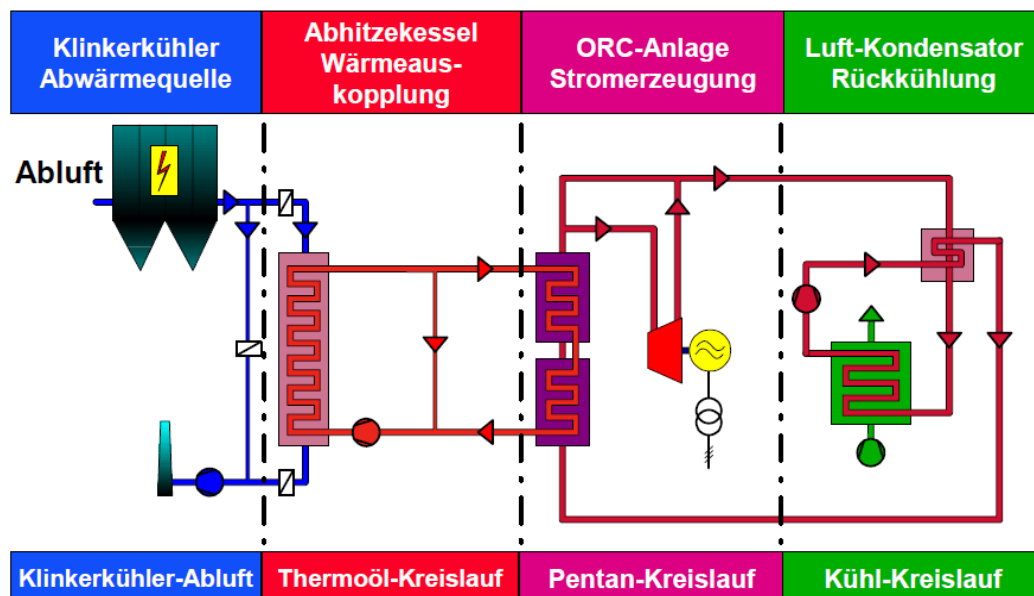


Abbildung 4-4: Abwärmenutzung: die im Elektrofilter entstaubte Klinkerkühler-Abluft wird im Abhitzekeessel mittels eines Thermoölkreislaufes von 275 °C auf 125 °C abgekühlt; die ausgekoppelte Wärme versorgt die ORC-Stromerzeugungsanlage (Heidelberger Zement AG, 2001)

Die Abbildung 4-5 zeigt die Gesamtanordnung der Abwärmenutzung durch die ORC-Technologie in einem Zementwerk (ABB, 2011); es wird eingeschätzt, dass mit dieser Technologie auch Wärmequellen ab 150°C wirtschaftlich nutzbar sind.

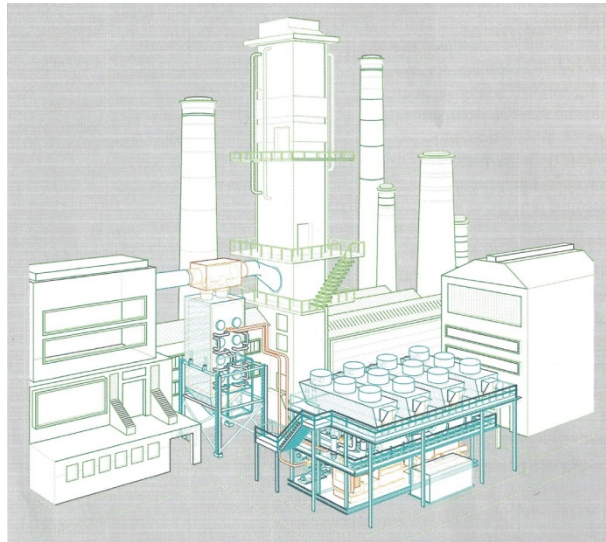


Abbildung 4-5: Gesamtanordnung der Abwärmenutzung der ORC-Technologie (blau eingezeichnet), integriert in einem Zementwerk: diese besteht im Wesentlichen aus dem Thermoöl-Abhitzekessel (links, hinten), dem Maschinenhaus (rechts, vorne) mit den darüber liegenden Luftkühlern und Ventilatoren zur Rückkühlung (ABB, 2011)

4.2.2 Die neueste ORC-Technologie

Der zum Vergleich herangezogene Benchmark-ORC-Prozess (Heidelberger Zement AG, 2001) in der unterkritischen Fahrweise entspricht gänzlich dem Stand der Technik, jedoch gibt es bei der ORC-Technologie laufende Weiterentwicklungen und Forschungsaktivitäten, um die Effizienz, insbesondere in den Bereichen der Niedertemperatur-Abwärme und der Geothermie, weiter zu steigern (Heberle, et al., 2010) (Fischer, 2011).

In einer Veröffentlichung von Heberle, et al. (2012) werden folgende Ansätze zur Wirkungsgradverbesserung gesehen:

- Auswahl des Arbeitsmediums
 - Reine Stoffe
 - Zeotrope Fluidgemische
- Prozessführung
 - Zweistufige Expansion
 - Überkritische Fahrweise
- Optimierung der Kraftwerkskomponenten
 - Expansionsaggregat
 - Wärmeübertrager
- Stoffdaten für potenzielle Medien; dynamische Simulationen, gekoppelte Systeme, etc.

Mit zeotropen Fluidgemischen, bei denen die Siedetemperatur bei der Wärmeaufnahme von der Wärmequelle nach oben gleitet, da sich die Konzentration der beteiligten Gemischkomponenten ändert, erreicht man eine bessere Anpassung an die Temperaturverhältnisse der Abwärmequelle und damit einen geringeren Exergieverlust im Abhitzekegel sowie einen besseren Wirkungsgrad. Anders als bei reinen Stoffen wird das Fluid nicht vollständig verdampft, sondern es verbleibt ein Rückstand / Rücklauf; insofern haben die dafür geeigneten Schaltungen Verwandtschaft mit dem KALINA-Prozess, mit seinen zahlreichen Ausgestaltungsvarianten, aber auch - nota bene - dem vorgeschlagenen innovativen Dampfprozess, welcher ja auch mit zeotropen (anorganischen) Fluidgemischen funktionieren würde. Entwicklungen auf diesem Gebiete sind also auch und vor allem mit Änderungen und Variationen der Schaltungen und Verfahrensfliessbilder verbunden.

Bei der zweistufigen Expansion wird von der Wärmequelle her betrachtet (siehe Abbildung 4-6) einem unterkritischen ORC-Kreislauf ein zweiter ORC-Kreislauf zur Nach-Nutzung der Abwärme nachgeschaltet, welcher mit einer niederen Siedetemperatur arbeitet (was durch ein niedrigeres Druckniveau oder auch durch ein niedersiedendes organisches Arbeitsmedium zu erreichen ist).

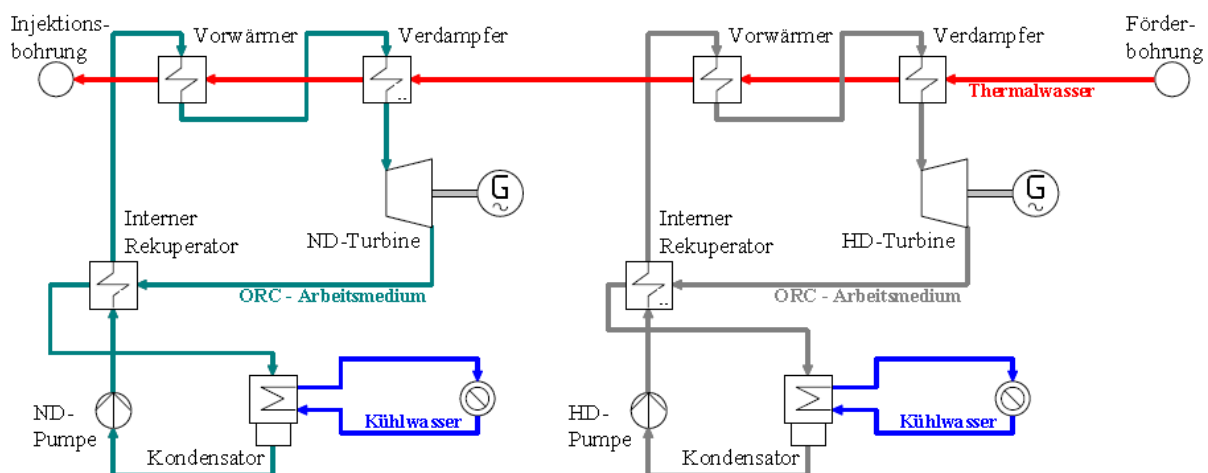


Abbildung 4-6: Zweistufige Expansion: Zwei hintereinander geschaltete ORC-Prozesse (HD/HT und ND/NT) (Heberle, et al., 2012); der Strom der der Wärmequelle fließt von rechts nach links.

Der überkritische ORC-Prozess hingegen weist eine dem unterkritische ORC-Prozess ähnliche Schaltung auf, jedoch mit dem Unterschied, dass *ein* Dampferzeuger statt eines getrennten Vorwärmers und eines Verdampfers vorgesehen ist. Durch die Wahl eines überkritischen Arbeitsmediums, welches auf der Dampferzeugerseite im überkritischen Bereich betrieben während der Wärmeaufnahme seine Temperatur steigert, wird eine Verbesserung der Anpassung an die Wärmequelle und auch des thermodynamischen Wirkungsgrades erreicht.

Die erreichbare Wirkungsgradsteigerung der angeführten ehrgeizigen Maßnahmen wird mit bis zu 15 % (relativ) gegenüber dem konventionellen unterkritischen ORC-Prozess angegeben.

Über die ORC-Technologie mit überkritischen Arbeitsmedien kann allgemein folgendes eingeschätzt werden: Dies ist eine weiterer / alternativer Ansatz für eine höhere Effizienz durch die bessere Anpassung an die Linie der Gasabkühlung; in einer sehr ausführlichen Veröffentlichung wird geschlussfolgert, dass der überkritische Prozess erst bei Wärmequellen mit Temperaturen über 300 °C Wirkungsgradvorteile gegenüber dem unterkritische ORC-Prozess aufweisen (Larsen, et al., 2013).

4.3 Der KALINA Kreisprozess

Über KALINA-Prozesse in der Zementindustrie ist wenig bekannt geworden, obwohl dieser Prozess thermodynamisch geeignet wäre. Bei geothermischen Kraftwerken hat der KALINA-Prozess eine gewisse Verbreitung gefunden (Köhler, 2005) (Mergner, et al., 2012), so befindet sich etwa in Bruchsal (D) eine derartige Anlage mit ca. 0,55 MW_{el}, in Containerbauweise für den Kraftwerksteil und einem angeschlossenen Nasskühlturm (Mergner, et al., 2012).

Der KALINA-Prozess hat ein binäres Gemisch NH₃/H₂O als Arbeitsmedium. Es gibt mannigfaltige Ausführungsformen; die Abbildung 4-7 zeigt das Grundprinzip (Ogriseck, 2009): Die thermische Energiequelle beheizt den Verdampfer (Evaporator), das entstehende Dampf-Wassergemisch wird im Abscheider (Separator) getrennt, der NH₃-reiche Dampf in der Turbine verstromt und die H₂O-reiche Lösung wird dem Abdampf der Turbine beigemischt; dieses Gemisch wird im Kondensator niedergeschlagen, der seine Abwärme an die Umgebung abgibt. Da das Gemisch „frostsicher“ ist, können auch tiefe Außentemperaturen thermodynamisch genutzt werden (z. B. beträgt in Wien während der Monate Oktober bis April die mittlere Lufttemperatur 3,4 °C (Recknagel, et al., 2010).

Der Clou des KALINA-Prozesses besteht darin, dass sich im NH₃/H₂O Gemisch während der Enthalpie-Zufuhr im Evaporator der H₂O-Anteil in der Flüssigphase und damit die Siedetemperatur steigert. (Ogriseck, 2009) Dadurch kann sich der Kreisprozess gut an die Gegebenheiten der thermischen Energiequelle anpassen (siehe Abbildung 4-8). Durch unterschiedliche Konzentrationen NH₃/H₂O könnte die Siedetemperatur bei z. B. 30 bar von 65 °C (reines Ammoniak) bis 235 °C (reines Wasser) variiert werden. Der Zugewinn an elektrischer Brutto-Leistung durch einen KALINA-Prozess wird bei einer untersuchten Nutzung von Abgasen aus einem Kohlekraftwerkskessel (112 kg/s, weitere Abkühlung der Abgastemperaturen von 150 auf 130 °C, übertragenen Wärme 2,3 MW_{th}) mit 320 bis 440 kW_{el} Strom angegeben.

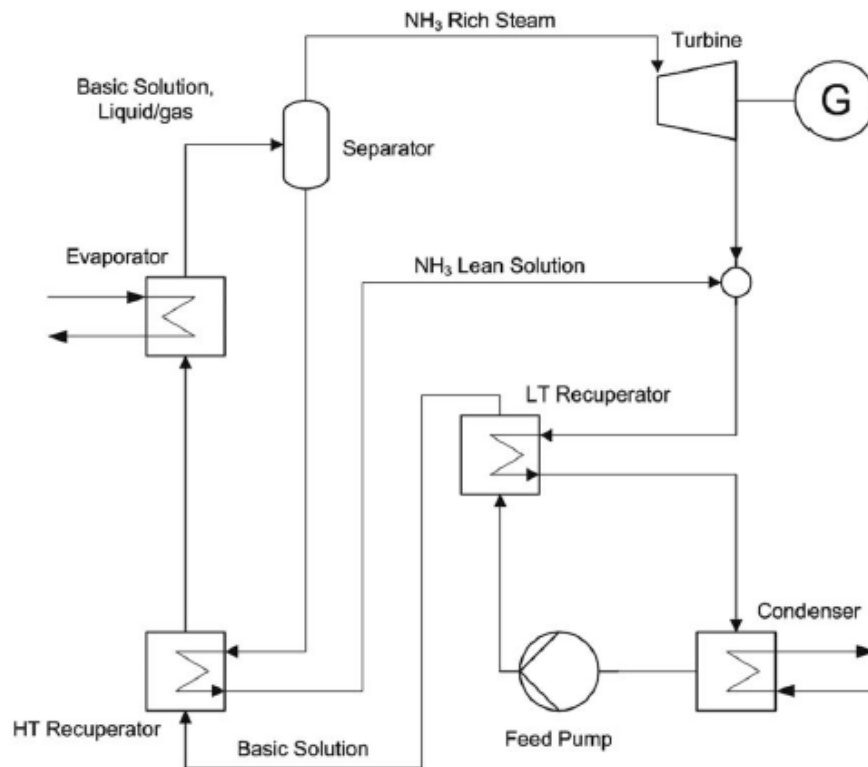


Abbildung 4-7: Der KALINA-Prozess, die thermische Energiequelle beheizt den Evaporator, das entstehende Dampf-Wassergemisch wird im Separator getrennt, der NH_3 -reiche Dampf verstromt und die H_2O -reiche Lösung wird dem Abdampf der Turbine beigemischt und dieses Gemisch wird im Kondensator niedergeschlagen; Rekuperatoren verbessern die Thermodynamik (Ogriseck, 2009)

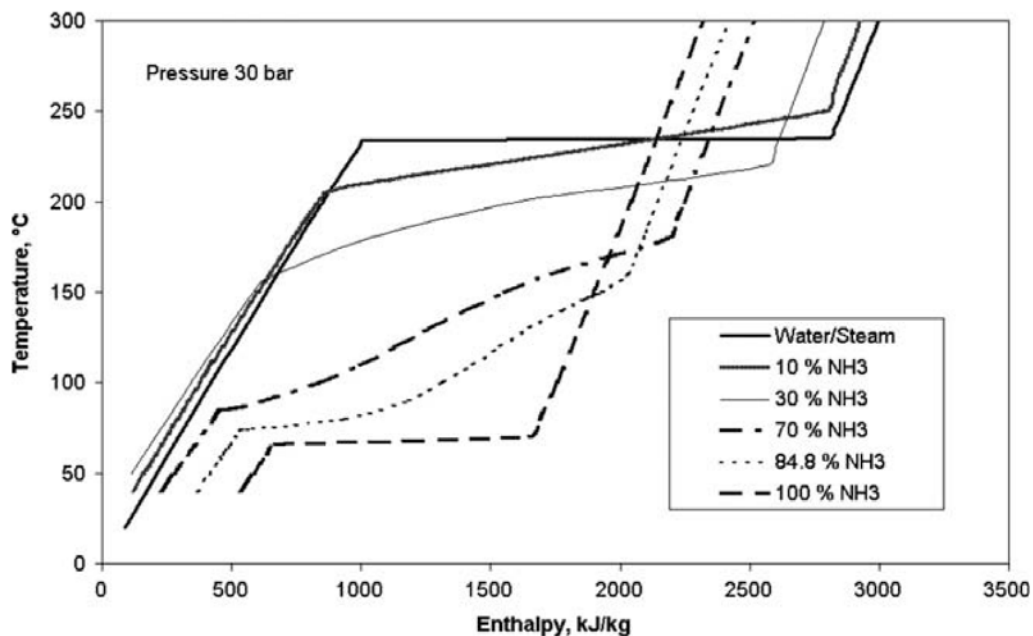


Abbildung 4-8: Vergleich der Siedetemperatur von Wasser und unterschiedlichen Ammoniak-Wasser Gemischen bei 30bar. Der Clou des KALINA-Prozesses besteht darin, dass sich im $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Gemisch während der Enthalpiezufuhr im Evaporator der H_2O -Anteil in der Flüssigphase und damit die Siedetemperatur steigert (Ogriseck, 2009), wodurch sich der Kreisprozess gut an die Gegebenheiten der thermischen Energiequelle anpassen kann

4.4 Der Flash-Prozess im Bereich der geothermischen Stromerzeugung

Bei der Stromerzeugung in geothermischen Kraftwerken kommen alle drei genannten Kraftwerkskreisläufe, nämlich der

- Organic RANKINE Cycle,
- KALINA Cycle sowie
- Wasser/Dampf-Kreislauf

zur Anwendung. Der Wasser/Dampf-Kreislauf ist jedoch nicht ein konventioneller Prozess, sondern ein Flash-Prozess, der den Gegebenheiten des aus der Produktionsbohrung entnommenen heißen Fluides angepasst wurde.

Im Gegensatz zu dem ORC und dem KALINA-Cycle entfällt der Wärmetausch zwischen dem heißen Fluid aus der Produktionsbohrung und dem Arbeitsmedium und das Fluid wird direkt genutzt (Huenges, et al., 2000). Bei Flash-Prozessen hat das flüssige Fluid üblicherweise 155 bis 300 °C, also temperaturmäßig ähnlich der gegenständlich betrachteten Abluft aus Klinkerkühlern; für geringere Fluidtemperaturen (Reservoir- Temperaturen), von ca. 220 °C bis unter 100 °C werden der ORC und der Kalina-Prozess als adäquate Technologien angegeben. Der elektrische Leistungsbereich von Flash-Prozessen liegt üblicherweise im zig – MW –Bereich (Spliethoff, et al., 2012).

In der einfachsten Ausgestaltung, als Single Flash Prozess (siehe Abbildung 4-9), wird das Fluid 1 gedrosselt / entspannt 2; dadurch verdampft ein Teil des Wassers (Flash-Dampf). In einem nachgeschalteten Entspannungsgefäß (Separator) wird von der dampfförmigen Phase 3 die flüssigen Phase 6 getrennt. Wie in einem konventionellen Dampfkraftwerk wird der Dampf 3 in der Turbine expandiert, welche den Generator antreibt, der Abdampf 4 wird im Kondensator niedergeschlagen, wobei das Kondensat 3, zusammen mit der flüssigen Phase 6 zur Verpressbohrung rückgespeist wird (Huenges, et al., 2000).

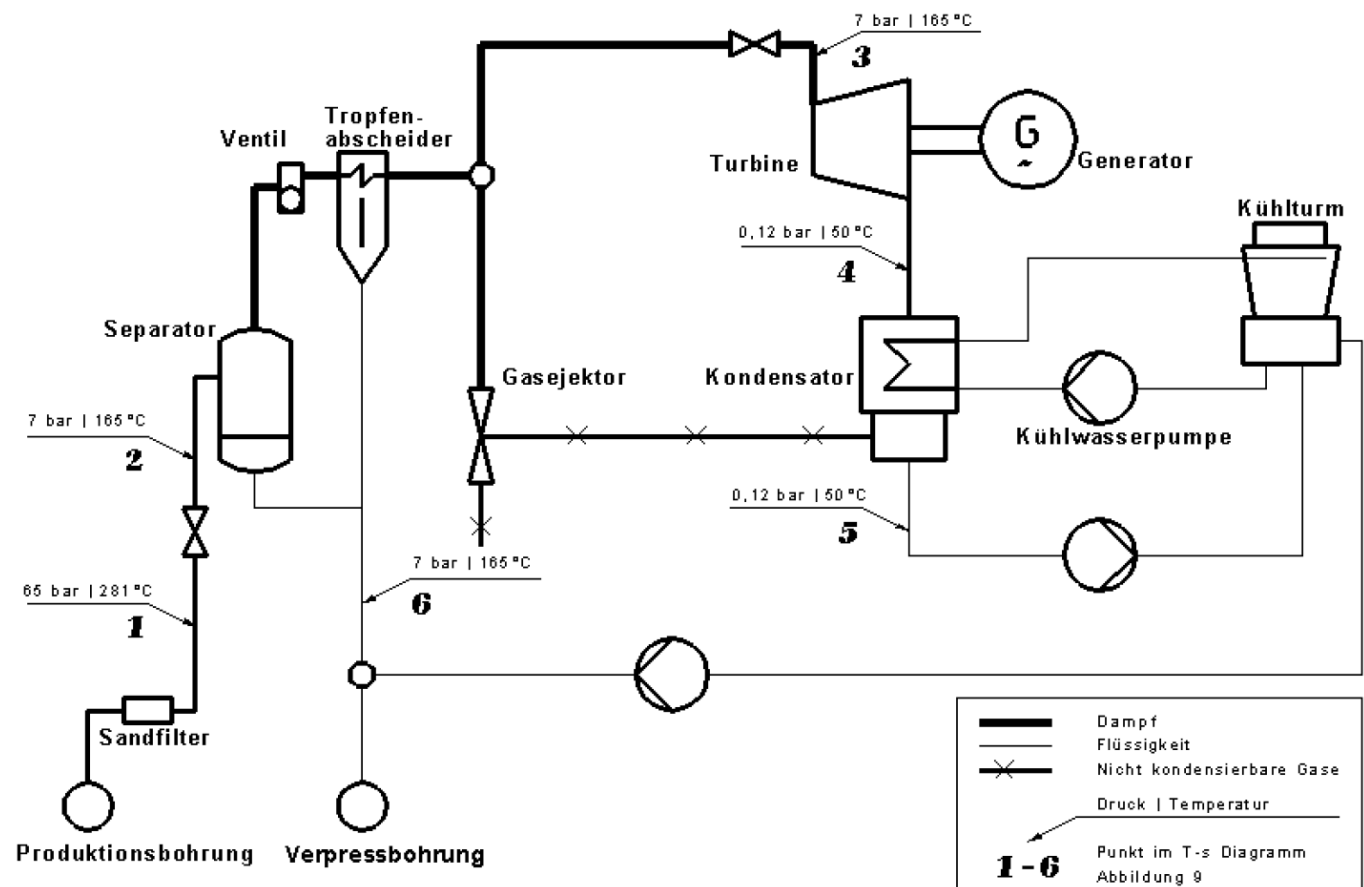


Abbildung 4-9: Single Flash Prozess; die Zustände gemäß den Punkten 1 bis 6 werden im nachfolgenden T-s Diagramm erläutert (Huenges, et al., 2000)

Im T-s Diagramm ist zunächst die isenthalpe Entspannung des Fluides (heißes Druckwasser: 65 bar/281 °C) in der Drossel von 1 nach 2 auf 7 bar ersichtlich. Der entfeuchtete Dampf entspannt in der Turbine von 3 nach 4 auf 0,12 bar und wird im Kondensator zum Kondensat 5 niedergeschlagen; dieses wird, zusammen mit der abgeschiedenen flüssigen Phase 6 aus dem Entspannungsgefäß, zur Verpressungsbohrung gefördert (Abbildung 4-10). Die Drosselung und die damit verbundene Temperaturerniedrigung von 281 °C auf 165 °C resultiert in hohen thermodynamischen Verlusten und bescheidenen Wirkungsgraden. Davon abgesehen ist aber bemerkenswert, dass der Prozess nicht mit einem reinen Arbeitsmedium arbeitet, sondern mit Heißwasser, welches nicht nur mit abfilterbaren, sondern auch gelösten festen und gasförmigen Inhaltsstoffen belastet ist; die Flash-Dampferzeugung ist stets mit einer gewissen Reinigung verbunden, sodass sich dieser in entsprechenden Dampfturbinen auch verstromen lässt.

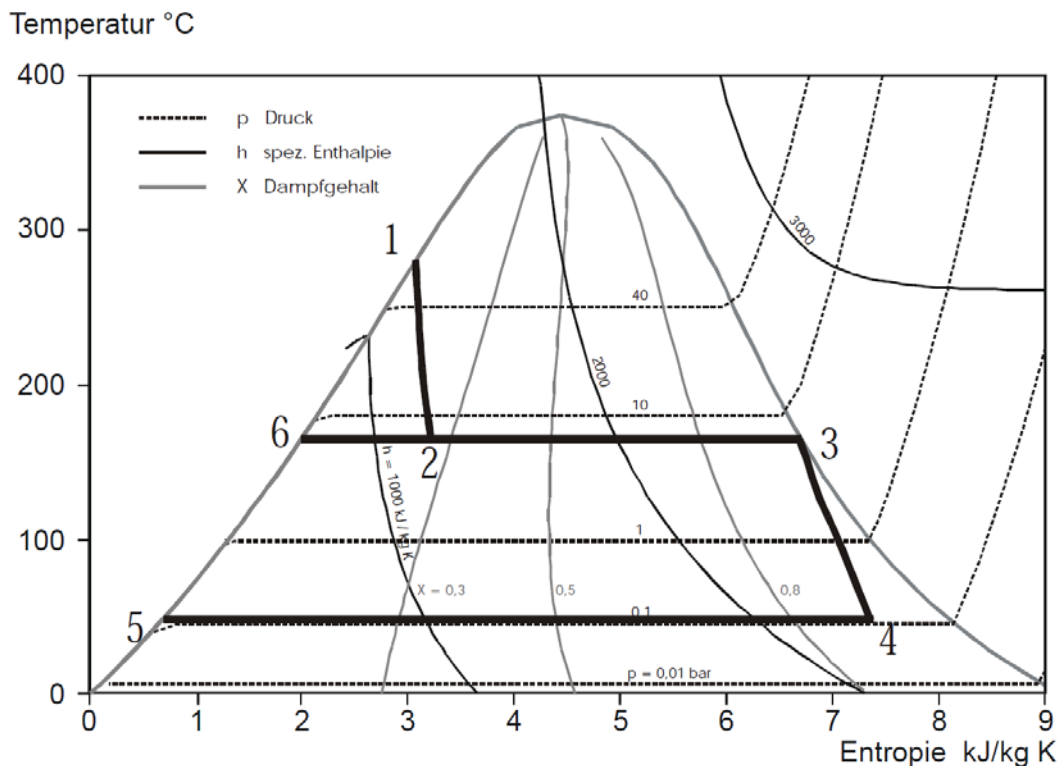


Abbildung 4-10: Der Single Flash Prozess im T-s Diagramm (Huenges, et al., 2000): isenthalpe Entspannung des Fluids in der Drossel von 1 nach 2, Entspannung in der Turbine von 3 nach 4, Kondensation von 4 nach 5.

Bei den sogenannten Double Flash Anlagen verbessert eine zweite Entspannungsstufe den Wirkungsgrad des Prozesses, die flüssige Phase 6 aus dem Separator wird gedrosselt und dem Flash-Tank zugeführt; der abgeschieden Dampf 8 aus dieser Stufe wird in den Niederdruckteil der Turbine geleitet (siehe Abbildung 4-11). Die Druckverhältnisse sind in dieser Abbildung nicht eingezeichnet, sie mögen aber bei um 9 bar im Separator und um 1 bar im Flash-Tank liegen: die Effizienz gegenüber dem Single Flash Prozess wird damit signifikant erhöht, da sowohl der Drosselverlust zwischen 1 und 2 gemildert wird und die flüssige Phase 6 eine Nachnutzung erfährt.

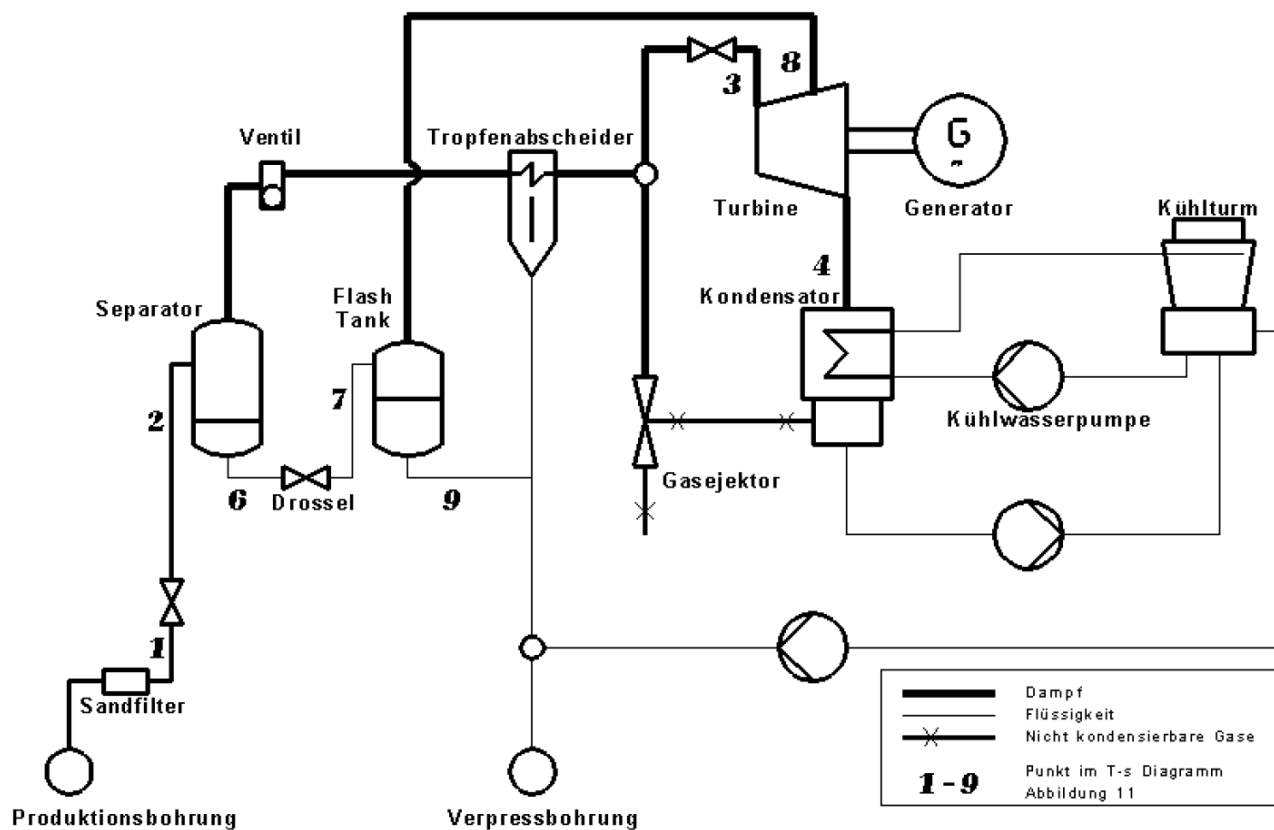


Abbildung 4-11: Double Flash Anlagen mit einem zusätzlichen Flash-Dampf (Huenges, et al., 2000)

Augenscheinlich gibt es zwischen dem Double Flash Prozess und dem vorgeschlagenen Prozess einige Analogien, sodass unter der Vorwegnahme der Beschreibung des innovativen Dampfprozesses gemäß dem Kapitel 8 die Unterscheidungsmerkmale und seiner die Innovationen gegenüber gestellt werden können (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung des Flash Prozesses und des innovativen Dampfkreislaufes

Merkmale		Kreislauf-Prozesse zur Stromerzeugung	
		Flash-Prozess	Innovative Dampfkreislauf
1.	Wärmequelle	geothermische Erdwärme	Abgas, Abluft
2.	Abhitzeessel	nicht erforderlich	Eco mit Vorverdampfung
3.	Arbeitsmedium	Wasser, mineralische Begleitstoffe	Wasser, Speisewasserqualität
4.	Anzahl n der Dampfdruckniveaus	n = 1 oder 2	n = (1), 2 oder 3
5.	Sattdampferzeugung	n Dampfabscheider bzw. Flash- Tanks	n Dampfabscheide-Flaschen
6.	Verfahrensfließbild	Abbildung 4-11	Abbildung 8-1
7.	Thermodynamische Güte	gleich, bei einer gleichen Anzahl n	
8.	Drossel/Ablaufregelventil	konventionell	Venturi-Kondensatableiter (Abbildung 8-7)
9.	Dampf-Turbine	Einspeise-Turbine (ab n = 2) oder n Turbinenzylinder	Gleichdruckturbine mit n Düsenkästen (Abbildung 8-13)
10.	Kosten	Kapitel 15.1	Kapitel 15.2.3

Dazu die folgenden Erläuterungen:

- Ad. 4: die einfache Ausgestaltung der Komponenten bei dem innovativen Dampfkreislauf erlaubt auch 3 Druckstufen, während beim Flashprozess bisher höchstens 2-stufige Prozesse vorgeschlagen wurden.
- Ad. 5: die Dampfabscheider sind bei geothermischen Kraftwerken auf Grund der geringeren Wasserqualität („Sole“) vermutlich voluminöser auszuführen.
- Ad. 7: die Thermodynamische Güte hängt von der Anzahl von Druckniveaus ab (besser, je höher); ein Zahlenvergleich der Wirkungsgrade wäre nur dann angezeigt, wenn die Prozesstemperaturen exakt die gleichen wären.
- Ad. 8: die Verwendung eines Venturi-Kondensatableiters ist innovativ; diese Technologie ist bei geothermischen Flash-Anlagen vermutlich wegen der geringen Wasserqualität nicht einsetzbar.
- Ad. 9: die Verwendung der Gleichdruckturbine mit n Düsenkästen ist innovativ; diese Technologie wäre vermutlich auch bei geothermischen Flash-Anlagen einsetzbar.
- Ad. 5, 8, 9: generell fehlen in der betrachteten Fachliteratur Hinweise über die Ausgestaltung der Komponente der geothermischen Flash-Anlagen.
- Ad. 10: die Kosten-Vergleichbarkeit wird im Kapitel 15 erläutert und hinterfragt.

Zusammenfassend zeigt die Gegenüberstellung prinzipielle Analogien auf, jedoch verbleiben beim RaCiA-Prozess die Innovationen bezüglich der Hauptkomponenten der Turbine und der Drosselung, wodurch sich nicht nur der Aufwand verringert, sondern auch eine Mehrstufigkeit mit einer höheren Effizienz leistbar wird.

5 Ökologische Prozessbewertung

Die Ökobilanzierung, Life Cycle Assessment (LCA), ist eine Methodik um den Ressourcenverbrauch und mögliche Umweltauswirkungen über den Lebensweg eines Produktes zu evaluieren. Betrachtet wird der gesamte Lebenszyklus von der Rohmaterialbereitstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung (von der Wiege bis zur Bahre). Die ISO 14040 und ISO 14044 wurden entwickelt um die Herangehensweise, Begriffe und methodische Möglichkeiten zu vereinheitlichen und bereitzustellen (Klöpffer, et al., 2009).

5.1 LCA Zementindustrie

In der Zementindustrie ist die Prozessbewertung mithilfe von Ökobilanzen keine Seltenheit. Zum Einem wird sie verwendet um die Umwelteinflüsse, zumeist die CO₂ Emissionen der Zementindustrie, zu evaluieren. Hier leistet sie einen Beitrag die Prozesse besser zu verstehen und Verbesserungspotentiale zu erkennen. Ebenso können LCA-Studien dazu verwendet werden, die Umweltverträglichkeit verschiedener Zementarten zu vergleichen (Feiza, et al., 2012). Ein anderes Themengebiet in LCA-Studien ist es den Einfluss der Verwendung von Ersatzbrennstoffen und Zuschlagstoffen zu evaluieren siehe (Bakas, et al., 2009). Prinzipiell führen in der Zementproduktion, wie in allen produzierenden Gewerben, zwei Wege zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen: Der Einsatz von alternativen Ressourcen und die Verbesserung der Produktionstechnologie. Das vorliegende Vorhaben zielt auf eine Verbesserung des Prozesses, durch die Nutzung von Abwärme ab. Dieser Umstand führt an sich schon zu einer Verbesserung der Umweltleistung. Untersucht werden soll, inwieweit sich die dafür einsetzbaren Technologien unterscheiden.

Die Erhebung der Umweltauswirkungen aufgrund von Emissionen und Energieverbrauch beim Prozess der Zementherstellung zeigt, dass die Klinkerproduktion die dominante Rolle einnimmt. In diesem Prozessschritt werden die meisten Ressourcen und Energie benötigt und es wird der Großteil der Emissionen freigesetzt (Bösch, 2010). Genauso wie der Herstellungsprozess an sich wird der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Ökobilanzstudien ausführlich behandelt und getrennt dargestellt. Was hingegen bei der Abwärmenutzung nicht der Fall ist. Die Abwärmenutzung mit der dafür nötigen und eingesetzten Technologie findet meist keine separate Erwähnung und verschwindet als kleiner Teil des gesamten Prozesses. Der Energiebedarf, sowohl in Form von Rohstoffen als auch in Form von elektrischer Energie ist von besonderer Bedeutung aus ökologischer Sicht. Nach Feiza, et al. (2012) wird der Energiebedarf als eine der „Key Performance Indicators“ herausgefiltert. Das bedeutet, dass für die Einschätzung der Umweltwirkungen die Betrachtung einiger weniger Indikatorwerte ausreicht. Was die positive ökologische Wirkung von Energiesparmaßnahmen weiter unterstreicht.

In Industriebetrieben wird meist für die ökologische Prozessbewertung das Treibhauspotential als einzige Wirkkategorie betrachtet. Um den Ressourcenverbrauch als gesamtes bewerten zu können, wäre eine auf Energie basierende Wirkungsabschätzungsmethode notwendig. Einen Teil des Ressourcenverbrauchs deckt die Erhebung des kumulativen Energiebedarfs ab (Curran, 2012). Die Ermittlung der „Energy Payback Time“ kann für die vorliegende Fragestellung einen nützlichen Indikatorwert darstellen.

5.2 LCA Nutzung industrieller Abwärme

Die Nutzung von industrieller Abwärme ist jedenfalls mit einem ökologischen Vorteil verbunden, wenn dadurch der Einsatz von fossilen Energieträgern an anderer Stelle vermindert wird. Die aus Abwärme produzierte elektrische Energie muss somit nicht mit konventionellen Kraftwerken erzeugt werden. Für das gesamte System (Zementproduktion und Strombereitstellung) bedeutet die Abwärmenutzung eine Verbesserung durch das Vermeiden von Emissionen an sich (Walsh, et al.). Emissionen, die typischerweise bei der Verbrennung entstehen, wie CO, CO₂, NO_x oder SO_x, werden vermieden.

Im Bereich der Niedertemperaturnutzung findet oft der ORC Prozess Anwendung. Dieser bringt jedoch einen Nachteil mit sich: das verwendete Arbeitsmedium. Die Arbeitsmittel, die traditionell eingesetzt werden, wie Silikonöl, R245 oder R234a, stehen in Verbindung mit beträchtlichen Umweltwirkungen (Bai, 2012).

Da die genutzte Wärme, die im Zuge eines Industrieprozesses anfällt, kann das Thema „Allokation“ von Interesse sein. Eine Allokation der Umweltlasten aus der Vorkette wird im vorliegenden Fall jedoch nicht berücksichtigt, da es sich bei der Abwärme um ein Abfallprodukt handelt. Diese Annahme beruht darauf, dass die Abwärme in der Form, unabhängig davon ob sie genutzt wird oder nicht, anfallen würde.

5.3 LCA Energiesysteme / Komponentenbewertung

Das Bewerten der einzelnen Komponenten des Energieerzeugers stellt eine Herausforderung dar. Es ist nötig die einzelnen Teile und die Materialien zu kennen aus denen die Module gefertigt werden. Um diese Daten zu erheben können entweder Herstellerangaben, Literaturdaten oder LCA Datenbanken verwendet werden.

Die ecoinvent- Berichtsreihe 6 enthält Daten und Informationen zur Bewertung von Energiesystemen (Dones, et al., 2007). In den beiden Berichten 6-XIV Wärme-Kraft-Kopplung (Heck, 2007) und 20 Life Cycle Inventories of new CHP systems (Primas, 2007) lassen sich erste Anhaltspunkte zur Verwertung der zugrunde liegenden Anlagen finden. Für einzelne Komponenten wie z.B. Motor, Generator, der Zusammenbau zum Stromaggregat, Elektrotechnik können Werte oder Anhaltspunkte aus den ecoinvent-Studien erhoben werden. Diese Werte beziehen sich jedoch auf konkrete Beispielanlagen, beinhalten aber trotzdem auch Schätzwerte. Daraus resultiert das Problem, dass die Materialangaben nicht auf die, in der vorliegenden Untersuchung interessante Anlagengröße angewendet werden kann. Ein einfaches Hochrechnen auf Basis der Anlagenleistung wird nicht durchgeführt, da sich die Materialmengen nicht linear zur Leistung verändern. Weiteres finden sich in der Literatur Angaben wie auf Basis der Investitionskosten die Umweltbelastungen aufgrund von Planung, Montage und Inbetriebnahme abgeschätzt werden können. (Heck, 2007). Dazu müssen jedoch belastbare Kostenangaben ermittelt werden. Der ecoinvent-Bericht 20 zu Small combined heat and power beinhaltet Daten zu einer Micro Gasturbine (100kWel), dieser Datensatz beinhaltet Informationen zu Material- und Energieaufwand (Primas, 2007). Die Studie Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken (Briem, et al., o.J.) enthält umfangreiche und detaillierte Angaben zu Komponenten (ORC-Anlage und Dampfprozess) aufgeteilt auf die verbauten Materialien.

Während der Nutzungsphase ist der Einsatz bzw. Ersatz von Betriebsmitteln (Speisewasser, Thermoöl bzw. Arbeitsmedium beim ORC Prozess) erforderlich. Die nötigen Mengen müssen über die Lebensdauer berücksichtigt werden. Außerdem fallen Aufwendungen für Wartung und Reparaturen an, diese müssen ebenfalls abgeschätzt werden. Entsprechende Prozentwerte und Angaben sind in (Briem, et al., o.J.) enthalten.

6 Patentrecherche

Eine Patentrecherche wurde zu Projektbeginn und gegen Projektende durchgeführt. Nachfolgend findet sich das Fazit der beiden Patentrecherchen. Das detaillierte Ergebnis der beiden Recherchen ist im Anhang zu finden.

6.1 Patentrecherche zu Projektbeginn

Im Gegensatz zu Veröffentlichungen gibt es eine rege Tätigkeit beim Patentsektor, welche sich in Patentanmeldungen manifestiert, allerdings ist teilweise der Innovationsgehalt fraglich und eine Patenterteilung (noch) ausständig. Bezüglich der Kreislauftechnologie und einer etwaigen Energiespeichertechnologie lassen sich Weichenstellungen, aber keine begründbaren Vorlieben, erkennen. Innovativ erscheinen Prozesse mit einer internen Flash-Dampferzeugung (innerhalb der Expansionsmaschine). Abwärmenutzungs- Prozesse hinter Verbrennungskraftmaschinen scheinen dabei einen besonderen Raum einzunehmen, die Patentinhaber sind z. T. renommierte Firmen der Kfz-Branche; es sind also i. d. R. nicht Kraftwerksfirmen.

Die Weiterentwicklung von internen Flash- und Dreiecksprozessen ist natürlich im Auge zu behalten. Die Verwertung von Abwärmen unterschiedlichen Temperaturniveaus und unterschiedlicher Herkunft, innerhalb eines Industriebetriebes oder mit Hinzunahmen etwaiger regenerierbarer Energiequellen, wird hingegen durch die recherchierten Patentanmeldungen nicht thematisiert, nicht vorweggenommen und bleibt dezidiert ein Ziel der gegenständlichen Sondierung.

Das Update dieser Recherche (Stand Mitte August 2014) erfolgte gegen Projektende.

6.2 Patentrecherche zu Projektende

Bezüglich der Kreislauftechnologie für industrielle Abwärmen gibt es nichts Neues, hingegen gibt es spärliche Aktivitäten bei den Abwärmenutzungs- Prozessen hinter Verbrennungskraftmaschinen (Hubkolbenmotoren und Gasturbinen). Patentanmeldungen über Kolbendampfmaschinen mit der internen Flash-Dampf-Erzeugung werden hauptsächlich und in großer Zahl von einem Erfinder initiiert; ob diese Patentanmeldungen verteidigbar und durchsetzbar sind, bleibt abzuwarten.

Ebenso offen bleibt die fachliche Beurteilung, ob der Dampfmaschine die längerfristig richtige Antwort auf die gestellten Fragen darstellt. Die gegenständliche Sondierung geht verfahrensmäßig ebenfalls den Weg der Flash-Dampf-Erzeugung, schlägt aber auf der Seite der Expansionsmaschine die innovative, einfach Dampfturbine vor.

Die Verwertung von Abwärmen unterschiedlichen Temperaturniveaus und unterschiedlicher Herkunft, innerhalb eines Industriebetriebes oder mit Hinzunahmen etwaiger regenerierbarer Energiequellen, wird durch die recherchierten Patentanmeldungen nicht thematisiert, nicht vorweggenommen und bleibt dezidiert ein Ziel der gegenständlichen Sondierung.

7 Thermodynamische Betrachtung

In diesem Kapitel werden Rahmenbedingungen, wie Auslegungsbedingungen, komponentenspezifische Daten und Methoden beschrieben, welche für alle der untersuchten Prozesse angewendet werden. Prozessspezifische Erläuterungen, Komponentenbeschreibungen sowie Ergebnisse sind in den jeweiligen Hauptkapitel der untersuchten Prozesse (siehe Kapitel 8 - 11) zu finden.

7.1 Prozesssimulation und -analyse

Die Prozesssimulation wird mit der kommerziellen Simulationssoftware IPSEpro der Firma SimTech GmbH (SimTech GmbH, 2014) durchgeführt. Zur Anwendung kommen die Programmmodule PSXLink zur Koppelung mit Microsoft Excel (Version 2013) sowie die Modellbibliotheken „Advanced Power Plant Library“ und „Low Temperature Process Library“. Nebenrechnungen und Diagrammdarstellungen werden mit der Software EES – Engineering Equation Solver der Firma F-Chart Software (F-Chart Software, 2014) und Microsoft Excel durchgeführt.

7.2 Prozessbedingungen

Die Festsetzung der Prozessbedingungen erfolgt nach bereits umgesetzten Best-Practice Anlagen im zu untersuchenden Segment der Zementindustrie. Eine der ersten Anlagen, die in Europa errichtet wurden und welche nach wie vor als Best-Practice Beispiel genannt wird, ist die ORC- Anlage der Heidelberg Cement AG am Standort Lengfurt. Die Auslegungsbedingungen (siehe Tabelle 7-1) werden in Anlehnung an diese Anlage wie folgt festgesetzt (Heidelberger Zement AG, 2001):

Tabelle 7-1: Auslegungsbedingungen Prozesssimulation

Wärmequelle: Abluft Klinkerkühler		
Temperatur	275	°C
Massenstrom	54,4	kg/s
Volumenstrom	150.000	m _N ³ /h
Abwärme- Leistung, bezogen auf 25°C	14	MW
Wärmesenke: Umgebungsluft		
Temperatur	11	°C
Massenstrom	470	kg/s

7.3 Komponentenbeschreibung

7.3.1 Abhitzeessel und Wärmetauscher

Für die in den unterschiedlichen Prozessen eingesetzten Wärmetauscher werden die folgenden Randbedingungen definiert (siehe Tabelle 7-2). Die Bezeichnung Primärseite gibt dabei die Seite des heißen Mediums, die Bezeichnung Sekundärseite die Seite des kalten Mediums an. Die angegebenen

Daten beziehen sich auf den Auslegungsfall, der für die Dimensionierung der Komponenten relevant ist. Ausgehend von diesem Auslegungsfall werden für die unterschiedlichen Prozesse Optimierungsrechnungen bzw. Parametervariationen durchgeführt.

Tabelle 7-2: Wärmetauscher Randbedingungen/Auslegungsdaten

Wärmetauscher Typ	Medium Primärseite	Medium Sekundärseite	Pinchpoint [K]	Druckverlust Primärseite [mbar]	Druckverlust Sekundärseite [mbar]
Abhitzeessel Wasserdampfkreislauf (Vorwärmer + Verdampfer)	Abluft	Wasser - flüssig/dampfförmig	25	7	2.000
Abhitzeessel ORC unterkritisch	Abluft	Thermoöl	45	7	4.500
Abhitzeessel CO ₂ überkritisch	Abluft	CO ₂ überkritisch	25	7	2.000
Wärmetauscher Thermoölkreislauf prozessseitig (Vorwärmer + Verdampfer)	Thermoöl	organisches Arbeitsmittel flüssig/dampfförmig	13,8	5.000	2.000
Rekuperator ORC unterkritisch	organisches Arbeitsmittel dampfförmig	organisches Arbeitsmittel flüssig	31	50	1.000
Rekuperator CO ₂ überkritisch	CO ₂ gasförmig	CO ₂ überkritisch	31	2 % vom Eintrittsdruck des durchströmenden Mediums	2 % vom Eintrittsdruck des durchströmenden Mediums
Kühler/Kondensator alle Prozesse	Wasser/organisches Arbeitsmittel/CO ₂ - flüssig/dampfförmig	Umgebungsluft	11	2 % vom Eintrittsdruck des durchströmenden Mediums	1,5

7.3.2 Pumpe

Der Wirkungsgrad von Pumpen radialer und halbradialer Bauart wurde gemäß Menny (2006) abgeschätzt. In der Simulation werden ein innerer Pumpenwirkungsgrad von 78,5 % und ein mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe von 97 % festgelegt.

7.3.3 Ventilator

In der Simulation werden in Anlehnung an Deutsche Energie-Agentur GmbH (2010) ein innerer Ventilator-Wirkungsgrad von 85 % und ein mechanischer Wirkungsgrad des Ventilators von 97 % festgelegt.

Folgende Ventilatoren kommen bei allen untersuchten Prozessen zum Einsatz:

- **Ventilator Abhitzeessel**

Für die Abwärmeverwertung wird in jedem der Prozesse ein zusätzlicher Abhitzeessel im Abluftstrang des Klinkerkühlers vorgesehen. Der Abhitzeessel verursacht einen zusätzlichen Druckverlust, der durch einen Ventilator aufzubringen ist. Für die prozesstechnische Simulation wird jeweils nur der Druckverlustanteil des Abhitzeessels berücksichtigt. Es wird nur jeweils dieser Anteil in der Prozesssimulation berechnet, unabhängig davon, ob es sich in der Endausführung um einen separaten Ventilator handelt oder der Druckverlustanteil durch den Saugzugventilator am Ende der Prozesskette

aufgebracht wird. Auf Grund des zu überwindenden Druckverlusts werden üblicherweise Radialventilatoren eingesetzt.

- **Ventilator Luftkühler**

Der Luftkühler hat die Aufgabe den austretenden Dampf nach der Turbine zu kondensieren. Beim Luftkühler (Kondensator) werden üblicherweise Axialventilatoren eingesetzt.

7.3.4 Generator

Die Generatorwirkungsgrade wurden in der Simulation gemäß Herstellerangaben aus ACG Ges.m.b.H. (o.J.) für Generatoren im Leistungsbereich von 910 – 1331 kW festgelegt. Beim Betrieb mit 50 Hz und $\cos\varphi = 0,8$ ergibt sich bei 100 % Last in dieser Leistungsklasse ein Gesamtwirkungsgrad von 95,3 %. In der Simulation werden in Anlehnung an dieses Datenblatt ein elektrischer Wirkungsgrad von 98 % und ein mechanischer Wirkungsgrad des Generators von 97 % festgelegt.

7.3.5 Antriebsmotor

Als Antriebsmotoren für Pumpen und Ventilatoren werden typischerweise Asynchronmotoren verwendet. In der Richtlinie IEC/EN 60034-30-1 (2014) werden Mindestwirkungsgrade für unterschiedliche Effizienzklassen, Bauarten und Größen von Antriebsmotoren definiert. Dabei wurde folgende Einteilung vorgenommen:

- IE1 = Standard efficiency
- IE2 = High efficiency
- IE3 = Premium efficiency
- IE4 = Super premium efficiency

Ab 1.1.2015 gilt die Wirkungsgradklasse IE3 für DS-Motoren (7,5 kW – 375 kW) im Netzbetrieb oder IE2 für DS-Motoren mit Umrichterbetrieb (0,75 kW – 375 kW). Bei den zu untersuchenden Kraftwerkskreisläufen ist für den Antrieb von Pumpen und Ventilatoren mit einer Motorleistung von > 10 kW auszugehen. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Leistungsbereich Motoren der Klasse IE3 zum Einsatz kommen. Ab einer Leistungsklasse von 75 kW wird davon ausgegangen, dass Motoren der Klasse IE4 zum Einsatz kommen.

In der Simulation werden in Anlehnung an die Mindestwirkungsgrade nach ABB Motors and Generators (2014) für den Leistungsbereich bis 75 kW ein elektrischer Wirkungsgrad von 95 % und ein mechanischer Wirkungsgrad des Motors von 97 %, Leistungsbereich ab 75 kW ein elektrischer Wirkungsgrad von 98 % und ein mechanischer Wirkungsgrad des Motors von 98 % festgelegt.

8 Innovativer Dampfprozess RaCiA

Der in diesem Kapitel beschriebene und untersuchte Dampfprozess ist zentraler Bestandteil in diesem Projekt. Der Kreisprozess beruht auf den Patentschriften EP1584798B1 (Beckmann, 2005) sowie AT513548B1 (Beckmann, 2014). In den Kapiteln 9, 10 und 11 werden konkurrierende State-of-the-Art und Zukunftstechnologien beschrieben und untersucht. In Kapitel 12 erfolgt ein Vergleich des innovativen Dampfprozesses mit State-of-the-Art Technologien, welche im untersuchten Anwendungsfall der Abwärmenutzung von Klinkerkühlluft in der Zementindustrie zum Einsatz kommen.

8.1 Prozessbeschreibung

Wie das Verfahrensfliessbild (Abbildung 8-1) in seiner Basisausführung (Sattdampfvariante) zeigt, hat der Abhitzeessel nur eine einzige Heizfläche zur Vorwärmung und Teilverdampfung. Der Nassdampf gelangt in eine Hochdruck-Abscheideflasche und der entfeuchtete Sattdampf (Hochdruckdampf) wird in der Dampfturbine verstromt. Die abgeschiedene Dampfmasse wird zur weiteren Stromerzeugung jeweils in einem Ablauf- Regelventil gedrosselt, der entstehende Entspannungsdampf („Flash“-Dampf) wird abgeschieden und verstromt. Damit wird mit einfachsten Mitteln die Güte eines Dreidruck-Dampfprozesses erreicht. Energiespeicher- bzw. Puffereffekt kann man dadurch erreichen, indem man beim Laden ein Ansteigen und beim Entladen ein Absenken des Wasserstandes in den Abscheideflaschen herbeiführt. Heißwasser hat im betrachteten Druckbereich eine günstige Speicherfähigkeit (Beckmann, et al., 1984) (Goldstern, 1933) (Goldstern, 1963).

Da Abscheideflaschen mit unterschiedlichen Druck- und Temperaturniveaus vorliegen, ist es auch ein Leichtes, eine zusätzliche Wärmequelle mit einem niedrigeren Temperaturniveau als das Abgas (Low-Exergy Wärmequelle) nutzbringend einzubinden. Für Wärmeauskopplungen bietet sich zudem die exergetisch sinnvolle Möglichkeit an, verschiedene Temperaturniveaus anzuzapfen, ohne dass dazu eine mehrstufige Anzapfturbine - wie in der Kraftwerkstechnik - erforderlich ist.

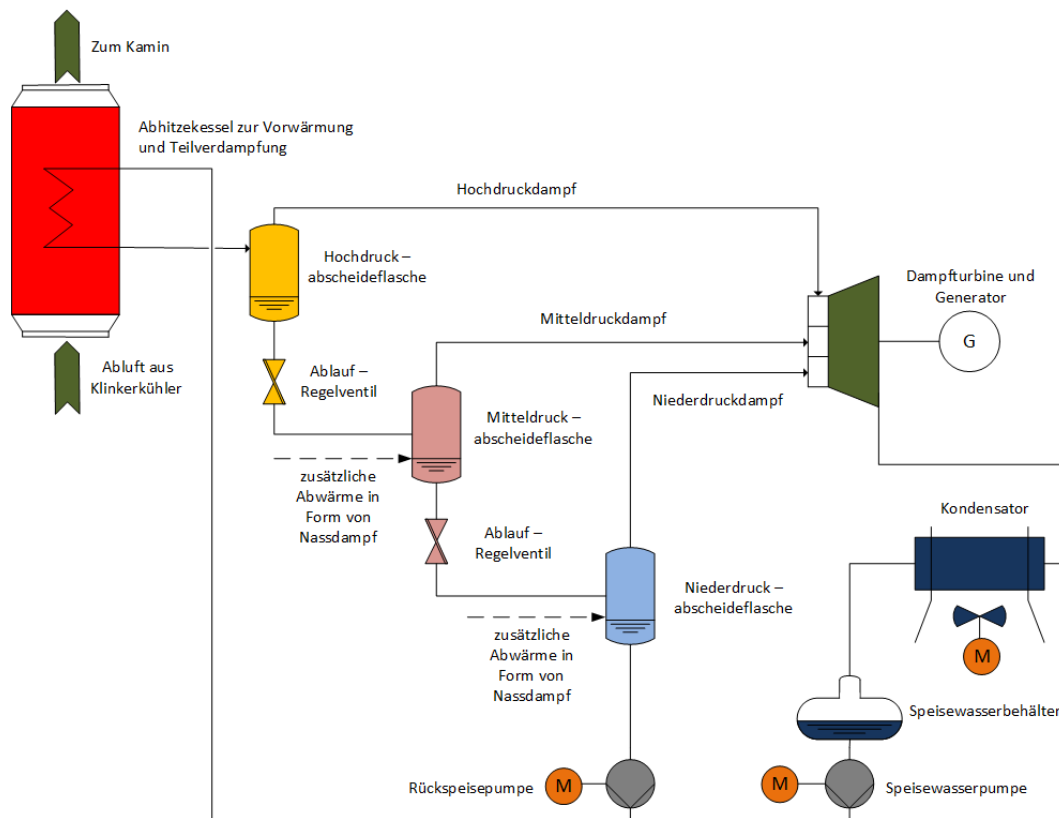


Abbildung 8-1: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung

8.2 Morphologische Matrix zur Variantenauswahl

8.2.1 Allgemeines und Aufstellen der Morphologischen Matrix

Anders als bei der konventionellen Dampfkraftwerkstechnik sind die Schaltungs- Möglichkeiten bei dem innovativen Dampfkreislauf nicht standardisiert. Es gilt also die verschiedenen Möglichkeiten aufzulisten, durchzurechnen, zu bewerten und die bestmögliche Variante herauszuarbeiten. Für das Herstellen einer Variantenvielfalt kann die Kreativtechnik der Morphologischen Matrix (Noack, 2008) hilfreich sein. Dabei wird die Gesamtproblematik analysiert, in kleinere Teilprobleme aufgespalten, für jedes Teilprobleme werden Lösungen aufgelistet und entwickelt; schlussendlich wird diese Lösungsvielfalt zu einer Gesamtlösung kombiniert.

Für das Finden bestmöglicher Gesamtlösung (Vorzugsvarianten) stehen also folgende Schritte an:

- Herstellen einer Variantenvielfalt durch die Morphologische Matrix
- Ausblenden der nicht kompatiblen Kombinationen
- Bewerten der Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich der Effizienz (ggf. unter zur Hilfenahme der thermodynamischen Simulation)
- Bewerten der Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich der Plausibilität und des Aufwandes.

In Vorfeld wurde erarbeitet, dass nur der innovative Zweidruck- und vor allem der Dreidruck-Dampfprozess, nicht aber der Eindruck-Dampfprozess, gegenüber der Benchmark des ORC-Prozesses Chancen hat, bezüglich der Effizienz entgegen zu halten. Die Abbildung 8-2 zeigt die Wirkungsgradabschätzungen der angesprochenen Technologien (für diese Abschätzung wurden zunächst Vereinfachungen getroffen: konservative Generator-, Motoren- und Pumpen-Wirkungsgrade, Berücksichtigung der Pumpenarbeit für die Nettoleistung, vorgegebener Kondensatordruck; Bezugspunkt der Netto-Wirkungsgrade 0 °C; hingegen wurde die Abhängigkeit des Turbinenwirkungsgrades vom Gefälle und damit von Dampfdruck, siehe Abbildung 8-11 berücksichtigt).

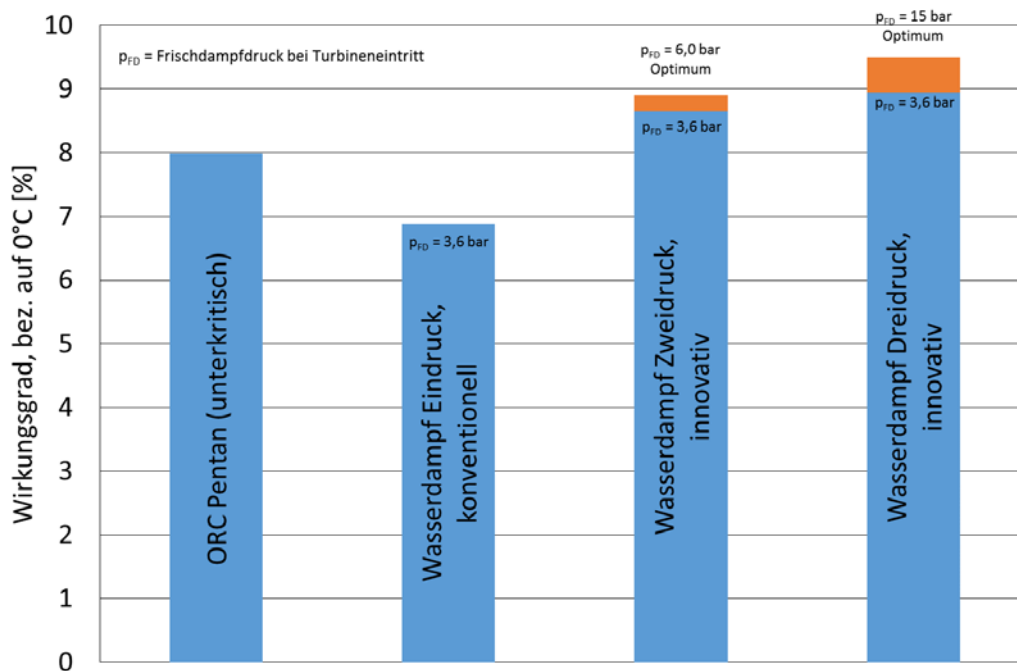


Abbildung 8-2: Wirkungsgradabschätzungen der Technologien: ORC-Prozess, Eindruck-Dampfprozess, innovativer Zweidruck- und Dreidruck-Dampfprozess

Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich also allgemein auf Dampfprozesse mit drei Druckniveaus, nämlich mit einer HD-, einer MD- und einer ND-Stufe, seien sie nun konventionell oder innovativ. Sinngemäß sind die gewonnenen Erkenntnisse auch Dampfprozesse mit zwei Druckniveaus übertragbar. Für die Gesamtproblematik der bestmöglichen Schaltung des Verfahrens treten an der Stelle der Teilprobleme die einzelnen Verfahrensschritte (das „Was“) und an Stelle der Teillösungen die Merkmalsausprägung (das „Wie“). Die Verfahrensschritte sind in der Morphologischen Matrix in Zeilen (mit 1, 2, 3, ... 10) und seine Merkmalsausprägung in Spalten (a, b, c, d) angeordnet (siehe Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Morphologische Matrix für Dreidruck-Dampfprozesse – zunächst ohne Bewertung

		Merkmals-Ausprägung			
Verfahrensschritte		a.	b.	c.	d.
1.	Speisewasser Pumpe	HD,MD,ND-Pumpen	gemeinsame Pumpe		
2.	Speisewasser-Vorwärmung	HD,MD,ND-Heizfläche	gemeinsame Heizfläche		
3.	Eco-Vorverdampfung	keine ~	im HD-Eco	im HD,MD,ND-Eco	
4.	Sattdampferzeugung	HD,MD,ND-Heizfläche & Trommel	Dampfabscheide-Flaschen	Flash-Dampf	Dampfabscheider & Flash
5.	Dampf-Überhitzung	HD,MD,ND-Heizfläche	nur HD- Heizfläche	keine ~	
6.	Rücklauf	kein ~	in die Speiseleitung	in den Kondensator	
7.	Dampfturbine	serielle Einspeisung	parallele Teilturbinen	parallele Düsenkästen	
8.	Kondensationsdruck	Ein-Druck	gestufter Druck		
9.	Abdampfkondensation	direkt, luftgekühlt	System HELLER	über Flüssigkeitskreis	Nasser Kühlturm
10.	Lastanpassung	Festdruck & Drossel	Festdruck & Regelrad	Gleitdruck	Gleitdruck & Überström

Zu einigen Begriffen der Matrix werden Erläuterungen gegeben:

- Eco-Vorverdampfung: Speisewasser-Vorwärmung exakt bis zum Siedebeginn oder bereits in den Bereich der Vorverdampfung, also ohne „Speisewasserunterkühlung“; dies ist von thermodynamischer Relevanz
- Rücklauf: Sattwasser aus einer Trommel, einer Flasche, einem Flash-Entspannungsgefäß, welches im Kreislauf verwendet wird
- Dampfturbine: die serielle Einspeisung ist nur bei einer Mehrstufen-Dampfturbine möglich
- Kondensationsdruck: ein gestufter Kondensationsdruck erfordert zwei oder mehrere Kondensatorstufen und folglich zwei oder mehrere Turbinenabdampf-Fluten; eine eher unkonventionelle Lösung
- System HELLER: eine wenig gebräuchliche Abdampfkondensation mit einem Einspritzkondensator und der Rückkühlung des Einspritzwassers über „Tischkühler“.

8.2.2 Morphologische Matrix für konventionelle Dreidruckprozesse

Die Tabelle 8-2 zeigt die verarbeitende Morphologische Matrix, wobei markierten Felder dem konventionellen Verfahren entsprechen.

Tabelle 8-2: Morphologische Matrix für konventionelle Dreidruck-Dampfprozesse; die angeführten Ausprägungen sind aber ebenfalls mit dem konventionellen Dreidruck-Dampfprozesse kombinierbar

		Merkmals-Ausprägung			
Verfahrensschritte		a.	b.	c.	d.
1.	Speisewasser Pumpe	HD,MD,ND-Pumpen			
2.	Speisewasser-Vorwärmung	HD,MD,ND-Heizfläche			
3.	Eco-Vorverdampfung	keine ~	im HD-Eco	im HD,MD,ND-Eco	
4.	Sattdampferzeugung	HD,MD,ND-Heizfläche & Trommel	Dampfabscheide-Flaschen		
5.	Dampf-Überhitzung	HD,MD,ND-Heizfläche	nur HD- Heizfläche	keine ~	
6.	Rücklauf	kein ~			
7.	Dampfturbine	serielle Einspeisung	parallele Teilturbinen	parallele Düsenkästen	
8.	Kondensationsdruck	Ein-Druck	gestufter Druck		
9.	Abdampfkondensation	direkt, luftgekühlt	System HELLER	über Flüssigkeitskreis	Nasser Kühlturm
10.	Lastanpassung	Festdruck & Drossel	Festdruck & Regelrad	Gleitdruck	Gleitdruck & Überström

Bei der Bewertung der Effizienz von Dampfkreisläufen kann man die Dampfparameter nicht außer Acht lassen, und es existiert die Meinung: je höher, desto effizienter. Überraschender Weise zeigten Simulationsrechnungen, dass eine Dampf-Überhitzung kontraproduktiv ist, sobald der Überhitzer einen Druckabfall von mehr als 0,16 bar hat, was einschätzungsgemäß immer der Fall ist. Die folgenden thermodynamischen Simulationen betrachten aus dem angeführten Grund nur Sattdampfprozesse (also: keine Dampf-Überhitzung); Demgegenüber wünschen sich manche Dampfturbinenhersteller eine geringe Dampfüberhitzung, sodass in diesem Punkte, den betrieblichen Aspekt berücksichtigend, Zugeständnisse zu machen sind. Eine wesentliche Rolle hinsichtlich der Effizienz spielen hingegen die Dampfdrücke und auch hier zeigt sich, dass die Aussage: je höher, desto effizienter nicht stimmt. Es existieren optimale Drücke, sodass ein Unter- und auch ein Überschreiten den Wirkungsgrad schmälert (sofern sinnvollerweise der elektrische Wirkungsgrad auf die Enthalpie der Abwärmequelle bezogen wird). Effizienzbewertungen verschiedener System setzten also immer zumindest eine grobe Druckoptimierung der einzelnen Systeme voraus.

Entscheidend für die Effizienz von Abwärmesystemen ist der Grad, wieweit sich die Kreislaufmediums-Temperaturen an die Abkühlkurve des Abwärmestroms anschmiegen. Die optimale Heizflächenanordnung, in Richtung des Abwärmestroms, ist daher:

1. HD-Verdampfer, gefolgt vom HD-Vorwärmer, welcher das Speisewasser vom MD-Temperaturniveau auf das HD-Temperaturniveau, also ohne der sonst üblichen Speisewasserunterkühlung und eher noch mit einer Vorverdampfung (Aspekt 3.c), aufwärmt.

2. MD-Verdampfer, gefolgt vom MD-Vorwärmer, welcher das Speisewasser vom ND-Temperaturniveau auf das MD-Temperaturniveau, aufwärmt.
3. ND-Verdampfer, gefolgt vom ND-Vorwärmer, welcher das Speisewasser vom Kondensator-Temperaturniveau auf das ND-Temperaturniveau, aufwärmt.

Wenn man die vorhergehenden Punkte realisiert, kommt man zu einem besteffizienten („fortschrittlich konventionellen“) Dreidruckprozess. Die Abbildung 8-3 zeigt das Verfahrensfließbild für die Simulation und die Resultate (da im Simulationsprogramm keine Einspeiseturbine vorgesehen ist, musste die Dreidruckturbine in drei Teilturbinen aufgedröselt werden; um den Beitrag jedes Dampfstroms identifizieren zu können, wurde zudem jede Teilturbine mit einem Teil-Kondensator und einer Teil-Speisepumpe gekoppelt). Es ist sinnvoll, für die Bewertungsprozeduren die Effizienz dieses „fortschrittlich-konventionellen“ Dreidruckprozesses als Zielwert zugrunde zu legen.

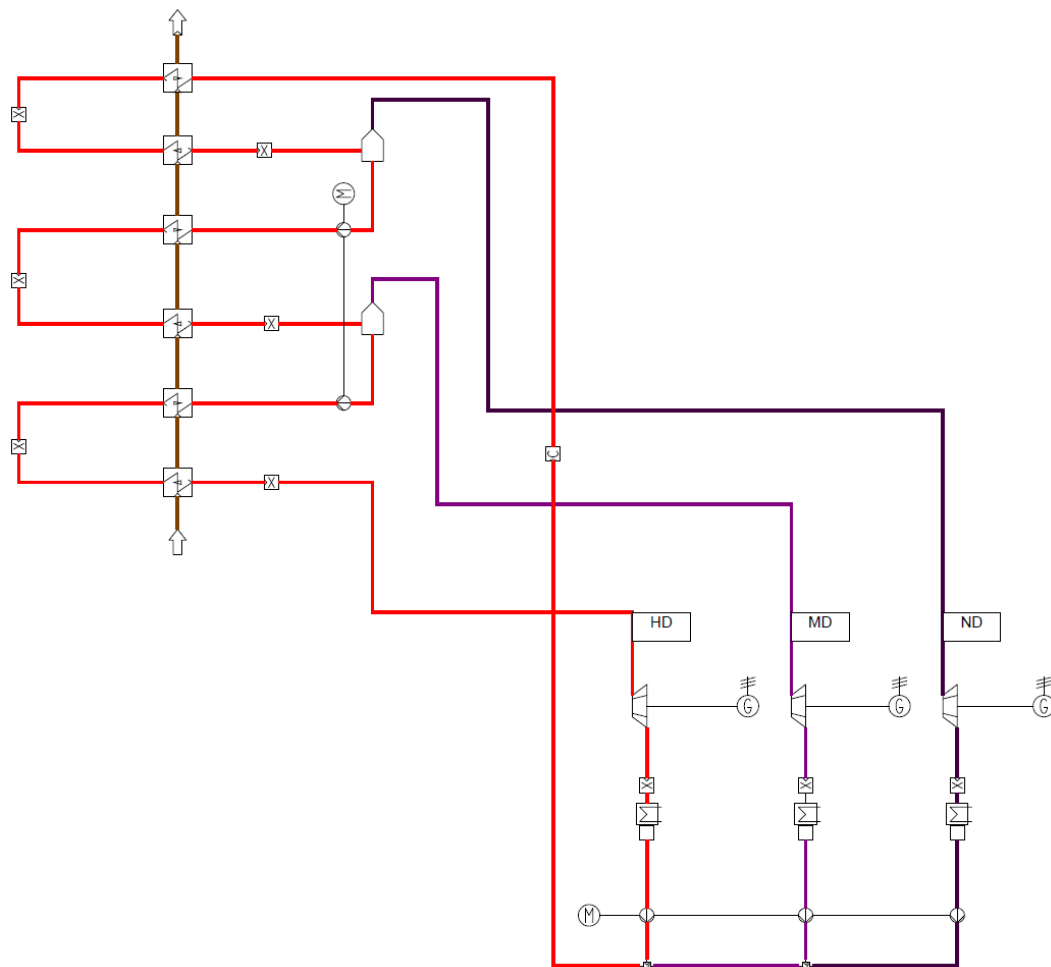


Abbildung 8-3: Verfahrensfließbild des besteffizienten „fortschrittlich konventionellen“ Dreidruckprozesses; der elektrische Wirkungsgrad, bezogen auf die Enthalpie der Abwärmequelle, beträgt 9,29 % (Zielwert), Kondensatordruck 0,075 bar

Wie auch aus dem Verfahrensfließbild zu entnehmen ist, wird der an sich gute elektrische Wirkungsgrad (Zielwert) durch einen hohen apparativen Aufwand (6 Heizflächen!) und einem einschätzungsgemäß hohen Regelaufwand erkaufte.

8.2.3 Morphologische Matrix für den innovativen Dreidruckprozess

Die Tabelle 8-3 zeigt die verarbeitende Morphologische Matrix für den innovativen Dreidruck-Dampfprozess – die grau hinterlegten Felder zeigen, verglichen mit dem konventionellen Dreidruckprozess, die weitgehend verschiedenen Ausprägungen ein und derselben Verfahrensschritte, sodass man versucht ist annehmen, dass hier die Umkehr-Methode zur Kreativitätsfindung (Noack, 2008) zur Anwendung kam (suche Lösungen, die das 180°-Gegenteil von konventionellen Lösungen sind).

Tabelle 8-3: Morphologische Matrix für innovativen Dreidruck-Dampfprozesse - grau hinterlegt; die angeführten Ausprägungen sind aber ebenfalls mit dem innovativen Dreidruck-Dampfprozesse kombinierbar

		Merkmals-Ausprägung			
Verfahrensschritte		a.	b.	c.	d.
1.	Speisewasser Pumpe		gemeinsame Pumpe		
2.	Speisewasser-Vorwärmung		gemeinsame Heizfläche		
3.	Eco-Vorverdampfung	keine ~	im HD-Eco		
4.	Sattdampferzeugung		Dampfabsciede-Flaschen	Flash-Dampf	Dampfabscieder & Flash
5.	Dampf-Überhitzung		nur HD-Heizfläche	keine ~	
6.	Rücklauf		in die Speiseleitung	in den Kondensator	
7.	Dampfturbine	serielle Einspeisung	parallele Teilturbinen	parallele Düsenkästen	
8.	Kondensationsdruck	Ein-Druck	gestufter Druck		
9.	Abdampfkondensation	direkt, luftgekühlt	System HELLER	über Flüssigkeitskreis	Nasser Kühlturm
10.	Lastanpassung	Festdruck & Drossel	Festdruck & Regelrad	Gleitdruck	Gleitdruck & Überström

Die Abbildung 8-4 zeigt das Verfahrensfliessbild und die Resultate der Simulation des innovativen Dreidruckprozesses.

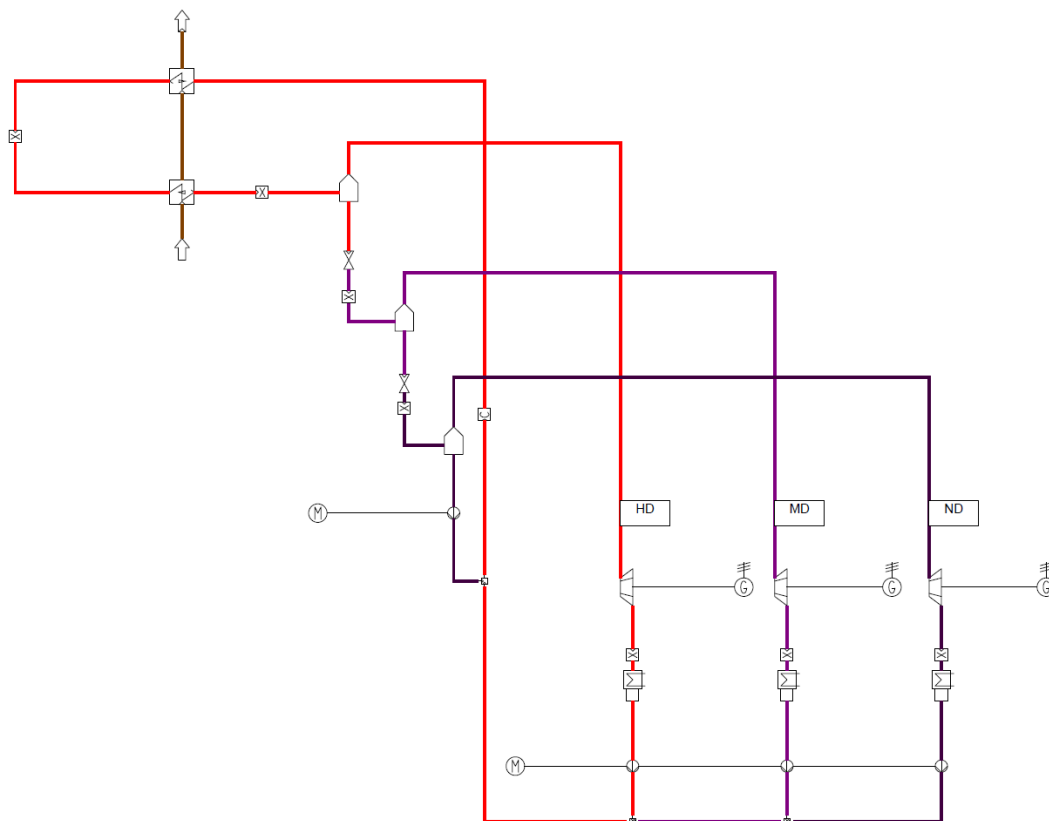


Abbildung 8-4: Verfahrensfließbild des innovativen Dreidruckprozesses; der elektrische Wirkungsgrad, bezogen auf die Enthalpie der Abwärmequelle, beträgt 9,493 %, ist also um sogar um 2,2 rel. % besser als der Zielwert, Kondensatordruck 0,075 bar

Überraschend zeigten die Simulations-Resultate des innovativen Dreidruckprozesses, dass der erreichte elektrische Wirkungsgrad mit 9,493 % geringfügig, aber doch, um 2,2 rel. % besser ist als der Zielwert des fortschrittlich konventionellen Dreidruckprozesses. Vermutlich erlaubt die Flash-Dampferzeugung noch niedrigere Abgastemperaturen, womit die systembedingten Drosselverluste der Flash-Dampferzeugung überkompensiert werden können. Der innovative Dreidruckprozess baut allerdings nicht alleine auf die Flash-Dampferzeugung auf, da der HD-Dampf durch die Vorverdampfung und die Abscheidung in der HD-Abscheideflasche zustande kommt und nur auf der MD- und ND-Seite die Flash-Verdampfung zugrunde gelegt wurde.

Zahlreiche Nebenvarianten zu dieser Basisauslegung wurden untersucht, wobei es für spezielle Anwendungsgebiete durchaus noch Ansatzpunkte für geringfügige Verbesserungen geben könnte.

8.2.4 Lastanpassung

Eine Lastregelung, wie bei befeuerten Dampfkraftsystemen gibt es bei Abwärmesystemen nicht; bei den meisten Abwärmequellen fluktuiert die verfügbare Wärmemenge, und es geht darum, wie flexibel und effizient sich das System diesen Lastwechsel anpasst. Die Analyse der verfügbaren Daten bei der Abluft von Klinkerkühlern zeigt, dass sich die Abluftmenge kaum ändert, die Abluft-Eintrittstemperatur aber doch, zwischen 250 und 300 °C, mit dem Mittelwert von 275 °C, schwankt (bei der Streubreite wurden dabei 1,5 Standardabweichungen nach beiden Seiten berücksichtigt); bezüglich der Wärmelast bedeutet dies eine Schwankung von ca. 10 %. Zur Lastanpassung, siehe Zeile 10 der Morphologischen Matrix, stehen

folgende, auch aus der konventionellen Dampfkraftwerkstechnik bekannte, Technologien zur Verfügung (siehe Abbildung 8-5):

- Festdruckbetrieb des Dampferzeugers durch das Druckhalten des Überströmventils vor der Turbine
- Festdruckbetrieb des Dampferzeugers durch das Zuschalten und Abschalten von den Düsengruppen der Turbine; dieses Lastregime erfordert eine Turbine mit einer Gleichdruck-Regelstufe und mehreren Düsengruppen, eine Bauart, welche noch bei Industrieturbinen gelegentlich, bei Kraftwerksturbinen nicht mehr und bei Kleinturbinen nicht verfügbar ist.
- Gleitdruckbetrieb des Dampferzeugers und der Dampfturbine, ohne Drosselventil dazwischen, der Vordruck vor der Turbine stellt sich ca. proportional zum Dampfdurchsatz ein.

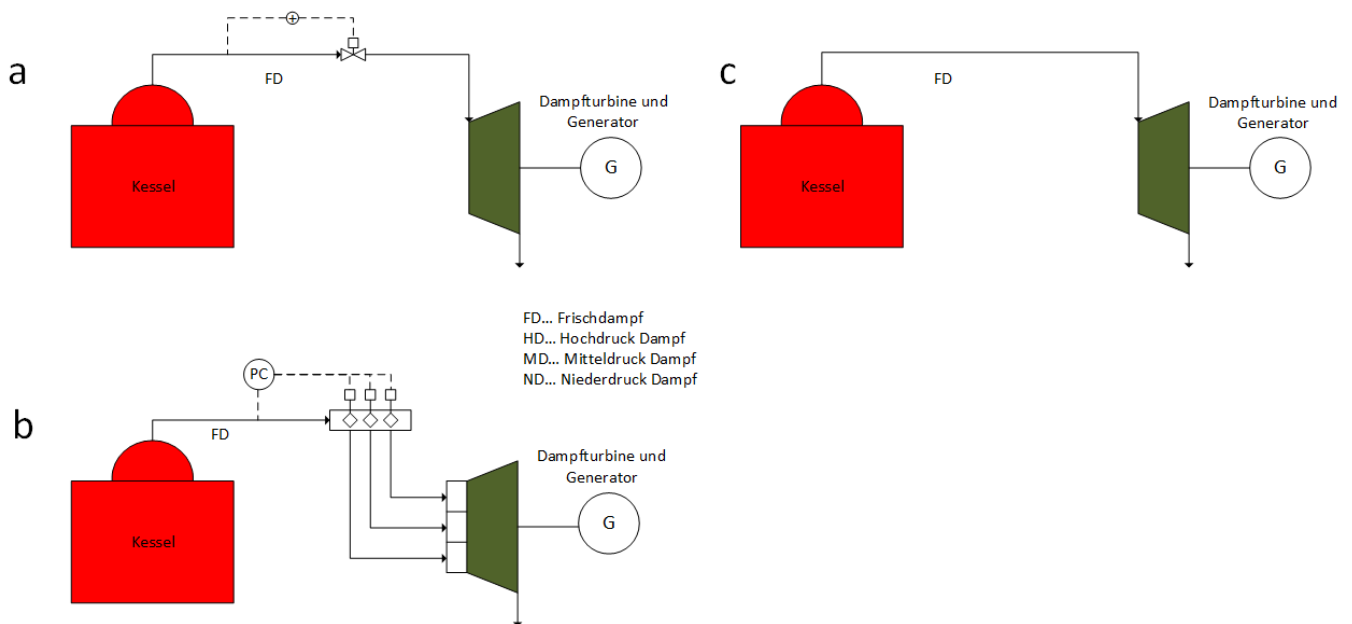


Abbildung 8-5: Lastanpassung mit den bekannten Technologien: a. Festdruckbetrieb durch Drosselregelung, b. Festdruckbetrieb durch Düsengruppenregelung, c. Gleichdruck-Fahrweise

Es genügt, die Auswirkungen dieser Betriebsweisen auf die Effizienz anhand der einfachen Eindruck-Schaltung zu untersuchen. Die Abbildung 8-6 zeigt die relative Nettoleistung (Bezugspunkt ist die Nettoleistung der Gleitdruckfahrweise bei 275 °C Ablufteintritts-Temperatur) in Abhängigkeit der Ablufteintritts-Temperatur für die genannten Regime der Lastanpassung: die drosselgeregelte Festdruck-fahrweise (a.) ist die verlustreichste, der Gleitdruckbetrieb (c.) ist der effizienteste – und auch der einfachste – und übertrifft sogar die Effizienz einer Regelstufe (b.). Damit ergibt sich die Gleitdruckfahrweise (Aspekt 10.c) als vorzuziehende Variante.

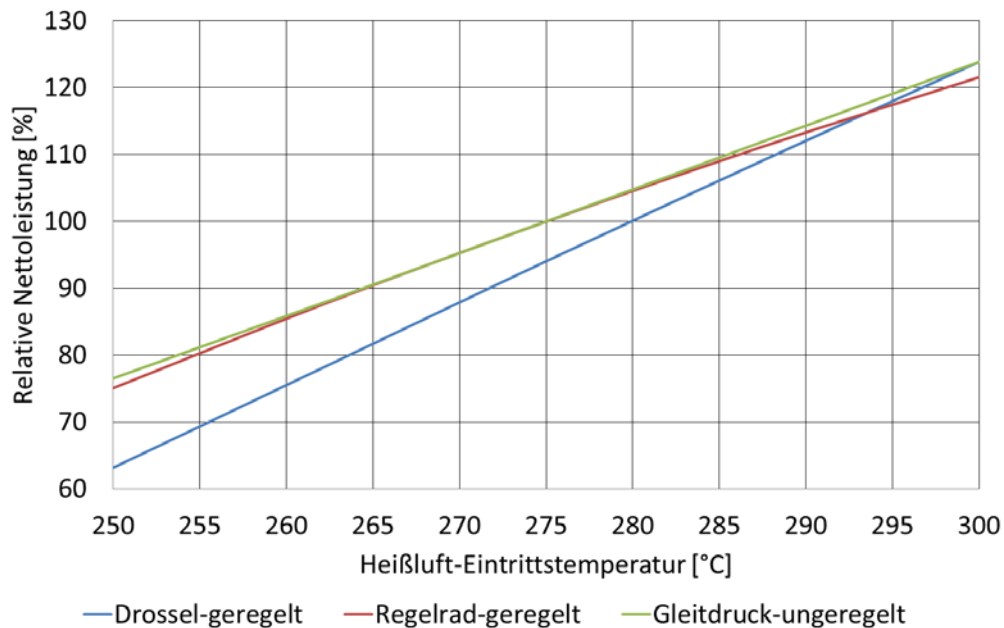


Abbildung 8-6: Relative Nettoleistung (Bezugspunkt ist die Nettoleistung der Gleitdruckfahrweise bei 275°C Abluft- Eintrittstemperatur) in Abhängigkeit der Ablufteintritts-Temperatur für die drosselgeregelter Festdruckfahrweise (a.), die Regelrad geregelte Festdruckfahrweise (b.) und der unregelmäßige Gleitdruckbetrieb (c.)

8.2.5 Wärmeauskopplung

Bei einer Auskopplung von Prozesswärme kommt es in der Regel zu einer Minderleistung am Generator, also zum Teillastbetrieb des Dampfturbosatzes. Die Frage ist, wie hoch der sog. Auskopplungsfaktor ist (= ausgekoppelte Wärme zur Minderleistung); dieser Wert ist vergleichbar mit dem CoP (Coefficient of Performance) einer elektrischen Wärmepumpe, welcher auch eine Verhältniszahl zwischen der Nutzwärmeleistung und einer elektrischen Leistung darstellt. Wie aus dem Fließbild plausibel ersichtlich vermindert sich bei einer maximalen Dampfentnahme auf der HD-Schiene die Generatorenleistung um den Beitrag der HD-Teilturbine; analoges gilt für die MD- und die ND-Schienen. In der Tabelle 8-4 sind die Auskopplungsfaktoren die die HD-, MD- und ND-Dampfentnahmen dargestellt, welche durchwegs über dem günstigen Wert 5,3 liegen. Noch bessere (höhere) Auskopplungsfaktoren ergeben sich bei einer Entnahme von sensibler Wärme, unterhalb der jeweiligen Abscheideflasche, bis zu einer Abkühlung, sodass die nachfolgende Abscheideflasche keinen Flash-Dampf mehr produziert; für die Wärmeauskopplung unterhalb der ND-Abscheideflasche muss schließlich keine elektrische Minderleistung in Kauf genommen werden.

Tabelle 8-4: Die elektrische Minderleistung und der Auskopplungsfaktor bei einer Entnahme von Wärme in Form von Dampf und als sensible Wärme

	Auskopplung	Minderleistung	Auskopplungs-Faktor	Wärmetauscher				
				T_{in}	T_{ex}	h_{in}	h_{ex}	m
Ausgekoppelte Wärme	kW_{th}	kW_{el}	kW_{th}/kW_{el}	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s
HD Dampf*	4.002	750	5,33	198	40	2.791	170	1,53
HT sensibel	2.716	505	5,37	198	144	845	608	11,46
MD Dampf*	3.272	505	6,47	144	40	2.739	170	1,27
MT sensibel	2.352	243	9,69	144	89	608	377	10,18
ND Dampf*	2.566	243	10,57	89	40	2.659	170	1,03
NT sensibel	1.888	0	Null-Div.	89	40	377	170	9,15
*) bis Kondensat, 40 °C								
T_{in} Temperatur am Eintritt		h_{in} spezifische Enthalpie am Eintritt				m Massenstrom		
T_{ex} Temperatur am Austritt		h_{ex} spezifische Enthalpie am Austritt						

Die Möglichkeit, überhaupt Wärme aus dem Kreisprozess zu entnehmen, die vorteilhafte Höhe des Auskopplungsfaktors und die Option, sensible Wärme mit nochmals gesteigerten Auskopplungsfaktoren vorzusehen, zeichnen den innovativen Dampfprozess gegenüber anderen Prozessen aus.

8.2.6 Fazit

Wegen der Neuartigkeit des innovativen Dampfprozesses war es erforderlich, verschiedene Varianten-Kombinationen des Grundprinzips zu untersuchen, wobei zunächst eine Variantenvielfalt durch das Erstellen einer Morphologischen Matrix hergestellt wurde, welche dann durch Plausibilitätsüberlegungen und auch Prozess-Simulationen auf eine geringere Anzahl von Vorzugsvarianten reduziert wurden.

Der ursprüngliche Basisentwurf des innovativen Dreidruck-Dampfprozesses wurde im Wesentlichen als Optimalvariante bestätigt, es zeigte sich als nicht erwartetes Ergebnis, dass sogar gegenüber dem konventionellen Dreidruck-Dampfprozess mit 6 Heizflächen in seiner thermodynamisch optimierten Form noch ein verbleibender thermodynamischer Vorteil besteht. Erklärungen dafür wurden erarbeitet. Eine Dampfüberhitzung ist thermodynamisch bedeutungslos, kann aber betriebliche Vorteile für die Dampfturbine bringen. Einige Nebenvarianten mit dem Potential einer weiteren, inkrementalen Effizienzsteigerung wurden identifiziert, welche in bestimmten Anwendungsfällen vorteilhaft sein könnten. Bezüglich der bei Abhitze-Prozessen geforderten Lastanpassung wurden die klaren Vorteile der Gleitdruckfahrweise herausgearbeitet.

Bezüglich der Auskopplung von Prozesswärme zeichnet sich der innovative Dampfprozess gegenüber anderen Prozessen insofern aus, als der erstgenannte die Möglichkeit hat, Wärme in Form von Entnahmedampf aus dem Kreisprozess bei einer vorteilhaften Höhe des Auskopplungsfaktors zu entnehmen, und die (neuartige) Option besteht, sensible Wärme in Form von Heiß-Druckwasser mit nochmals gesteigerten Auskopplungsfaktoren zu entnehmen.

8.3 Prozessspezifische Komponentenbeschreibung

8.3.1 Kondensatableiter

Bei der Ausgestaltung der Dampferzeugung verdient die externe Flash-Dampferzeugung des Mittel- und Niederdruckdampfes besonderes Augenmerk. Wie die Abbildung 8-1 des innovativen Dampfprozesses zeigt, befinden sich unterhalb der HD- und ND- Abscheideflaschen jeweils Ablaufregelventile, welche die folgenden Funktionen haben: Abfuhr der abgeschiedenen Nässe – Drosselung auf das nächstniedrige Druckniveau, sodass es nach dem Ablaufregelventil zu einer teilweisen Ausdampfung kommt („Flash-Dampf“).

Herkömmliche Ablaufregelsysteme zu dieser Problemstellung werden im Kesselbau über eine Füllstands-Regelung realisiert, bei welcher der Füllstand in der Abscheideflasche die Führungsgröße ist und die Diskrepanz aus dem Zufluss, dem Sattedampf- und dem Sattwasser-Abfluss als Störgröße aufgeschaltet wird. In Kondensatsystemen hingegen wird eine derartige Aufgabe Kondensatableitern überlassen, welche bewegte Teile (Scheiben, Glocken, Schwimmer) aufweisen und vielfach nur eine Auf-Zu-Funktion haben. Diese herkömmlichen Problemlösungen sind für die vorliegende Aufgabenstellung entweder aufwändig oder betrieblich wenig geeignet.

Als Option zu den herkömmlichen Lösungen wird die in der Abbildung 8-7 gezeigte Marktn Neuheit des Venturi-Kondensatableiter näher untersucht (EBE Engineering Ltd., 2011). Die Verhinderung des Dampfdurchtritts („steam trap“ – Funktion) wird bei diesem Kondensatableiter nicht durch ein mechanisches Schließen erreicht, sondern durch die Nutzung der physikalischen Eigenschaften des Sattwassers bei der Druckentlastung.

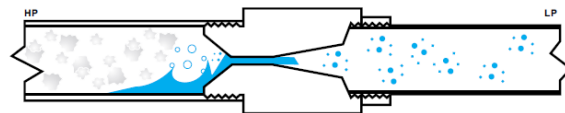


Abbildung 8-7: Venturi-Kondensatableiter („steam trap“) (EBE Engineering Ltd., 2011)

Seit rund zehn Jahren liegen englischsprachige und auch deutschsprachige Veröffentlichungen vor (Gardner, 2003) (Thermal Energy International Inc., o.J.) (Kanyarusoke, et al., 2012) (Abu-Halimeh, 2004). In einer kritischen Bewertung der unterschiedlichen Kondensatableitersysteme, inklusiver des Venturi-Kondensatableiters, werden tabellarisch Stärken und Schwächen der verschiedenen Systeme aufgelistet, (Kanyarusoke, et al., 2012), siehe Abbildung 8-8.

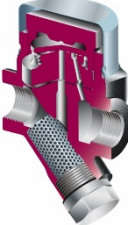
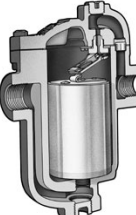
Kondensatableiter Bauart	Vorteile	Nachteile	Anmerkung
Thermischer Kondensatableiter  Quelle: Spirax Sarco	1. Im Arbeitsbereich unabhängig von Druck und Temperatur 2. Unbeeinflusst von Wassersschlägen, Frost und Vibrationen	1. Entlüftet nicht beim Anfahrvorgang 2. Schwellenwert des Arbeitsdrucks für Betrieb erforderlich 3. Beeinflussung durch Gegendruck	1. Arbeitet mit einer beweglichen Scheibe, im Dichtungsbereich anfällig auf Verschleiß und Störungen 2. Bei Ausfall meist geöffnet
Venturi Kondensatableiter  Quelle: EBE Engineering	1. Geringer Wartungsbedarf und Langlebigkeit 2. Unbeeinflusst von Wassersschlägen und Vibrationen 3. Leichte Ableitung von Luft, keine Entlüftung erforderlich 4. Einfach und energieeffizient	1. Dimensionierung erfordert die präzise Vorhersage der Lastzustände 2. Leckagen bei überhitzten Dampf 3. Hohe Kesselwasserqualität erforderlich	1. Neuartige Abscheidetechnologie – oft irrtümlich verwechselt mit Blenden 2. Störungen sind meist Folge von eingeschlossenen Partikeln, die Rückstau von Kondensat und daraus resultierende Probleme in Flussrichtung verursachen
Glocken- Kondensatableiter  Quelle: Armstrong	1. Unbeeinflusst von Wassersschlägen und Vibrationen 2. Einsatz bei überhitzten Dampf möglich 3. Am wenigsten anfällig auf Verschmutzungen und Ablagerungen 4. Kontinuierliche Entlüftung	1. Kann einfrieren 2. Dampfleckage bei niedriger Leistung	1. Bei Ausfall meist geöffnet, möglicherweise auch geschlossen.

Abbildung 8-8: Bewertung der unterschiedlichen Kondensatableitersysteme nach Kanyarusoke, et al. (2012)

Die geltend gemachten Schwächen des Venturi-Kondensatableiters treffen aber für den vorgesehenen Einsatz im innovativen Dampfprozess nicht zu:

- Vorhersehbarkeit der Last: die Last ist durch die Simulation des Kreislaufes für Nenn-, Unter- und Über-Last vorhersehbar.
- Leckage bei überhitztem Dampf – nach einem Flash-Tank gibt es nur gesättigte Zustände.
- Speisewasserqualität – diese liegt bei einem Dampfkreislauf zwangsläufig vor.

Demnach verbleiben die Vorteile:

- Zuverlässigkeit
- Kontinuierlicher Betrieb
- Energieeffizient

Einschätzungsgemäß könnte demnach das Venturi-Kondensatableitersystem für den gegenständlichen Dampfprozess vorteilhaft sein und zu weiteren Vereinfachungen bzw. Kosteneinsparungen beitragen, sodass diese Option anlagenbaumäßig untersucht wird.

8.3.2 Dampfturbine

- **Konzept Innovative Gleichdruckturbine mit getrennten Düsenkästen**

Bei der Ausgestaltung der Dampfturbine werden neue Wege beschritten, um mit einfachstem Aufwand mehrere Dampfmenge, mit mehreren Druckniveaus (also z.B. 3), verarbeiten zu können.

Herkömmliche Dampfturbinensysteme zu dieser Problemstellung, welche sich meist darauf beschränkt, zu einer Hauptdampfmenge eine Zusatzdampfmenge niederen Druckes zu verarbeiten, bestehen einerseits in der Einspeiseturbine, mit einer Einspeisung für den Zusatzdampf inmitten des Dampfturbinenzylinders und andererseits in einer zweizylindrigen Dampfturbine, bei welcher der Zusatzdampf in die Überströmleitung zwischen dem Hochdruck- und dem Niederdruckzylinder zugemischt wird. In beiden Fällen geht man von einer mehrstufigen bzw. mehrzylindrigen Ausgestaltung der Dampfturbine aus. Über das Schluckvermögen der Niederdruckstufen bzw. des Niederdruckzylinders liegt eine gegenseitige Beeinflussung der Dampfdrücke vor, welche zumindest für einen Abwärme-Dampfkreislauf, welcher im Gegensatz zu einem fossil gefeuerten Dampfkreislauf keine regelbare Wärmezufuhr hat, nachteilig sein kann. Überwiegend, jedoch nicht notwendigerweise, verwenden derartige Systeme eine Überdruckturbine.

Dampfturbinen in der betrachteten Leistungsklasse von größenordnungsmäßig 1 MW_{el} (Kleindampfturbinen) werden als Gleichdruckturbinen, zuweilen nur teilbeaufschlagt (Willinger, et al., 2008), oft nur mit einem Turbinenrad (Hennauer, et al., 1988), neuerdings auch ohne Untersetzungsgetriebe (Hampel, 2008) ausgeführt. Die Bezeichnung Gleichdruckturbine (auch: LAVAL-Turbine, siehe Abbildung 8-9), besagt, dass das gesamte Druckgefälle in einer Düse oder einem Düsenkasten in Geschwindigkeit umgewandelt wird und das Gleichdruckrad die Strömungsumlenkung nutzt.

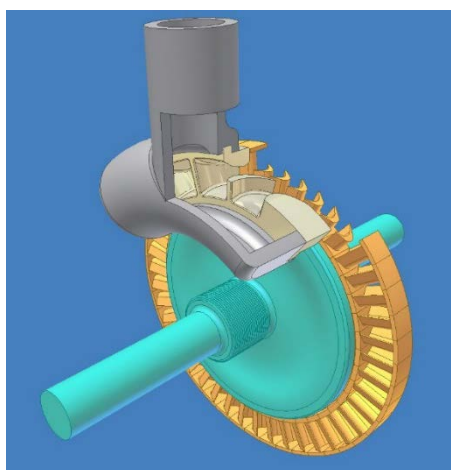


Abbildung 8-9: LAVAL-Turbine mit einem Düsenkasten, teilbeaufschlagt (Kaboldy, 2005)

Die Abbildung 8-10 zeigt (vereinfacht) den Turbinenwirkungsgrad einer Gleichdruck-Turbinenstufe über das Verhältnis u/c (Umfangsgeschwindigkeit/Düsengeschwindigkeit), bei einem Schaufelwirkungsgrad von 80 %; das Optimum liegt bei $u/c = 0,5$; das bekannte Diagramm zeigt die Wirkungsgradeinbuße beim

Abweichen vom Optimum: bei $u/c < 0,5$ hat der Abdampf hinter dem Laufrad einen Gegendrall, bei $u/c > 0,5$ einen Gleichdrall.

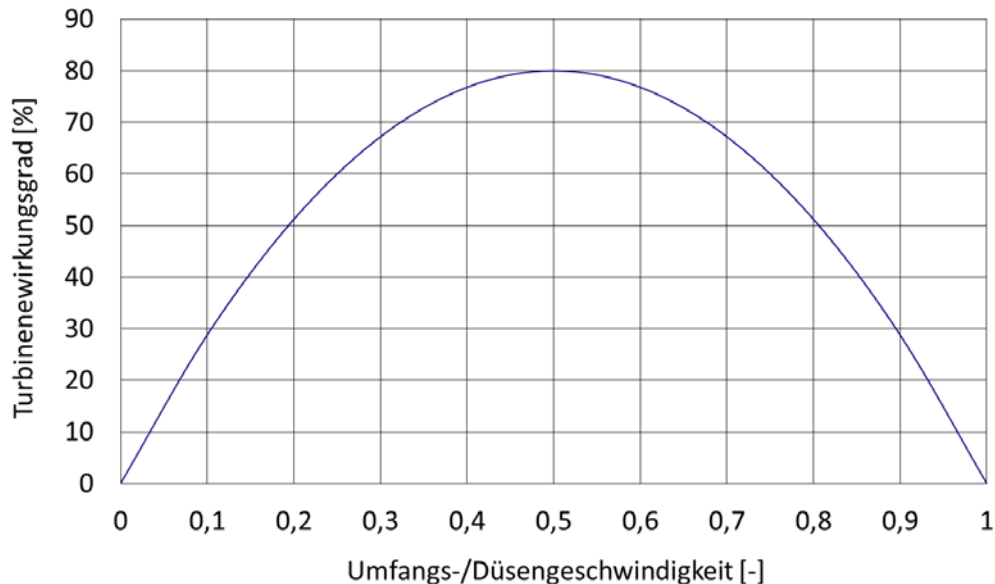


Abbildung 8-10: Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit Verhältnis Umfangs-/Düsengeschwindigkeit (u/c) bei einem Schaufelwirkungsgrad von 80 %

In der Praxis haben Turbinen eine konstante Drehzahl (und eine konstante Umfangsgeschwindigkeit, von z. B. 400 m/s) und es stellt sich die Frage nach dem Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit des Gefälles an der Turbine. Die Abbildung 8-11 zeigt diesen Zusammenhang und aus dieser Darstellungsweise wird bewusst, dass eine Gleichdruckrad in einem sehr weiten Bereich des Gefälles, passable Wirkungsgrade aufweist (z.B. Wirkungsgrade über 70 % im Gefälle-Bereich von 175 und 760 kJ/kg).

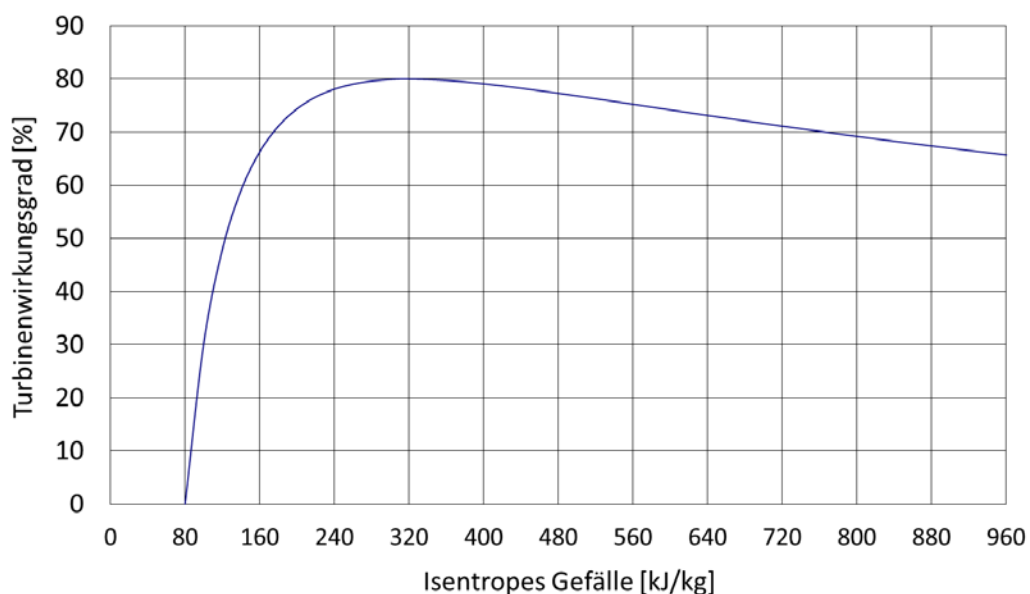


Abbildung 8-11: Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit des isentropen Gefälles bei 80 % Schaufelwirkungsgrad und 400 m/s Umfangsgeschwindigkeit

Das innovative Dampfturbinensystem weist für jede Dampfmenge, mit ihrem Druckniveau, einen eigenen Düsenkasten auf, welche auf das gemeinsame Gleichdruckrad wirken. Die Düsenkästen haben angepasste Düsenwinkel $\alpha_{ND} < \alpha_{HD}$, um Verluste am Laufradeintritt zu minimieren (siehe Abbildung 8-12 und Abbildung 8-13) (Beckmann, 2014). Damit können bei den verschiedenen Gefällen der Dampfmenen die Wirkungsgrade der Abbildung 8-11 zugrunde gelegt werden. Diese Abhängigkeit wurde auch bei den Kreislauf-Simulationsrechnungen mit IPSEpro berücksichtigt. Betrieblich verhalten sich die HD- und ND- Teilsysteme unabhängig und so wurde das gesamte Turbinensystem in der Kreislauf-Simulationsrechnung durch unabhängige, parallel angeordnete Teilturbinen, welche auf einem gleichen Abdampfdruck expandieren, abgebildet. Für Abwärme-Kreisläufe hat diese Unabhängigkeit einen Stellenwert, insbesondere für Niedertemperatur-Abwärme-Systeme, bei welchen die Mittel- und Niederdruckdampfmenen keine „Zusatz“-Dampfmenen sind, sondern mengenmäßig die Größenordnung der „Haupt“- Dampfmenge haben.

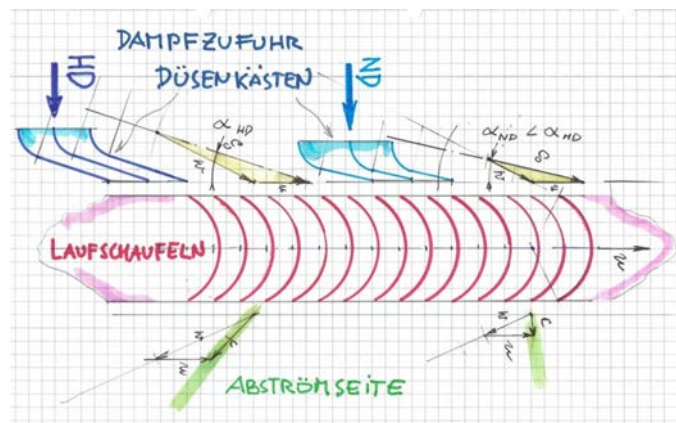


Abbildung 8-12: Innovative Gleichdruckturbine mit getrennten Düsenkästen für die HD- & ND- Dämpfe und gemeinsamen Gleichdruckrad

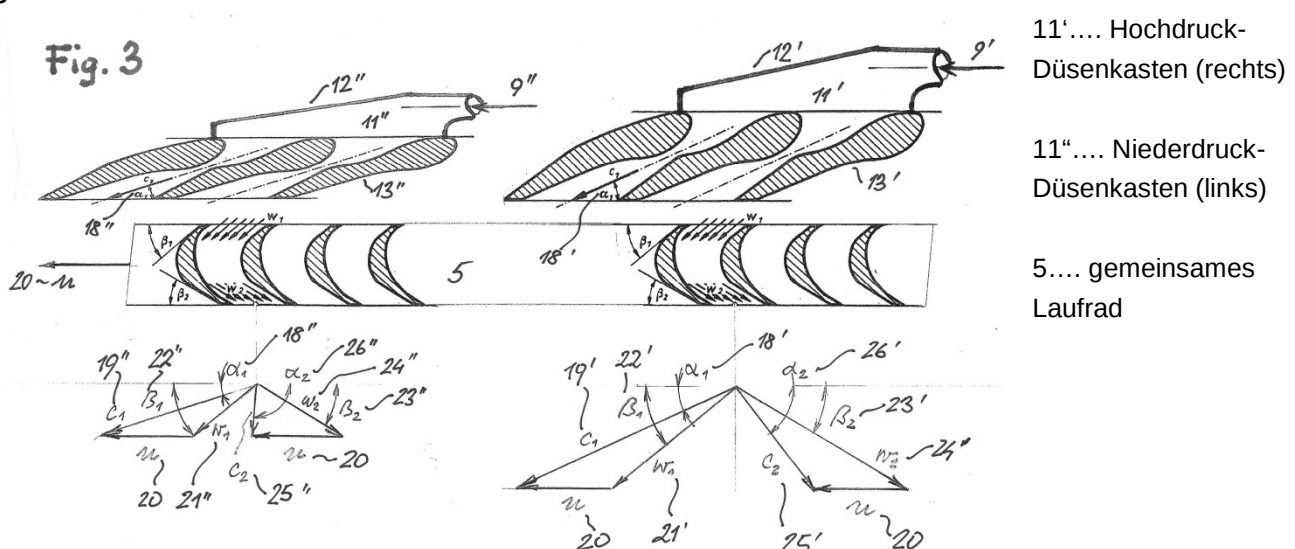


Abbildung 8-13: Innovative Gleichdruckturbine mit gemeinsamen Gleichdruckrad – Düsenkästen und Geschwindigkeitsdreiecke für die HD- & ND- Dämpfe (Beckmann, 2014)

- **Marktverfügbarkeit und Umsetzung Innovative Gleichdruckturbine mit getrennten Düsenkästen**

Im Vorfeld wurde, gemeinsam mit jenem Anlagenbauer, der an der Sondierung Interesse bekundet hat, der Kreis der Turbinenlieferanten evaluiert und eingengt. Hersteller für Kraftwerksdampfturbinen und Industrieturbinen schieden wegen der spezifizierten geringen Leistungsklasse aus, sodass nur wenige Klein-Dampfturbinenhersteller verblieben. Zwei davon haben mit dem Projektteam Gespräche geführt und Angebote gelegt. Im Folgenden werden die Feedback-Ergebnisse festgehalten, wobei aus Gründen der wettbewerblichen Aspekte die Firmennamen anonymisiert wurden:

- a. Firma A: Mehrstufige Turbine mit Überdruck-Beschaufelung, mit zusätzlichen Einspeisungen für den Mittel- und Niederdruck-Dampf. (Firma A, 2015)
- b. Firma B: Einstufige Turbine mit Gleichdruck-Beschaufelung. (Firma B, 2015)

Da jeder Hersteller traditionell seine eigenen Merkmale, z.B. bezüglich der Beschaufelung (Überdruck oder Gleichdruck) hat, konnten die Merkmale der innovativen Dampfturbine nicht vollinhaltlich eingefordert werden.

Ad a: Die Firma A bot eine mehrstufige Turbine mit einer Überdruck-Beschaufelung, mit zusätzlichen Einspeisungen für den Mittel- und Niederdruck-Dampf, mit einem Untersetzungsgetriebe und dem Generator an. Die mehrstufige Bauweise und die unterkritische Entspannung, als firmeneigene Merkmale, schließt an sich die durch das vorgeschlagene, neuartige Turbinenkonzept eine Paralleleinspeisung über Düsenkästen auf ein einziges Gleichdruck-Turbinenrad aus. Dennoch ist die angebotene Lösung hilfreich und zeigt eine marktgängige Lösung, wenn das Konzept der Dreidruck-Dampferzeugung mit den verbleibenden innovativen Merkmalen (Flashdampferzeugung und Venturi-Düsen als kondensatableitenden Drosselorganen) realisiert werden sollte. Mit dieser Dampfturbinenanlage kann die erwartete Klemmenleistung voll eingehalten werden und insbesondere ergeben sich bezüglich der Turbinenwirkungsgrade weitgehende Übereinstimmungen.

Ad b: Die Firma B stellt traditionell einstufige Turbinen mit Gleichdruck-Beschaufelung her. An sich wäre diese Bauart – einstufige Turbinen mit Gleichdruck-Beschaufelung – mit den vorgeschlagenen drei Paralleleinspeisungen über Düsenkästen auf ein einziges Gleichdruck-Turbinenrad kompatibel. Es wurde auch attestiert, dass dies theoretisch möglich sei, jedoch wäre das Vorsehen von drei Dampfanschlüssen eine aufwändige Neuentwicklung. Deshalb wurde eine Eindruck- Variante simuliert und spezifiziert.

Firma B bot daraufhin eine einstufige Eindruck-Turbine mit einer Gleichdruck- Beschaufelung, mit einer Dampfeinspeisung, mit einem Untersetzungsgetriebe und dem Generator, an. Dieser Dampfturbinenanlage kann die erwartete, vorher simulierte Klemmenleistung voll einhalten; insbesondere ergeben sich bezüglich der Turbinenwirkungsgrade weitgehende Übereinstimmungen.

- **Feedback und Schlussfolgerungen**

- Die vorgeschlagene innovative Lösung wird als theoretisch möglich eingestuft.
- Die vorgeschlagene innovative Lösung wird nach dem vorliegenden Bieterkreis als nicht marktgängig eingestuft, da das Vorsehen von drei Dampfanschlüssen als eine zu aufwändige Neuentwicklung angesehen wird.
- Die Erwartungen bezüglich der Turbinenwirkungsgrade werden voll und genau bestätigt.
- Zwischen der Mehrstufen-Turbine mit der Überdruckbeschaufelung und der Einstufen-Turbine mit der Gleichdruckbeschaufelung gibt es - zumindest in der in Frage stehenden Leistungsklasse - keine Unterschiede bezüglich der Wirkungsgrade (Wissenszuwachs, da die gängige Fachmeinung

oft anderes behauptet). Es war daher schlüssig, dass das innovative Dampfturbinenkonzept auf die Einstufen-Turbine mit der Gleichdruckbeschaufelung aufbaut.

- Generell wünschen sich Dampfturbinen-Hersteller einen Festdruckbetrieb mit konstanten Dampftemperaturen; der Festdruckbetrieb ist aber bei Abwärmeanlagen kaum realisierbar und hätte Nachteile im realen, wechselnden Lastbetrieb. Zumindest bei einem Gleichdruckrad ist aber einschätzungsgemäß die Forderung nach einer absoluten Konstanz der Dampfparameter überzogen, da das Turbinenrad nur die Zustände des Kondensatordampfes sieht.
- Generell wünschen sich Dampfturbinen-Hersteller eine leichte Dampfüberhitzung. Thermodynamisch gesehen bringt die Dampfüberhitzung kaum Vorteile, sie kann sogar kontraproduktiv sein, wenn der Druckverlust im Überhitzer zu berücksichtigen ist.

8.4 Basisauslegung und Parametervariation

In der Prozesssimulation ist es vorteilhaft und teilweise auch erforderlich, die Komponenten Turbine, Kondensator und Speisewasserpumpe gemäß der vorhandenen Druckstufung Hoch-, Mittel- und Niederdruck in separate Komponenten mit dem jeweiligen Druckniveau zu splitten (siehe Abbildung 8-14). Physisch, in der realen Ausführung, handelt es sich dabei um einen Bauteil, wie in Abbildung 8-1 dargestellt. Gleiches gilt für den Abhitzekeessel, der in Abbildung 8-14 als zwei Heizflächen (Vorwärmer, Verdampfer) dargestellt ist. Real handelt es sich dabei um einen Bauteil der diese beiden Funktionen übernimmt (siehe Abbildung 8-1).

Die Darstellung der einzelnen Stränge unterschiedlichen Druckniveaus bzw. der unterteilten Heizfläche nach Abbildung 8-14 erleichtert die Erläuterung des Prozessschemas (siehe Tabelle 8-5) und die Darstellung des thermodynamischen Prozessverlaufs im T-s Diagramm nach Abbildung 8-15 bzw. im T-Q- Diagramm in Abbildung 8-16. In folgender Erläuterung sowie in der durchgeführten Simulation werden Druckverluste in Rohrleitungen vernachlässigt, lediglich Druckverluste in den einzelnen Komponenten werden berücksichtigt.

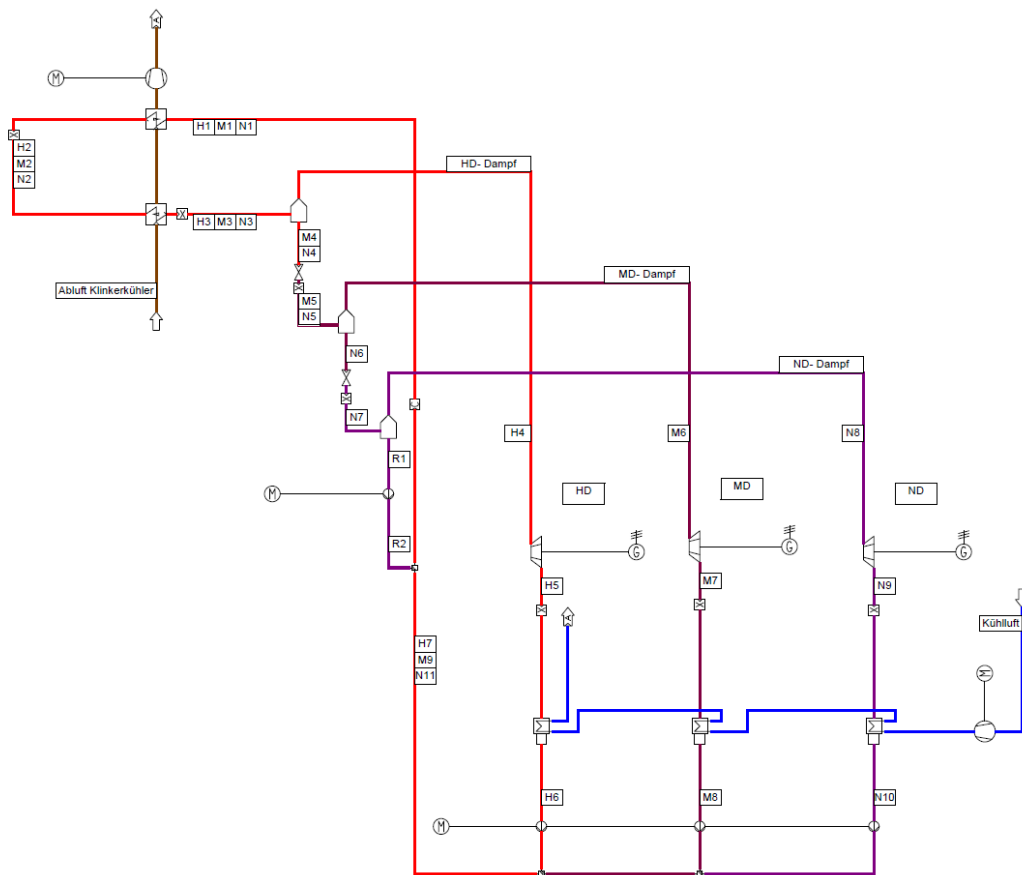


Abbildung 8-14: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus (aus Abbildung 8-1), Prozessschema als aufgelöste Darstellung der drei Druckniveaus mit Beschriftung der Teilstränge (HD...Hochdruck, MD...Mitteldruck, ND...Niederdruck)

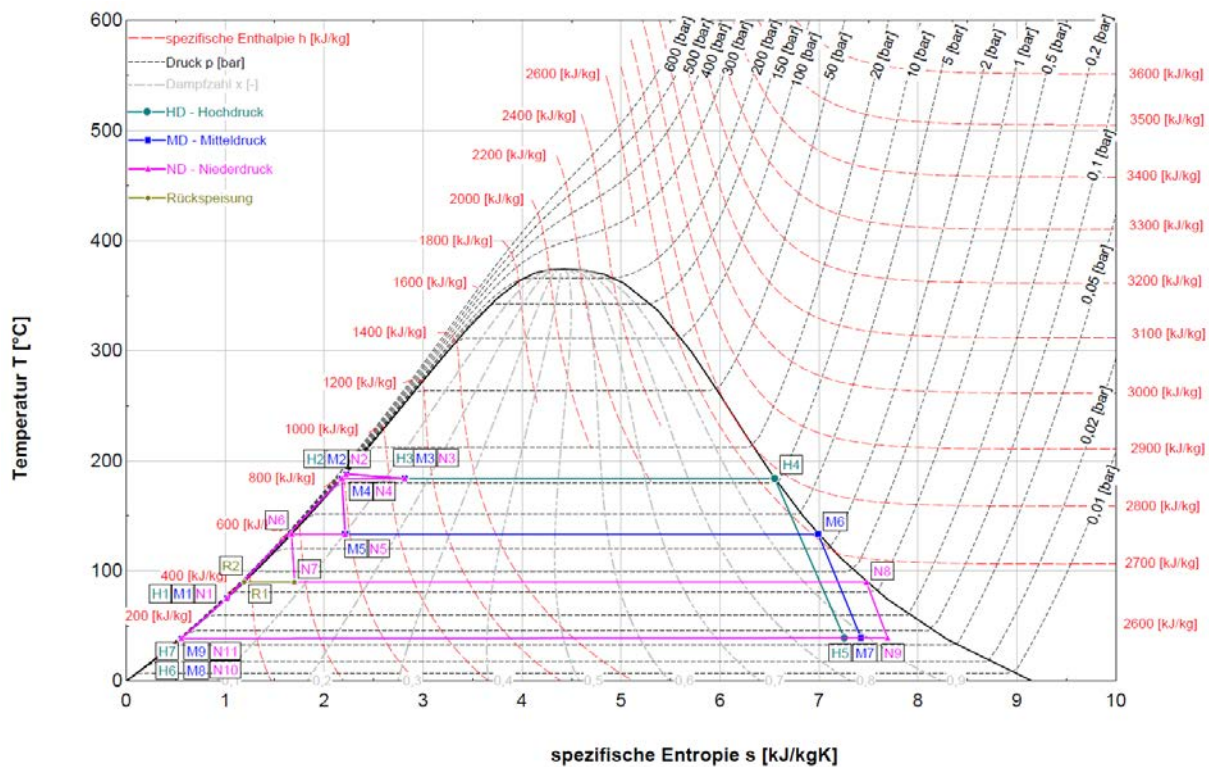


Abbildung 8-15: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Darstellung im T-s Diagramm

Bei der prozesstechnischen Simulation findet im ersten Schritt eine Basisauslegung des Prozesses statt. Die zugrundeliegenden Parameter sind in Kapitel 7 bzw. in diesem Kapitel erläutert. Erster Schritt in dieser Basisauslegung ist die Variation des Drucks im Hochdruck- und Niederdruckstrang des Prozesses mit dem Ziel einer Maximierung des Wirkungsgrades (Zielgröße: Netto- Wirkungsgrad abzüglich aller Verbraucher, Abwärmeleistung bezogen auf 25 °C) zu erreichen. Leider ist in der Literatur die Bezugstemperatur nicht einheitlich – bei der folgenden Parametervariation hat man sich der gängigen Praxis, die Bezugstemperatur mit 25 °C anzusetzen, angeschlossen. Das Ergebnis dieser Parametervariation ist in Abbildung 8-17 ersichtlich. In diesem ersten Schritt wurde das Druckniveau des Mitteldruckdampfes als geometrisches Mittel der beiden Druckniveaus im Hochdruck- und Niederdruckstrang angenommen. Der maximale Wirkungsgrad ergibt sich demnach bei einem Druck von 11,0 bar im Hochdruckstrang und 0,7 bar im Niederdruckstrang.

Im nächsten Schritt wurde mit dem ermittelten Drücken für Hochdruck- und Niederdruckstrang eine Parametervariation des Mitteldrucks durchgeführt. Das Ergebnis dieser Druckvariation ist in Abbildung 8-18 ersichtlich. Bei dieser Optimierungsrechnung zeigt sich, dass der optimale Mitteldruck (wiederum mit der Zielgröße Netto- Wirkungsgrad) nahezu exakt dem bereits zuvor angenommenen geometrischen Mittel der Druckniveaus Hochdruck- /Niederdruckstrang entspricht. Die Ergebnisse für den Auslegungsfall bei optimiertem Druckniveaus finden sich in Tabelle 8-6.

Tabelle 8-5: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Beschreibung der Zustandsänderungen

Zustandspunkte	Komponente	Zustandsänderung	Anmerkungen
H1 – H2 M1 – M2 N1 – N2	Abhitzekeessel/ Vorwärmer	Isobar	Abhitzekeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H2 – H3 M2 – M3 N2 – N3	Abhitzekeessel/ Verdampfer	Isobar, Isotherm	Abhitzekeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H3 – H4	Hochdruckabscheideflasche	Isobar, Isotherm	Abscheidung der Teilströme M4 und N4
H4 – H5	Gleichdruckdampfturbine Hochdruckdüsenkasten (HD)	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	Turbine wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstufe unterteilt
H5 – H6	Kondensator	Isobar, Isotherm	Kondensator wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
H6 – H7	Speisewasserpumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Hockdruck	Speisewasserpumpe wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
H7 – H1 M9 – M1 N11 – N1	Sammler	Isobar	Beimischung Rückspeisewasser R2
M3 – M4 N3 – N4	Hochdruckabscheideflasche	Isobar, Isotherm	Abscheidung des Teilstromes H4
M4 – M5 N4 – M5	Ablaufregelventil	Isenthalp	Venturi- Kondensatabscheider
M5 – M6	Mitteldruckabscheideflasche	Isobar, Isotherm	Abscheidung des Teilstromes N6
M6 – M7	Gleichdruckdampfturbine Mitteldruckdüsenkasten (MD)	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	Turbine wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstufe unterteilt
M7 – M8	Kondensator	Isobar, Isotherm	Kondensator wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
M8 – M9	Speisewasserpumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Hockdruck	Speisewasserpumpe wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
N5 – N6	Mitteldruckabscheideflasche	Isobar, Isotherm	Abscheidung des Teilstromes M6
N6 – N7	Ablaufregelventil	Isenthalp	Venturi- Kondensatabscheider
N7 – N8	Niederdruckabscheideflasche	Isobar, Isotherm	Abscheidung des Teilstromes R1
N8 – N9	Gleichdruckdampfturbine Niederdruckdüsenkasten (MD)	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	Turbine wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstufe unterteilt
N9 – N10	Kondensator	Isobar, Isotherm	Kondensator wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
N10 – N11	Speisewasserpumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Hockdruck	Speisewasserpumpe wurde für Simulation in Hoch-, Mittel- und Niederdruckstrang unterteilt
R1 – R2	Rückspeisepumpe (Umwälzpumpe)	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Hockdruck	Rückspeisung Heißwasser aus Niederdruckabscheideflasche

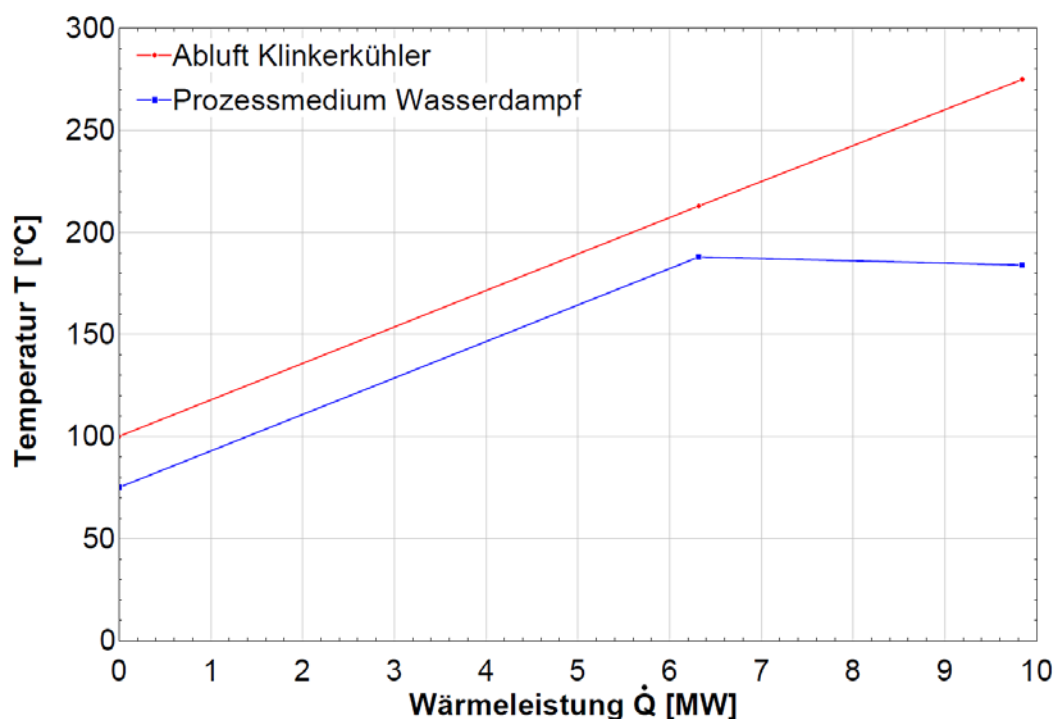


Abbildung 8-16: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Darstellung im Q-T Diagramm

		Wirkungsgrad, bez. auf Q 25 °C													
		Druck Niederdruckstrang [bar]													
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Druck Hochdruckstrang [bar]	3	9,16	9,13	9,10	9,05	8,99	8,94	8,87	8,81	8,75	8,68	8,62	8,56	8,49	8,43
	4	9,50	9,49	9,46	9,42	9,37	9,32	9,26	9,21	9,15	9,09	9,02	8,96	8,90	8,84
	5	9,71	9,71	9,69	9,65	9,61	9,56	9,51	9,45	9,40	9,34	9,28	9,22	9,16	9,11
	6	9,84	9,85	9,83	9,81	9,77	9,72	9,67	9,62	9,57	9,51	9,46	9,40	9,34	9,29
	7	9,93	9,94	9,93	9,91	9,87	9,83	9,78	9,74	9,69	9,63	9,58	9,52	9,47	9,41
	8	9,98	10,00	9,99	9,97	9,94	9,90	9,86	9,82	9,77	9,72	9,66	9,61	9,56	9,51
	9	10,00	10,03	10,03	10,01	9,99	9,95	9,91	9,87	9,82	9,78	9,73	9,67	9,62	9,57
	10	10,01	10,05	10,05	10,04	10,02	9,98	9,95	9,91	9,86	9,82	9,77	9,72	9,67	9,62
	11	10,01	10,05	10,06	10,05	10,03	10,00	9,97	9,93	9,89	9,84	9,79	9,75	9,70	9,65
	12	10,00	10,04	10,06	10,05	10,03	10,01	9,98	9,94	9,90	9,86	9,81	9,76	9,72	9,67
	13	9,98	10,03	10,05	10,05	10,03	10,01	9,98	9,94	9,90	9,86	9,82	9,77	9,73	9,68
	14	9,96	10,01	10,03	10,03	10,02	10,00	9,97	9,94	9,90	9,86	9,82	9,77	9,73	9,68
	15	9,93	9,98	10,01	10,01	10,00	9,98	9,96	9,93	9,89	9,85	9,81	9,77	9,73	9,68
	16	9,89	9,95	9,98	9,99	9,98	9,97	9,94	9,91	9,88	9,84	9,80	9,76	9,72	9,67
	17	9,86	9,92	9,95	9,96	9,96	9,94	9,92	9,89	9,86	9,82	9,79	9,75	9,71	9,66
	18	9,82	9,89	9,92	9,93	9,93	9,92	9,90	9,87	9,84	9,81	9,77	9,73	9,69	9,65
	19	9,78	9,85	9,89	9,90	9,90	9,89	9,87	9,85	9,82	9,78	9,75	9,71	9,67	9,63
	20	9,73	9,81	9,85	9,87	9,87	9,86	9,84	9,82	9,79	9,76	9,72	9,69	9,65	9,61
	21	9,69	9,77	9,81	9,83	9,83	9,83	9,81	9,79	9,76	9,73	9,70	9,66	9,63	9,59
	22	9,64	9,72	9,77	9,79	9,80	9,79	9,78	9,76	9,73	9,70	9,67	9,64	9,60	9,56
	23	9,59	9,68	9,73	9,75	9,76	9,76	9,74	9,73	9,70	9,67	9,64	9,61	9,57	9,53
	24	9,55	9,63	9,69	9,71	9,72	9,72	9,71	9,69	9,67	9,64	9,61	9,58	9,54	9,51
	25	9,50	9,59	9,64	9,67	9,68	9,68	9,67	9,66	9,63	9,61	9,58	9,55	9,51	9,48
	26	9,45	9,54	9,60	9,63	9,64	9,64	9,63	9,62	9,60	9,57	9,55	9,51	9,48	9,45
	27	9,40	9,49	9,55	9,59	9,60	9,60	9,60	9,58	9,56	9,54	9,51	9,48	9,45	9,42
	28	9,34	9,45	9,51	9,54	9,56	9,56	9,56	9,54	9,53	9,50	9,48	9,45	9,42	9,38
	29	9,29	9,40	9,46	9,50	9,52	9,52	9,52	9,51	9,49	9,47	9,44	9,41	9,38	9,35
	30	9,24	9,35	9,41	9,45	9,47	9,48	9,48	9,47	9,45	9,43	9,40	9,38	9,35	9,32

Abbildung 8-17: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Druckoptimierung Hochdruck- und Niederdruckstrang

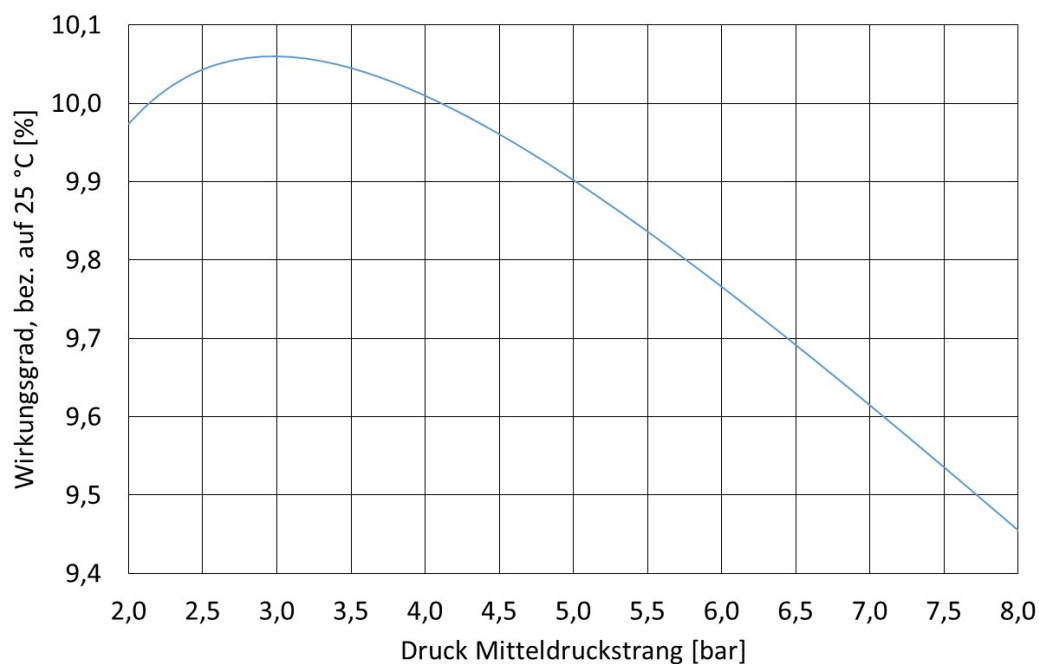


Abbildung 8-18: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Druckoptimierung Mitteldruckstrang für optimierten Hochdruckstrang (11,0 bar) und Niederdruckstrang (0,7 bar)

Tabelle 8-6: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall

Temperatur Abwärmestrom	275	°C
Abwärmeleistung, bezogen auf 25°C	14.000	kW
Ausgekoppelte Kesselleistung	9.841	kW
Temperatur Kühlluft Kondensator	11,0	°C
Arbeitsmedium	Wasserdampf	
Druck Hochdruckstrang	11,0	bar
Druck Mitteldruckstrang	3,0	bar
Druck Niederdruckstrang	0,7	bar
Kondensationsdruck	0,07	bar
Brutto- Leistung Generator	1.564	kW
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	1.408	kW
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	14,3	%
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Abwärmeleistung 25°C	10,1	%

Im weiteren Schritt wurde für diese Auslegungsbedingungen eine Parametervariation der Kühllufttemperatur durchgeführt. Aus dem Ergebnis ist die Temperaturabhängigkeit der produzierten elektrischen Leistung erkennbar, was ein weiteres Effizienzkriterium für den Kreisprozess darstellt. Das Ergebnis der Parametervariation ist in Abbildung 8-19 ersichtlich.

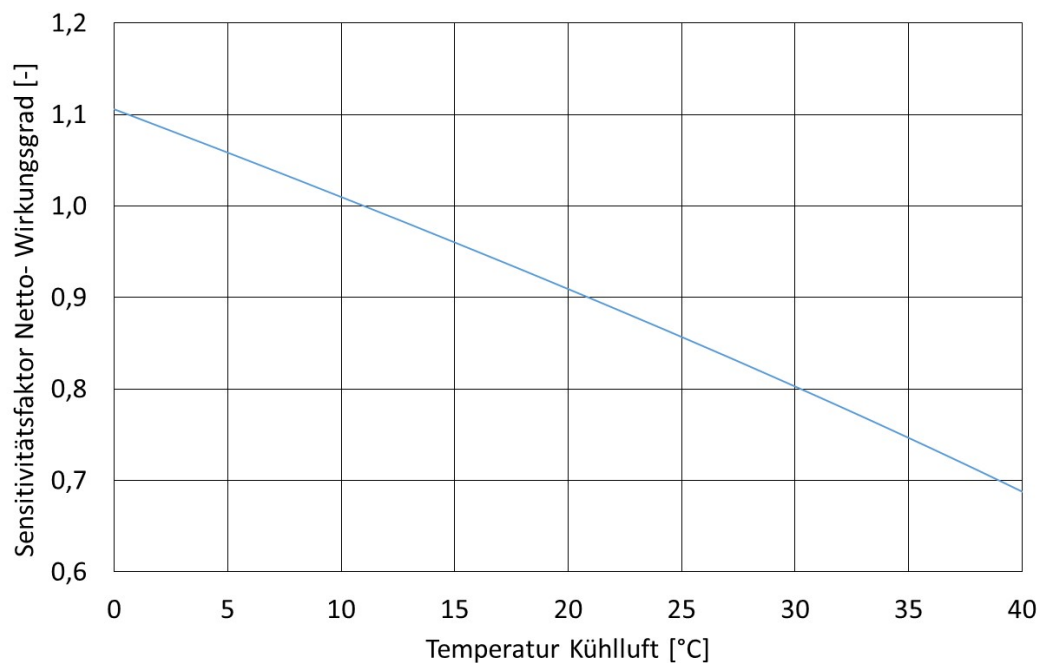


Abbildung 8-19: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 8-6

9 Vergleichsprozess Eindruck- Wasserdampfprozess

9.1 Prozessbeschreibung

Die einfachste Möglichkeit zur Stromproduktion aus Abwärme kann in Form eines herkömmlichen Clausius-Rankine Kreisprozesses erfolgen. Auf Grund des begrenzten Temperaturniveaus der Abwärmequelle wird als Vergleichsprozess ein Sattedampfprozess herangezogen, wie er auch in Strauß (2009) beschrieben wird. Eine Überhitzung des Sattedampfes ist bei Abwärmequellen auf Grund der Pinch-Point Problematik nur im begrenzten Ausmaß möglich und bringt thermodynamisch keine wesentlichen Vorteile für den Prozesswirkungsgrad, wie bereits im Kapitel 8.2.2 ausgeführt.

Das Verfahrensfliessbild (siehe Abbildung 9-1) zeigt den Abhitzekeessel zur Vorwärmung und zur Verdampfung, mit einer Dampftrommel und einem Umlaufsystem. Der darin produzierte Sattedampf wird in der Turbine verstromt. Nach der Turbine gelangt der Nassdampf in den Kondensator, wo das Prozessmedium mit Umgebungsluft kondensiert wird. Das Kondensat gelangt in den Speisewasserbehälter und wird aus diesem mit der Speisewasserpumpe auf ein Druckniveau gehoben, dass in Folge (unter idealisierter, druckverlustfreier Betrachtung) dem Eintrittsdruck der Turbine entspricht.

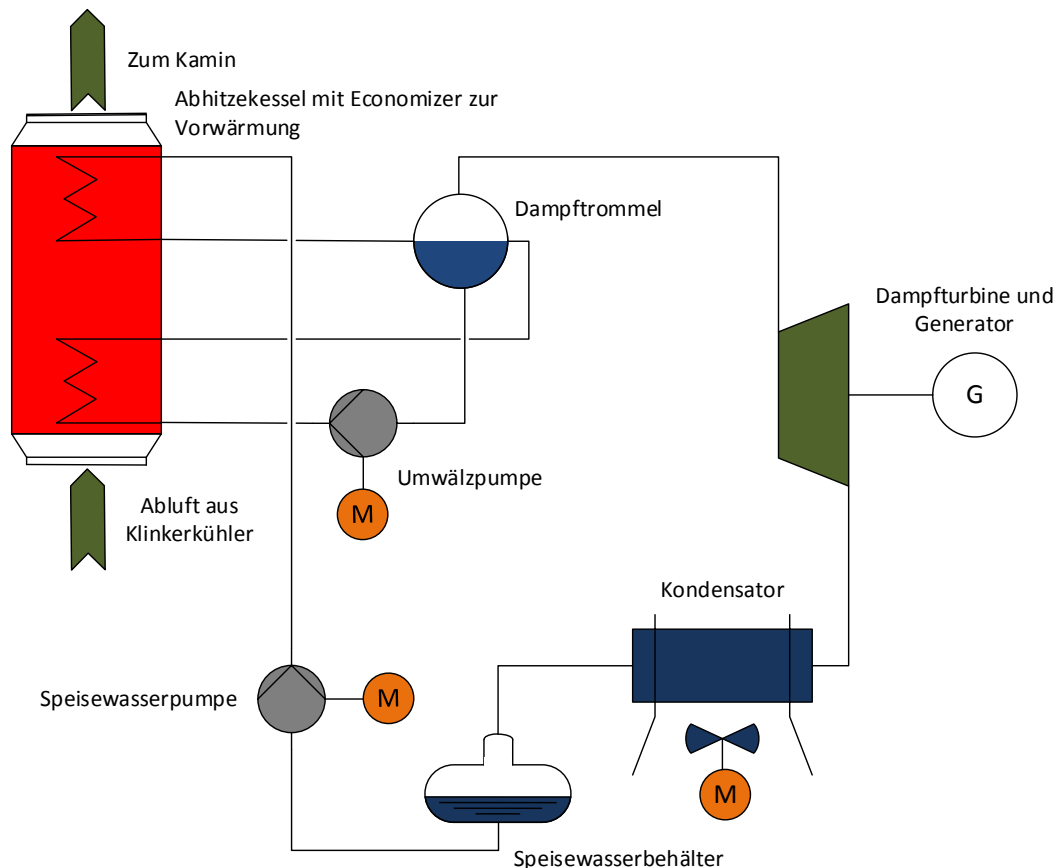


Abbildung 9-1: Eindruck- Wasserdampfprozess zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung

9.2 Prozessspezifische Komponentenbeschreibung

9.2.1 Dampfturbine

Der isentrope Wirkungsgrad der Dampfturbine für die Prozesssimulation wurde analog zur Vorgangsweise wie im Kapitel 8.3.2 beschrieben, festgelegt. Der isentrope Wirkungsgrad der Turbine wurde auf Basis des isentropen Gefälles an der Turbine gemäß Abbildung 8-11 definiert, der mechanische Wirkungsgrad der Turbine wurde mit 98 % angenommen.

9.2.2 Dampftrommel

Die Dampftrommel nimmt das vorgewärmte Speisewasser auf, hält Siedewasser für das Umlaufsystem (Umwälzpumpe und Verdampfer) vor und scheidet vom aus dem Verdampfer kommenden Dampf/Wassergemisch den Sattedampf zur weiteren Verwendung ab. Die Dampftrommel ist ein (meist liegendes) Druckgefäß mit einem Dampf- und einem Wasserraum, ggf. mit Abscheider-Elementen. Thermodynamisch relevant ist der Zustand, mit dem das Speisewasser die Dampftrommel betritt: unterkühlt oder gesättigt oder auch vorverdampft. Im konventionellen Kesselbau ist eher eine gewisse Unterkühlung („approach temperature“, „Trommelunterkühlung“ > 0 K) üblich, jedoch ergibt die Unterkühlung für Niedertemperatur-Abhitzesysteme thermodynamische Nachteile, weswegen dieser Parameter auf 0 K gesetzt wurde. Ob nun das Speisewasser gesättigt ist oder eine geringe Vorverdampfung aufweist, ist unerheblich. Ein weiter zu wählender Parameter ist die Rezirkulationsrate des Umlaufsystems, welche den Wert 1 weit übersteigen soll und praxisgerecht mit 5 gewählt wurde. Die Rezirkulationsrate stellt zwar ein Parameter der Auslegung eines „Umlauf“-Dampferzeugers dar, beeinflusst aber die Thermodynamik nur am Rande.

9.3 Basisauslegung und Parametervariation

In der Prozesssimulation wird aus simulationstechnischen Gründen und zur Erleichterung der Prozessdarstellung der Verdampferteil im Abhitzekessel in zwei unterschiedliche Durchlauf-Heizflächen (Vorwärmer und Verdampfer) unterteilt (siehe Abbildung 9-2). In der Simulation wurden Druckverluste in Rohrleitungen nicht berücksichtigt, lediglich Druckverluste der Komponenten wurden in Rechnung gezogen. Die Auslegungsbedingungen des Prozesses und herangezogenen Randbedingungen der Wärmetauscher- Auslegung entsprechen denselben Annahmen wie bei den restlichen durchgeführten Simulationen und sind in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 ersichtlich.

Im ersten Schritt der Prozesssimulation wird eine Druckoptimierung des Eintrittsdrucks in die Turbine durchgeführt (siehe Abbildung 9-3). Die Darstellung des Kreisprozesses in der druckoptimierten Basisauslegung ist im T-s Diagramm (Abbildung 9-4) und im Q-T Diagramm (Abbildung 9-5) ersichtlich. Die Erläuterungen zur Abbildung 9-2 und Abbildung 9-4 sind in der Tabelle 9-1 ersichtlich. In dieser Auflistung erfolgt die Beschreibung der Prozessschritte als idealisierte Zustandsänderungen. In der Simulation werden die Komponenten druckbehaftet berücksichtigt.

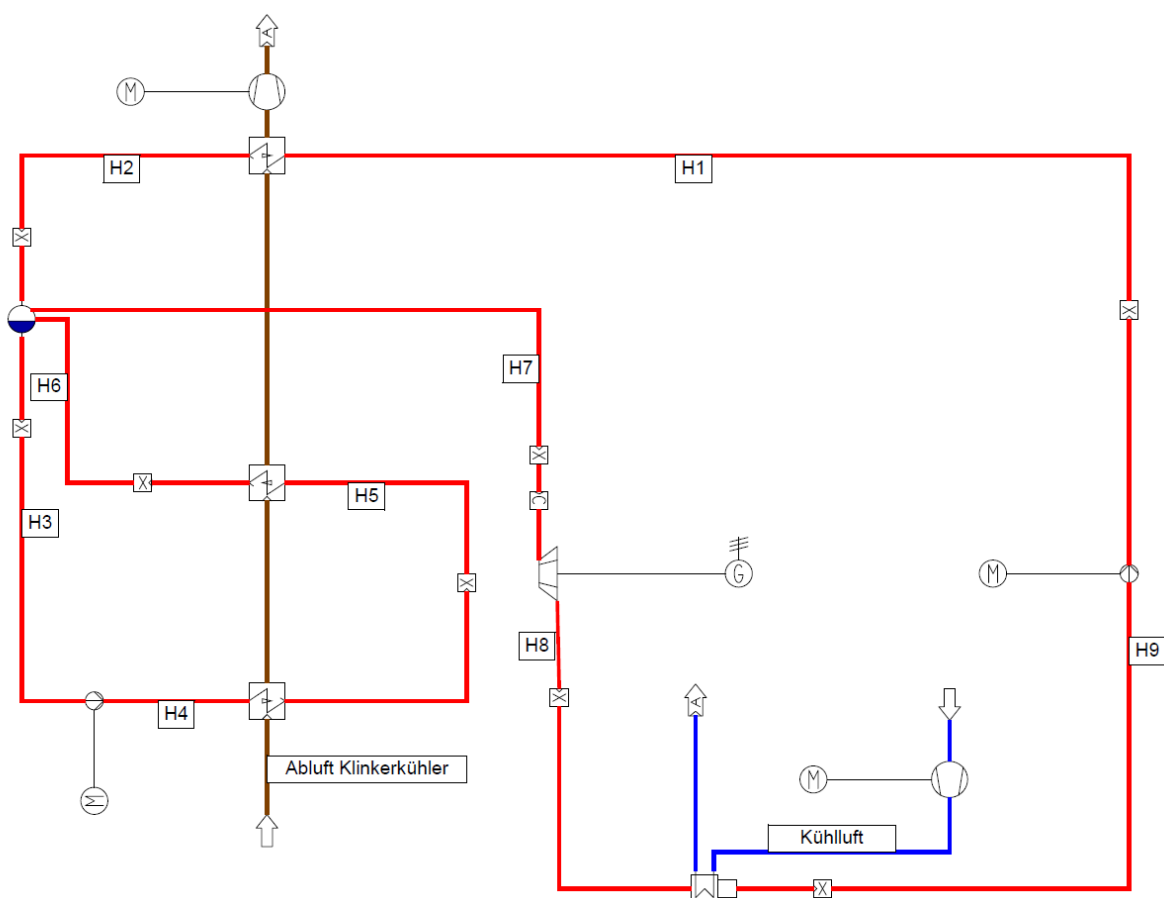


Abbildung 9-2: Eindruck- Wasserdampfprozess (aus Abbildung 9-1), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte

Tabelle 9-1: Eindruck- Wasserdampfprozess, Beschreibung der Zustandsänderung

Zustandspunkte	Komponente	Zustandsänderung	Anmerkungen
H1 – H2	Economiser	Isobar	
H2 – H3 – H6 – H7	Dampftrommel	Isobar	
H3 – H4	Umwälzpumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad	
H4 – H5	Abhitzekeessel/ Vorwärmer	Isobar	Abhitzekeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H5 – H6	Abhitzekeessel/ Verdampfer	Isobar, Isotherm	Abhitzekeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H7 – H8	Gleichdruckdampfturbine	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	
H8 – H9	Kondensator	Isobar, Isotherm	
H9 – H1	Speisewasserpumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad	

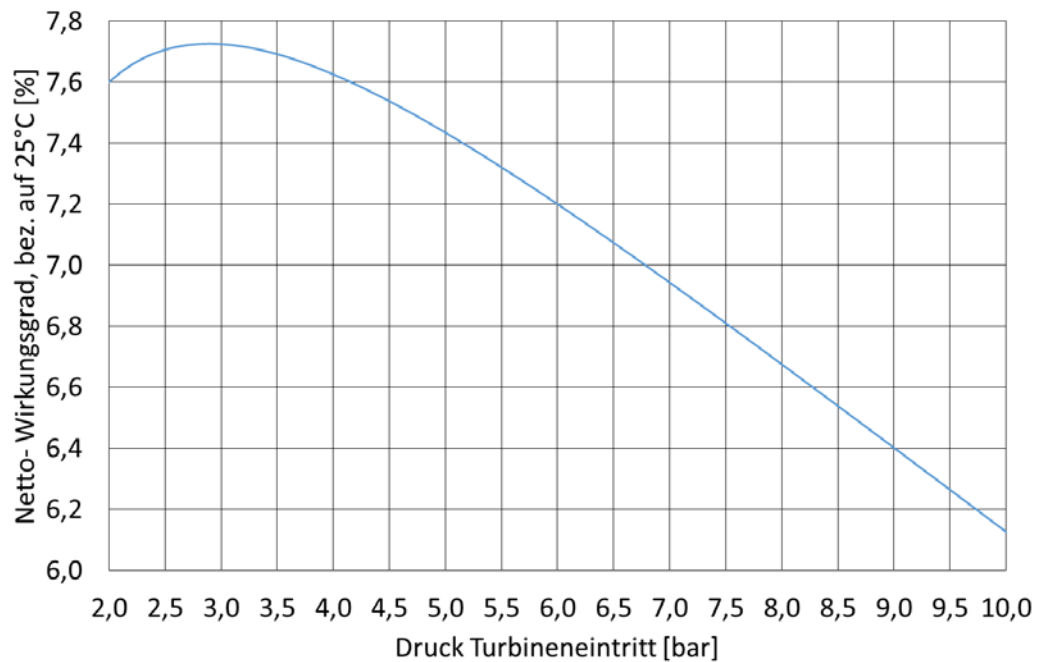


Abbildung 9-3: Eindruck- Wasserdampfprozess, Druckoptimierung

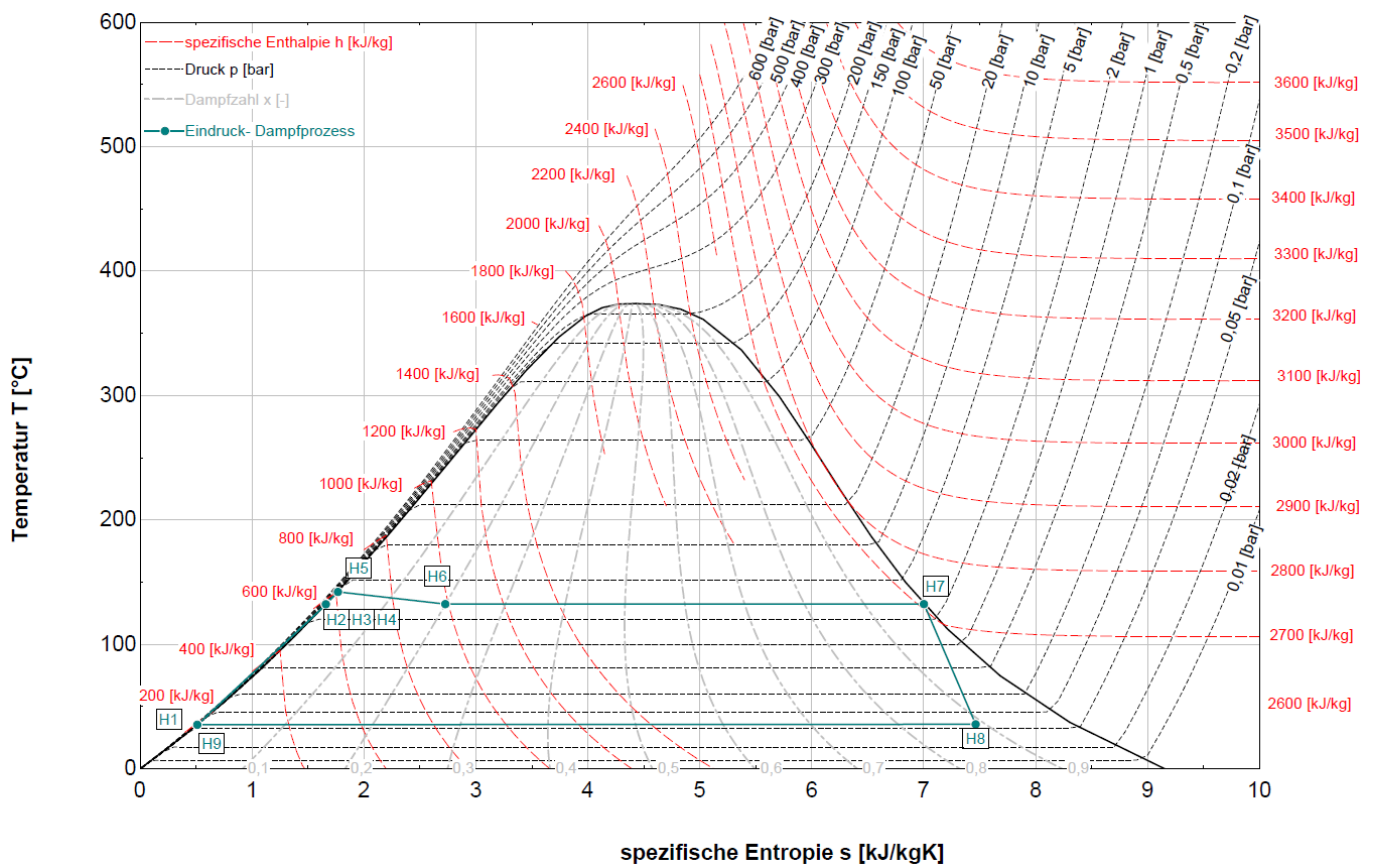


Abbildung 9-4: Eindruck- Wasserdampfprozess, Darstellung im T-s Diagramm

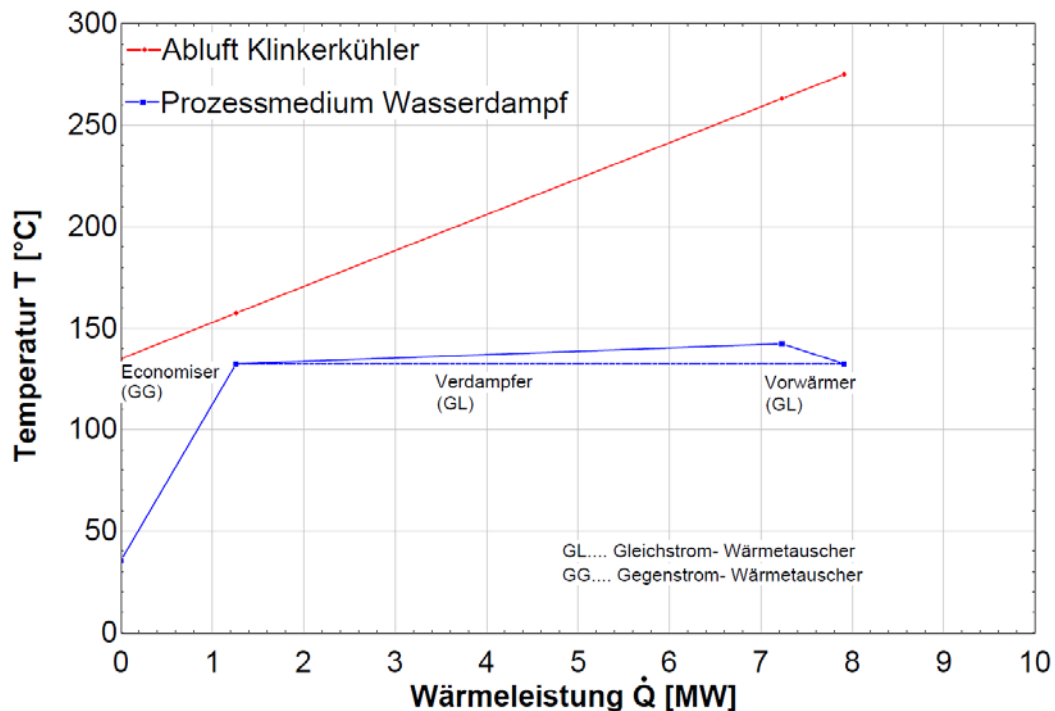


Abbildung 9-5: Eindruck- Wasserdampfprozess, Darstellung im Q-T Diagramm

Die Tabelle 9-2 zeigt die Ergebnisse der Prozesssimulation für den druckoptimierten Auslegungsfall. Das aussagekräftigste Ergebnis, welches auch für den Vergleich mit den restlichen simulierten Prozessen herangezogen wird, ist der Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf eine Abwärmeleistung mit Referenztemperatur 25°C. Für diese Basisauslegung wird in Folge eine Parametervariation der Kühllufttemperatur durchgeführt.

Tabelle 9-2: Eindruck- Wasserdampfprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall

Temperatur Abwärmestrom	275	°C
Abwärmeleistung, bezogen auf 25°C	14.000	kW
Ausgekoppelte Kesselleistung	7.910	kW
Temperatur Kühlluft Kondensator	11,0	°C
Arbeitsmedium	Wasserdampf	
Druck vor Turbine	2,9	bar
Kondensationsdruck	0,06	bar
Brutto- Leistung Generator	1.220	kW
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	1.082	kW
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	13,7	%
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Abwärmeleistung 25°C	7,7	%

Im weiteren Schritt wurde für diese Auslegungsbedingung eine Parametervariation der Kühllufttemperatur durchgeführt. Aus dem Ergebnis ist die Temperaturabhängigkeit der produzierten elektrischen Leistung erkennbar, was ein weiteres Effizienzkriterium für den Kreisprozess darstellt. Das Ergebnis der Parametervariation ist in Abbildung 9-6 ersichtlich.

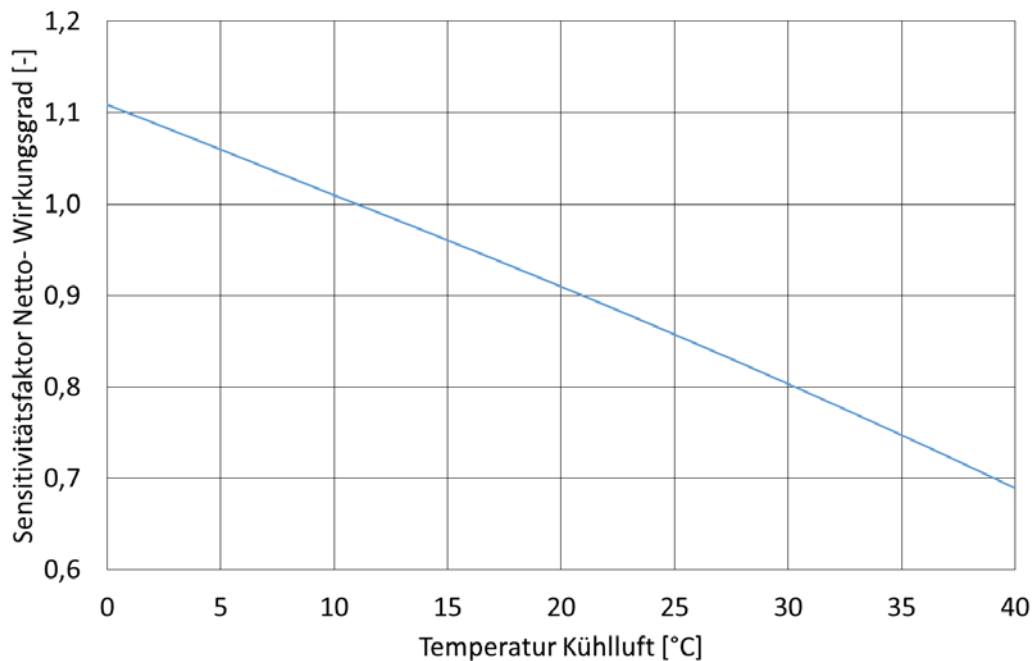


Abbildung 9-6: Eindruck- Wasserdampfprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 9-2

10 Vergleichsprozess ORC- Prozess

Im Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT, BAT) in der Zement-, Kalk- und Magnesium-oxidindustrie (Umweltbundesamt, 2010) werden Technologien nach Stand der Technik definiert, die gemäß der Industrieemissionsrichtlinie (Europäische Kommission, 2010) in der Europäischen Union im Zuge von Genehmigungsverfahren als Maßstab dienen. Im Kapitel Energierückgewinnung an Öfen und Kühlern/Kraft-Wärme-Kopplung werden dabei die folgenden Technologien für die Abwärmeverstromung als Referenz angeführt (Umweltbundesamt, 2010):

- **Konventioneller Dampfkreislaufprozess im Zementwerk Slite (Schweden)**

Rückgewinnbare Wärme wird an ein bestehendes Elektrizitätswerk geliefert, in dem durch Weiternutzung der Wärme in einem konventionellen Dampfkreislaufprozess elektrischer Strom erzeugt wird. Die elektrische Leistung beträgt 6 MW_{el}, wobei die bestehende Dampfturbine des Elektrizitätswerks weiter verwendet werden konnte und dieses Beispiels einer besten verfügbaren Technik somit einen Sonderfall darstellt. Die jährliche Stromproduktion beträgt rund 50 GWh, was rund 25 % des Gesamtstrombedarfs der Anlage entspricht.

- **ORC- Verfahren im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG (Deutschland)**

Umsetzung von Niedertemperaturwärme aus dem Klinkerkühler zur Stromerzeugung. Der ORC-Kreisprozess wird mit dem Betriebsmittel n-Pentan betrieben. Die elektrische Leistung der Turbine beträgt 1,1 MW_{el}.

Als Vergleichsprozess für den Innovativen Dampfprozess wird der ORC- Prozess, wie oben angeführt, herangezogen, der in Folge noch detailliert erläutert wird. Dieser Kreisprozess ist der erste Prozess, der in einem Zementwerk in Europa im Jahr 1999 in Betrieb genommen wurde. Die thermodynamische Auslegung, sowie erste Erfahrungswerte dieses Prozesses sind im Bericht „Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG“ (Heidelberger Zement AG, 2001) zusammengefasst.

10.1 Prozessbeschreibung

Die erforderliche Brennstoffenergie für das Zementwerk beträgt 740.383 MWh_{th}/a bis zur Produktionsstufe Zementklinker, sowie 461.780 MWh_{th}/a bis zur Produktionsstufe Zement. Die elektrische Energiemenge beträgt dabei 46.262 MWh_{el}/a bis zur Produktionsstufe Zementklinker, sowie 70.928 MWh_{el}/a bis zur Produktionsstufe Zement. Anzumerken ist, dass ein Teil des Klinkers nicht im Werk zu Zement verarbeitet, sondern als Rohmaterial an andere Zementwerke verkauft wird. Das Zementwerk verfügt über eine Produktionskapazität von 3.150 t/d Zementklinker. Daraus ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf von 0,944 MWh/t_{Klinker}. Durch die Umsetzung der Wärmerückgewinnungsanlage (siehe Abbildung 10-1) soll der Eigenstrombedarf um 12 % gesenkt werden, was eine CO₂- Einsparung von 7.000 t/a zur Folge hat. (Heidelberger Zement AG, 2001)

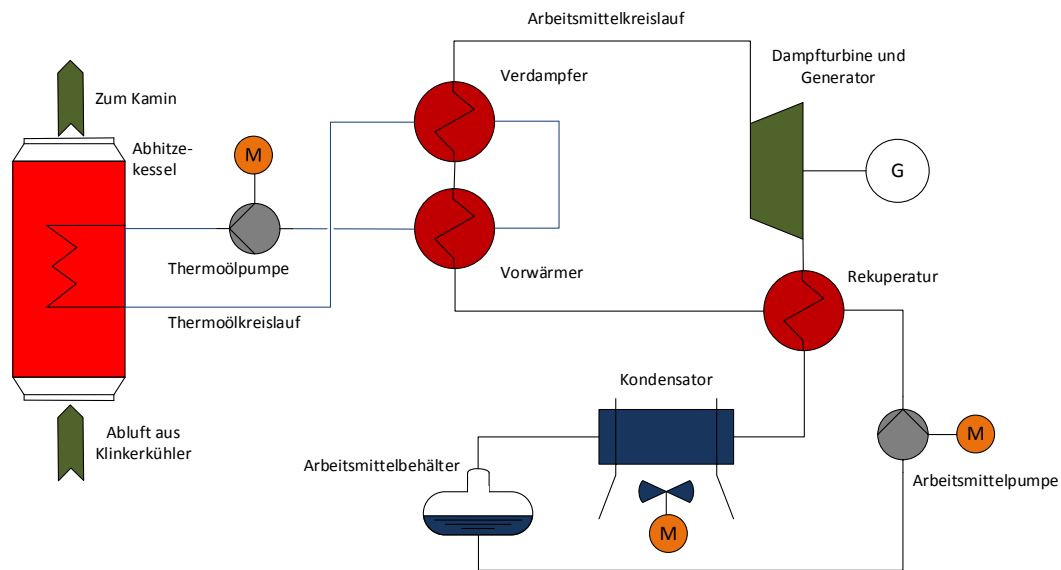


Abbildung 10-1: ORC- Kreisprozess zur Nutzung von Klinkerabluft im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG

Als Abwärmequelle wird die Mittenluft des Klinkerkühlers mit einer Temperatur von 275 °C und einem Volumenstrom von 150.000 m_N³/h herangezogen. Diese wird im Abluftwärmetauscher auf eine Austrittstemperatur von 125 °C abgekühlt. Daraus ergibt sich für den Auslegungsfall eine thermische Leistung von 14 MW_{th}. Die Betriebserfahrung zeigt, dass die Temperatur der Kühlerabluft zwischen 220 °C und 350 °C schwankt, was eine Wärmeleistung zwischen 13 – 17 MW_{th} zur Folge hat. Erwähnenswert ist der Staubgehalt der Kühlerabluft, der mit <50 mg/m_N³ angegeben wird. (Heidelberger Zement AG, 2001)

Der Thermoölkreislauf wird mit dem Wärmeträgeröl Mobiltherm 594 betrieben. Das Thermoöl- wird im Abluftwärmetauscher im Auslegungsfall von Eintrittstemperatur 85 °C auf Austrittstemperatur 230 °C erwärmt. Der Massenstrom des Thermoöls liegt bei 84,6 t/h bei einem Gesamtinhalt von 25 m³. (Heidelberger Zement AG, 2001)

Das Kreislaufmedium des ORC- Kreislaufes n-Pentan, hat einen Massenstrom von 60 t/h bei einem Gesamtinhalt von 6 m³ und zulässigen Betriebsdrücken von 16 bar für Rohre und 32 bar für Behälter. Im Pentan- Vorerhitzer beträgt die Temperatur des Thermoöls 152 °C (Eintritt) und 85 °C (Austritt), die Temperatur des Kreislaufmediums n-Pentan 57 °C (Eintritt) und 137 °C (Austritt). Im Pentan Verdampfer beträgt die Temperatur des Thermoöls 230 °C (Eintritt) und 152 °C (Austritt), die Temperatur des Kreislaufmediums n-Pentan 137 °C (Eintritt) und 162 °C (Austritt). (Heidelberger Zement AG, 2001)

Die Turbine ist in 2- stufiger Ausführung mit einem elektrischen Prozesswirkungsgrad von 14 %, einer Nennleistung von 1,5 MW sowie einer Leistung gemäß Auslegung von 1,32 MW (Generator-Wirkungsgrad 96 %). Der Eintrittsdruck beträgt 19,4 bar (bei Eintrittstemperatur 162 °C), der Austrittsdruck 1,03 bar (bei Austrittstemperatur 93 °C). (Heidelberger Zement AG, 2001)

Der Kondensator nutzt Umgebungsluft als Kühlmedium und wird bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 11 °C mit einer Kühlluftmenge von max. 1.696.500 kg/h (also rund 470 kg/s) betrieben. Die Ventilatoren haben eine Antriebsleistung von insgesamt 72 kW. (Heidelberger Zement AG, 2001)

10.2 Prozessspezifische Komponentenbeschreibung

10.2.1 Dampfturbine

Als Referenzanlage dient die ORC Anlage, welche im Zementwerk Heidelberg umgesetzt wurde. Im Forschungsbericht sind für die mit n-Pentan betriebene Turbine die folgenden Prozessparameter definiert (Heidelberger Zement AG, 2001):

- Arbeitsmedium: N-Pentan
- Eintrittsdruck/-temperatur Arbeitsmedium: 162 °C/19,4 bar
- Austrittsdruck/-temperatur Arbeitsmedium: 93 °C/1,03 bar

Die elektrische Leistung der Turbine beträgt 1,5 MW_{el.,Brutto}. Der Kreislauf liefert abzüglich der elektrischen Verbraucher 1,13 MW_{el.,Netto}. Der elektrische Prozesswirkungsgrad der Turbine (bezogen auf die abgeführte Kesselleistung) wird mit 14 % angegeben.

Aus den angegebenen Prozessparametern kann der isentrope Wirkungsgrad η_{is} der Turbine lt. 10-1 bis 10-7 bestimmt werden. Die Berechnung wurde mit dem kommerziellen Softwarepaket EES (F-Chart Software, 2014) durchgeführt:

$$h_1 = h(n - \text{Pentane}; T = 162; p = 19,4) = 573,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad 10-1$$

$$s_1 = s(n - \text{Pentane}; T = 162; p = 19,4) = 1,469 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \quad 10-2$$

$$h_2 = h(n - \text{Pentane}; T = 93; p = 1,03) = 488,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad 10-3$$

$$h_{2s} = h(n - \text{Pentane}; s = 1,469; p = 1,03) = 459,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad 10-4$$

$$h_{12} = h_1 - h_2 = 85,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad 10-5$$

$$h_{12s} = h_1 - h_{2s} = 114,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad 10-6$$

$$\eta_{is} = \frac{h_{12}}{h_{12s}} = \frac{85,02}{114,1} = 74,5\% \quad 10-7$$

$h_{1...}$	spezifische Enthalpie beim Eintritt in die Turbine in kJ/kg
$s_{1...}$	spezifische Entropie beim Eintritt in die Turbine in kJ/kgK
$h_{2...}$	spezifische Enthalpie beim Austritt aus der Turbine in kJ/kg
$s_{2...}$	spezifische Entropie beim Austritt aus der Turbine in kJ/kgK
$h_{2s...}$	spezifische Enthalpie beim Austritt aus der Turbine bei isentroper Expansion in kJ/kg
$h_{12...}$	Enthalpiegefälle in der Turbine in kJ/kg
$h_{12s...}$	Enthalpiegefälle in der Turbine bei isentroper Expansion in kJ/kg
$\eta_{is...}$	isentropen Wirkungsgrad der Turbine in %

In der Simulation von ORC Prozessen werden in Anlehnung an die Berechnung Datenblatt ein isentrope Wirkungsgrad von 74,5 % und ein mechanischer Wirkungsgrad der Turbine von 98 % festgelegt.

10.2.2 Pumpe

- **Thermoölpumpe:**

Die Thermoölpumpe fördert das Wärmeträgermedium im Zwischenkreislauf des ORC- Prozesses und transportiert somit die Energie vom Abhitzeessel zum ORC- Kreislauf (siehe Abbildung 10-1). Die Thermoölpumpe hat dabei den Druckverlust der Rohrleitungen, der einzelnen Wärmetauscher des Abhitzeessels sowie des Wärmetauschers im ORC- Kreislauf zu überwinden. Bei der Dimensionierung ist zu beachten, dass im Anfahrbetrieb auf Grund der unterschiedlichen Dichte und Viskosität des Thermoöls bei niedriger Temperatur eine höhere Pumpenleistung als im Normalbetrieb erforderlich ist.

- **Pumpe ORC- Kreislauf:**

Die Pumpe im ORC- Kreislauf fördert das Arbeitsmedium nach erfolgter Kondensation in Richtung Economiser, Verdampfer bzw. Überhitzer (siehe Abbildung 10-1). Die Pumpe hat dabei den Druckverlust der Rohrleitung sowie der einzelnen Wärmetauscher zu überwinden und leistet eine Druckerhöhung auf den Turbinen- Eintrittsdruck des ORC- Kreislaufs.

10.3 Basisauslegung und Parametervariation

In der Prozesssimulation wird der unter Kapitel 10.1 beschriebene ORC Prozess abgebildet. In der Simulation und für die Prozessdarstellung ist es vorteilhaft die Komponenten Verdampfer und Kondensator jeweils in zwei separate Wärmetauscher zu splitten. Die Randbedingungen für die Prozesssimulation werden in Anlehnung an Heidelberger Zement AG (2001) festgelegt. Für den Prozess wird in der Prozesssimulation keine Optimierungsrechnung durchgeführt, da davon ausgegangen werden kann, dass der real ausgeführte Prozess bereits optimiert wurde. Die der Prozesssimulation zugrundeliegenden Parameter sind in Kapitel 7 sowie in diesem Kapitel erläutert. Diese durchgeführte Simulation entspricht dem Auslegungsfall.

Das Prozessschema der Simulation aus Abbildung 10-2 sowie das Ergebnis des für den Auslegungsfall simulierten Prozesses (siehe Abbildung 10-3 sowie Abbildung 10-4) ist in Tabelle 10-1 erläutert. In der Prozesssimulation wird der Druckverlust von Rohrleitungen vernachlässigt und nur der komponentenspezifische Druckverlust berücksichtigt. Das Ergebnis der Prozesssimulation für den Basisfall ist in Tabelle 10-2 ersichtlich.

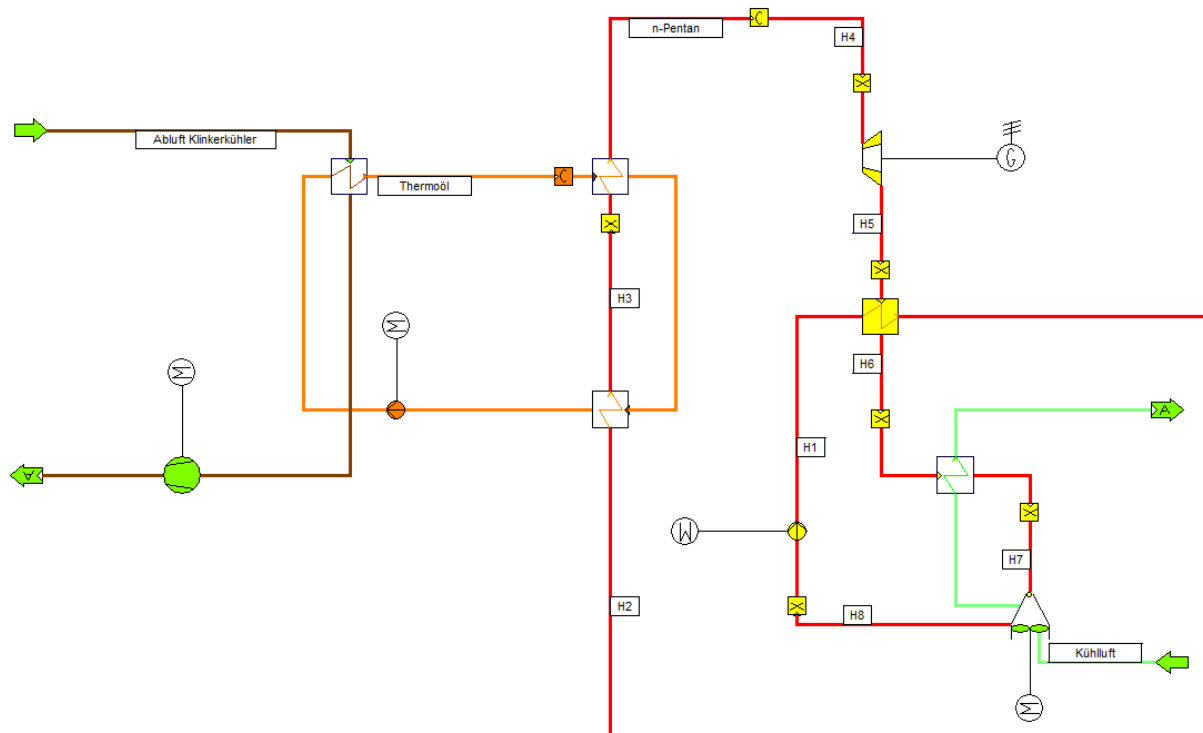


Abbildung 10-2: ORC- Kreisprozess (aus Abbildung 10-1), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte

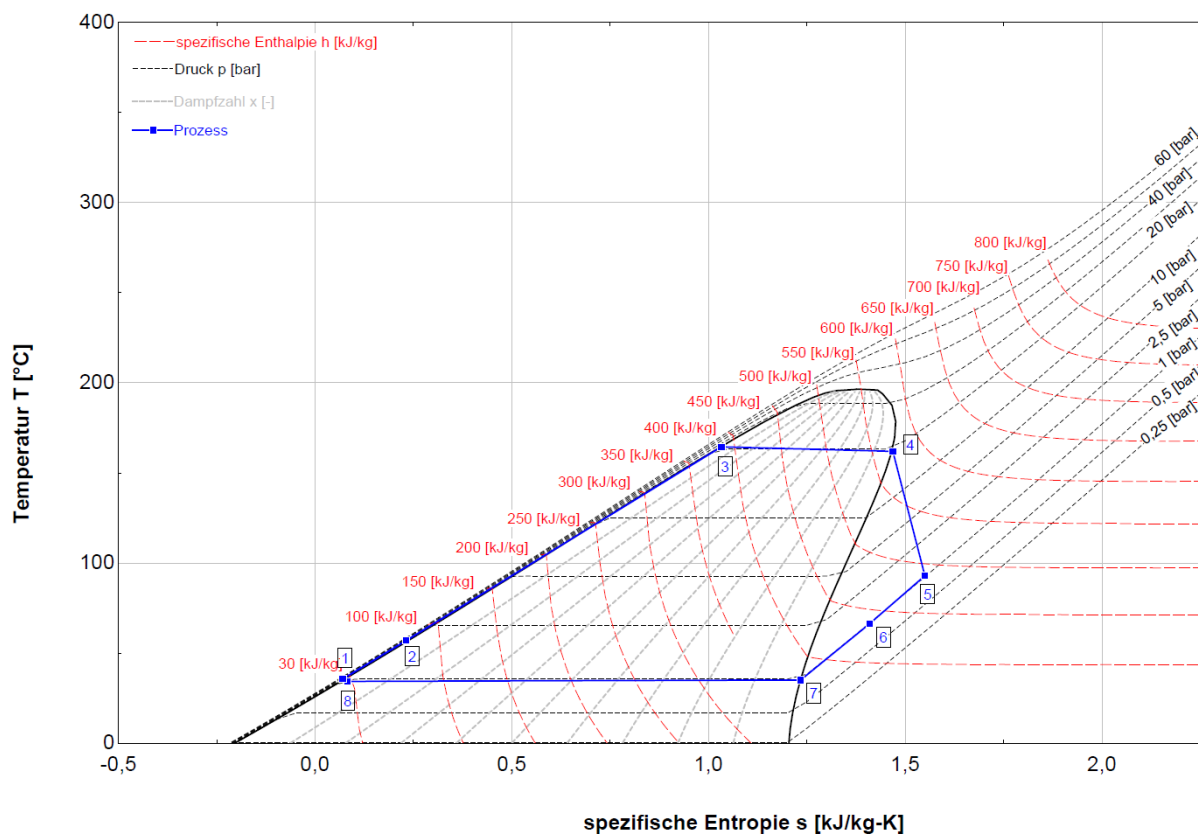


Abbildung 10-3: ORC- Kreisprozess, Darstellung im T-s Diagramm

Tabelle 10-1: ORC- Kreisprozess, Beschreibung der Zustandsänderungen

Zustandspunkte	Komponente	Zustandsänderung	Anmerkungen
H1 – H2	Rekuperator	Isobar	
H2 – H3	Abhitzeessel/ Vorwärmer	Isobar	Abhitzeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H3 – H4	Abhitzeessel/ Verdampfer	Isobar, Isotherm	Abhitzeessel wurde für Simulation in Vorwärmer und Verdampfer unterteilt
H4 – H5	Dampfturbine	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	
H5 – H6	Rekuperator	Isobar	
H6 – H7	Kondensator, Kühler	Isobar	Kondensator wurde für Simulation in Kühler und Kondensator geteilt
H7 – H8	Kondensator, Kondensator	Isobar, Isotherm	Kondensator wurde für Simulation in Kühler und Kondensator geteilt
H8 – H1	Speisepumpe	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad	

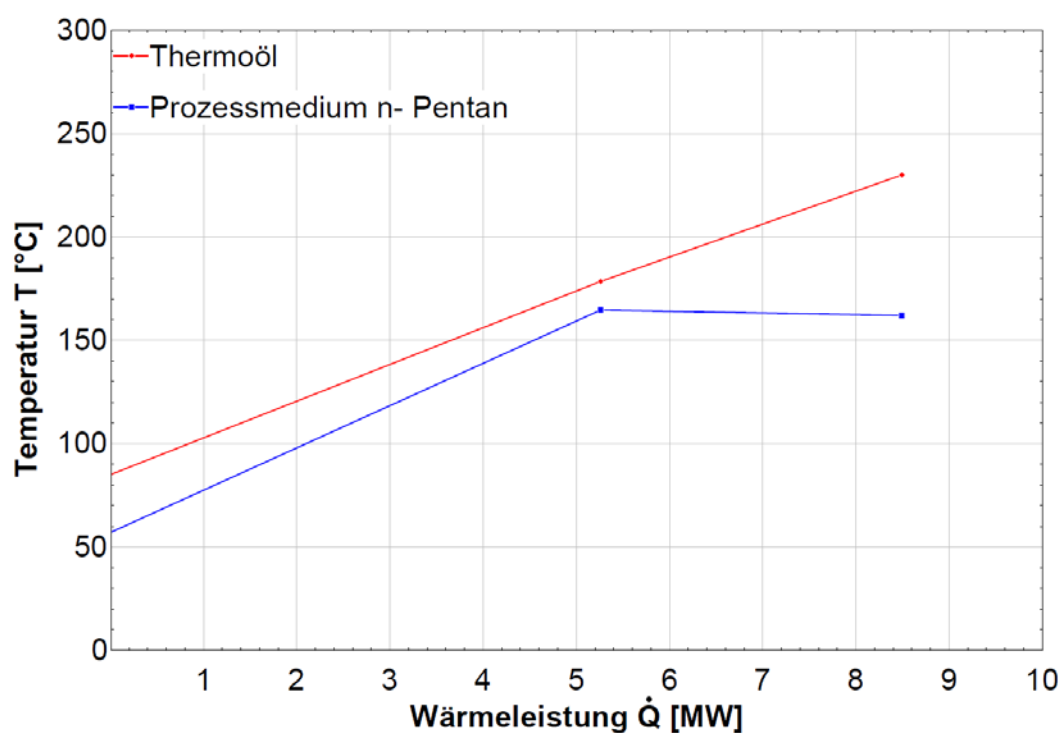
**Abbildung 10-4: ORC- Kreisprozess, Darstellung im Q-T Diagramm**

Tabelle 10-2: ORC- Kreisprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall

Temperatur Abwärmestrom	275	°C
Abwärmeleistung, bezogen auf 25°C	14.000	kW
Ausgekoppelte Kesselleistung	8.458	kW
Temperatur Kühlluft Kondensator	11,0	°C
Arbeitsmedium	n-Pentan	
Druck vor Turbine	19,4	bar
Kondensationsdruck	1,03	bar
Brutto- Leistung Generator	1.353	kW
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	1.094	kW
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	12,9	%
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Abwärmeleistung 25°C	7,8	%

Für den Auslegungsfall wurde eine Parametervariation der Kühlluft- Eintrittstemperatur des Kondensators durchgeführt (siehe Abbildung 10-5). Die komponentenspezifischen Parameter wurden dabei gemäß der Berechnung für den Auslegungsfall konstant gehalten.

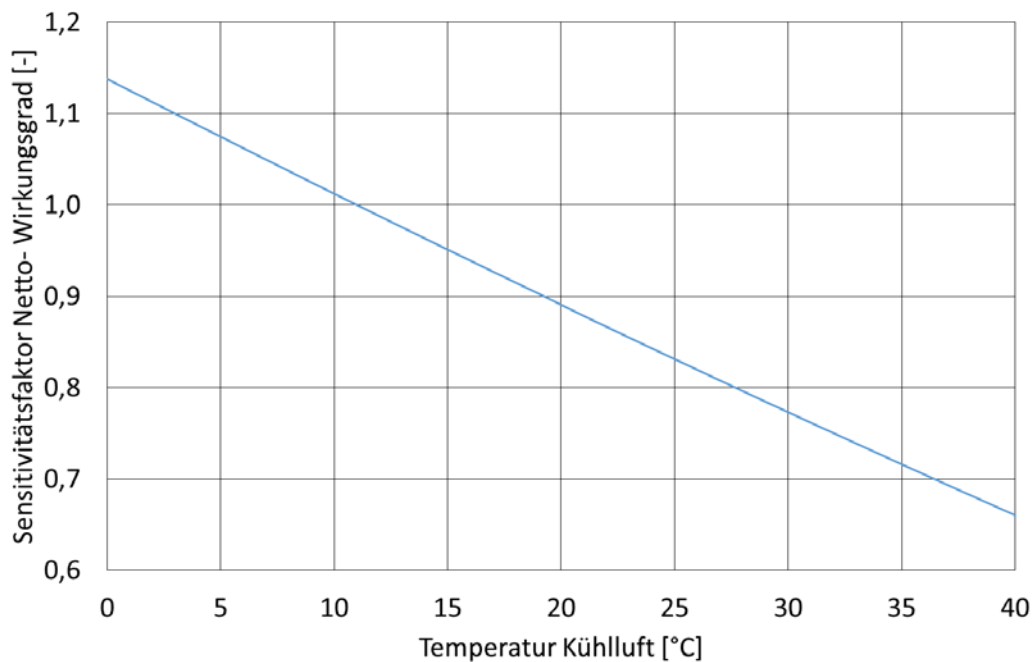


Abbildung 10-5: ORC- Kreisprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 10-2

11 Vergleichsprozess überkritischer CO₂- Prozess

11.1 Prozessbeschreibung

Der überkritische CO₂-Kreisprozess arbeitet druckseitig im überkritischen, gasförmigen Bereich. Der Kreisprozess beginnt hinter dem Kompressor mit einer Aufheizung im Rekuperator, einer Endaufheizung aus der Wärmequelle (Abgas/CO₂-Wärmetauscher), der Expansion in der Turbine, der Abkühlung des entspannten CO₂-Gases bzw. Dampfes (nun unterkritisch) im Rekuperator, der Enthitzung und der anschließenden Kondensation, bis zum Kompressor-Eintritt unter Abgabe der Überhitzungs- und Kondensationswärme an die Wärmesenke (siehe Abbildung 11-1). Die kritischen Daten von CO₂ liegen bei 73,8 bar und 31,1 °C, sodass die Zustände des entspannten Dampfes bei seiner Kondensation unterhalb diesen Daten liegen müssen und dass zudem die Wärmesenke ein genügend tiefes Temperaturniveau haben muss. Von der Thermodynamik betrachtet entspricht dieser Kreisprozess einer Kombination von einem geschlossenen Gasturbinenprozess (Brayton-Prozess), mit Rekuperation und einem Dampfprozess mit Kondensation (Rankine-Prozess) und er ist darin dem überkritischen ORC-Kreisprozess ähnlich.

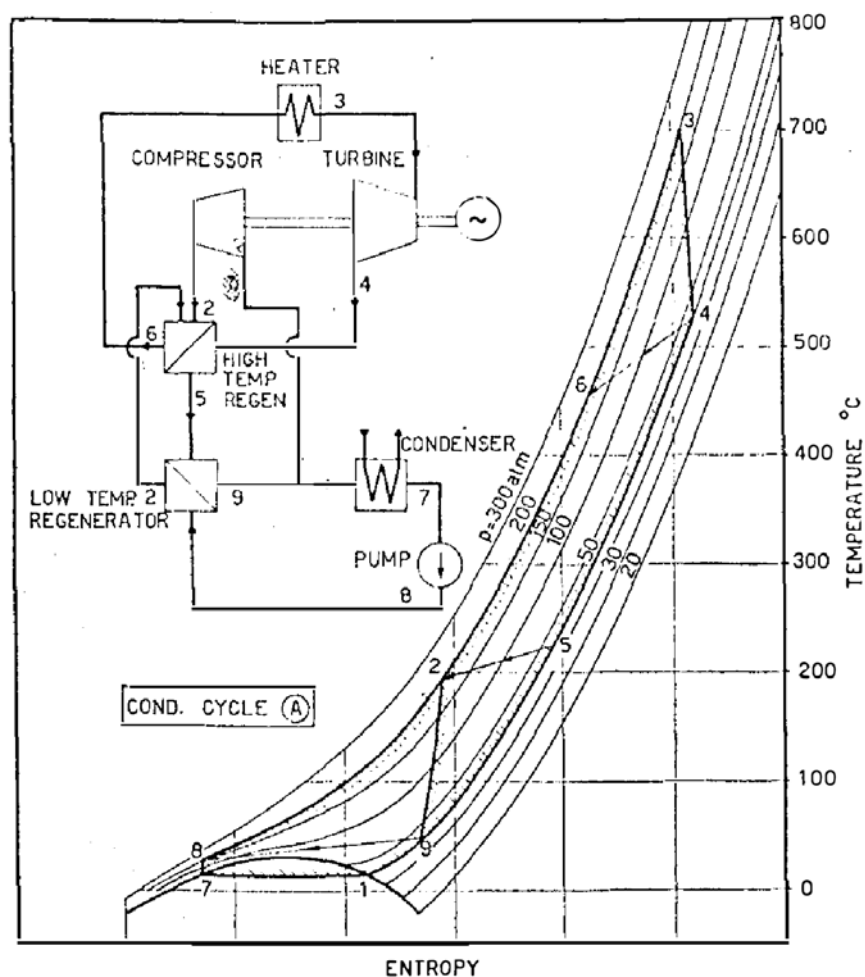


Abbildung 11-1: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Schaltbild und T-s Diagramm (Angelino, 1968)

Verschiedentlich werden dem überkritische CO₂-Kreisprozess zukünftige Entwicklungs-Chancen eingeräumt, bei der Verstromung von Abwärmen einen substantiellen Beitrag leisten zu können (Moser, et al., 2014). Der überkritische CO₂-Kreisprozess, seit Jahrzehnte ein Thema, wird z.B. in einer Studie des Jahres 1968 sehr ausführlich behandelt. Dabei werden die thermodynamischen Restriktionen klar genannt: für Wärmequellen tiefer als 400 bis 550 °C wäre der überkritische CO₂-Kreisprozess bezüglich der Effizienz dem Dampfprozess unterlegen, und bezüglich der Wärmesenke wäre der überkritische CO₂-Kreisprozess nur für Gegenden anwendbar, wenn jahresdurchgängig Kühlwasser von 12 bis 15 °C verfügbar ist. (Angelino, 1968) Bei luftgekühlten Kondensatoren, insbesondere der „trockenen“ Bauart, also ohne einer Verdunstungskühlung, wären die Temperaturwerte nochmals nach unten zu revidieren. Dennoch wurde der in Rede stehende überkritische CO₂-Kreisprozess (Schema, siehe Abbildung 11-2), mit den gleichen Ausgangsparametern wie bei den anderen Prozessen verwendet (siehe Tabelle 7-1), simuliert und optimiert, um auch etwaige, konkurrierende Entwicklung zu erkennen und evaluieren zu können.

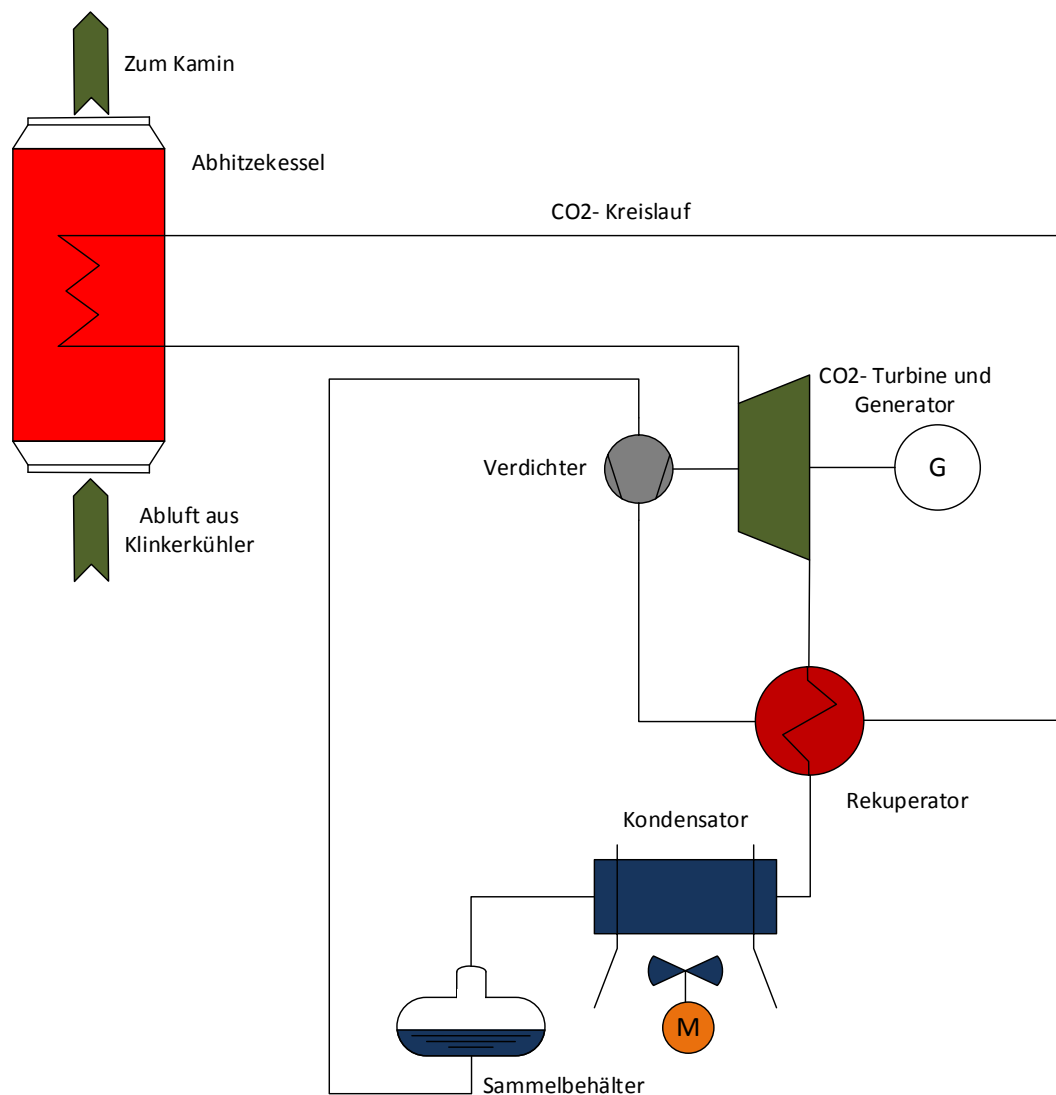


Abbildung 11-2: Überkritischer CO₂-Kreisprozess zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung

11.2 Prozessspezifische Komponentenbeschreibung

11.2.1 Turbine

Der Turbinenwirkungsgrad wurde analog zum im Kapitel 10.2.1 für den ORC- Prozess ermittelten Wirkungsgrad mit einem isentrope Wirkungsgrad von 74,5 % und ein mechanischer Wirkungsgrad von 98 % festgesetzt.

11.2.2 Verdichter

Der Verdichter hat die Aufgabe das Prozessmedium CO₂, das nach dem Kondensator in flüssiger Form vorliegt, auf das erforderliche Druckniveau am Turbineneintritt anzuheben. Das Prozessmedium CO₂ wird dabei auf überkritischen Zustand verdichtet. Der innere Wirkungsgrad des Verdichters wurde in Anlehnung an den inneren Pumpenwirkungsgrad mit 78,5% und einem mechanischem Wirkungsgrad von 97% festgelegt.

11.3 Basisauslegung und Parametervariation

Die Simulationen (Schema siehe Abbildung 11-3, Erläuterungen siehe Tabelle 11-1) zeigten erwartungsgemäß, dass ein beträchtlicher Teil der Turbinenleistung durch den Kompressor-Antrieb verzehrt wird. Die Ergebnisse der Simulation für den Auslegungsfall sind im T-s Diagramm (Abbildung 11-5), im Q-T- Diagramm (Abbildung 11-6) sowie in der Ergebnistabelle (Tabelle 11-2) dargestellt. Bezüglich des Nettowirkungsgrades um rund 7,5 % liegt der überkritische CO₂-Kreisprozess unter dem unterkritischen, konventionellen ORC-Prozess, sodass der letztgenannte die Rolle des Benchmarks behält. Die wie auch bei den anderen Abhitzeprozessen wurde die Temperatur der Umgebungsluft variiert, mit dem Ergebnis, dass oberhalb von 13 °C Umgebungstemperatur keine Durchrechnung mehr möglich ist, da auf der Kondensator-Seite keine Kondensation mehr stattfinden kann (siehe Abbildung 11-7). Für Anlagen wie jene zur Verstromung der Klinkerabluft aus der Zementindustrie ist dies i. d. R. eine KO-Bedingung, da Zementanlagen sommer-durchgängig betrieben werden. Die Simulationsergebnisse stehen im Einklang mit der zitierten Studie (Angelino, 1968). Auch in Anbetracht des geringen Technical Readiness Levels des überkritische CO₂-Kreisprozesses wird eingeschätzt, dass von dieser Technologie für die vorliegenden Anwendungsfälle keine Konkurrenz zu bestehenden Technologien und zu der vorgeschlagenen innovativen Technologie ausgehen wird.

Die Abbildung 11-4 zeigt die Druckoptimierung. Erarbeitete Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung könnten auch für den verwandten überkritischen ORC- Kreisprozess übertragbar sein.

Die Abbildung 11-5 zeigt das T-s Diagramm und Abbildung 11-6 gibt das Q-T Diagramm wieder.

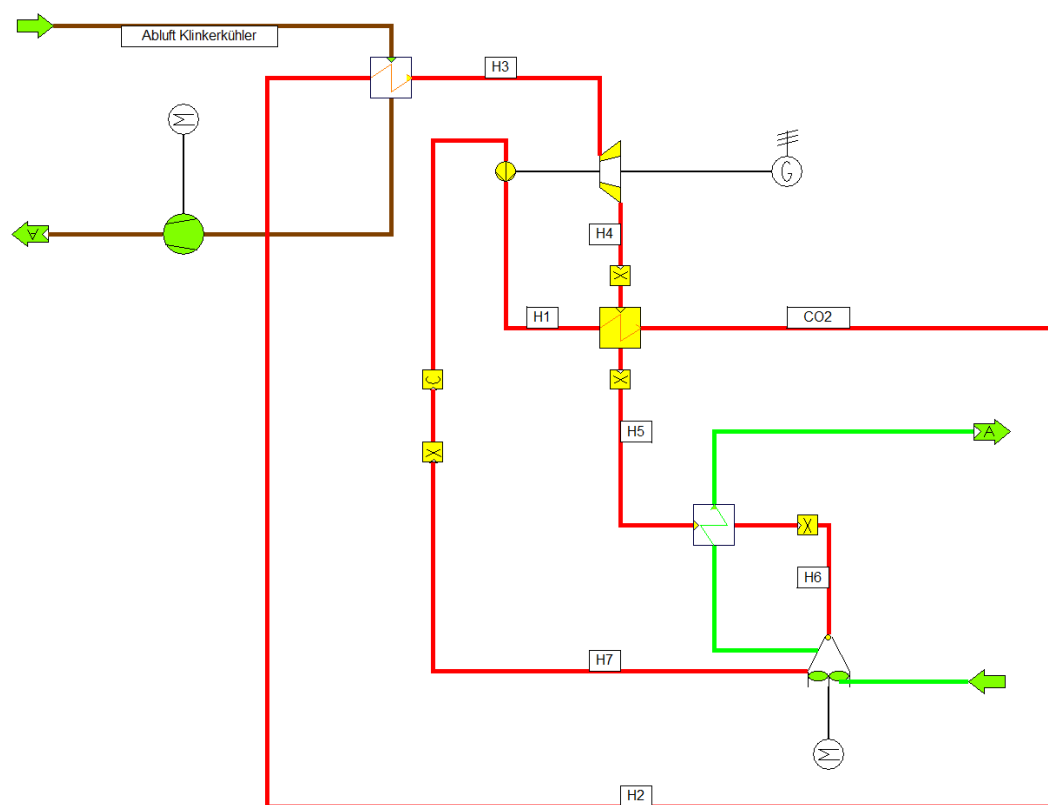


Abbildung 11-3: Überkritischer CO₂-Kreisprozess (aus Abbildung 11-3), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte

Tabelle 11-1: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Beschreibung der Zustandsänderungen

Zustandspunkte	Komponente	Zustandsänderung	Anmerkungen
H1 – H2	Rekuperator	Isobar	
H2 – H3	Abhitzeessel	Isobar	
H3 – H4	Dampfturbine	Entspannung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad auf Kondensationsdruck	
H4 – H5	Rekuperator	Isobar	
H5 – H6	Kondensator, Kühler	Isobar	Kondensator wurde für Simulation in Kühler und Kondensator geteilt
H6 – H7	Kondensator, Kondensator	Isobar, Isotherm	Kondensator wurde für Simulation in Kühler und Kondensator geteilt
H7 – H1	Verdichter	Druckerhöhung gemäß inneren isentropen Wirkungsgrad	

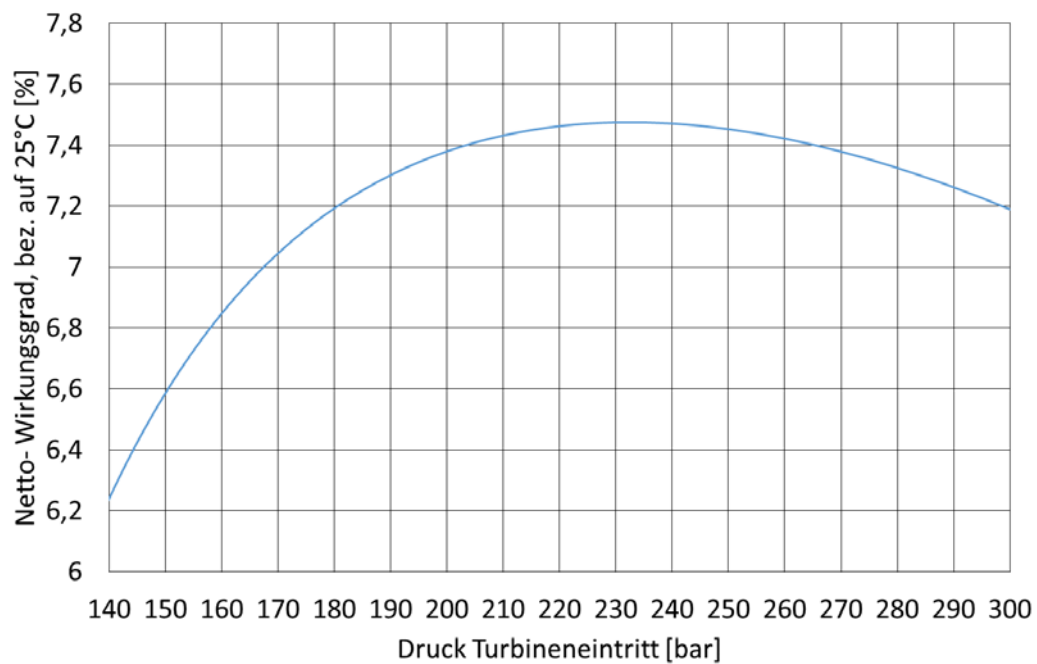


Abbildung 11-4: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Druckoptimierung

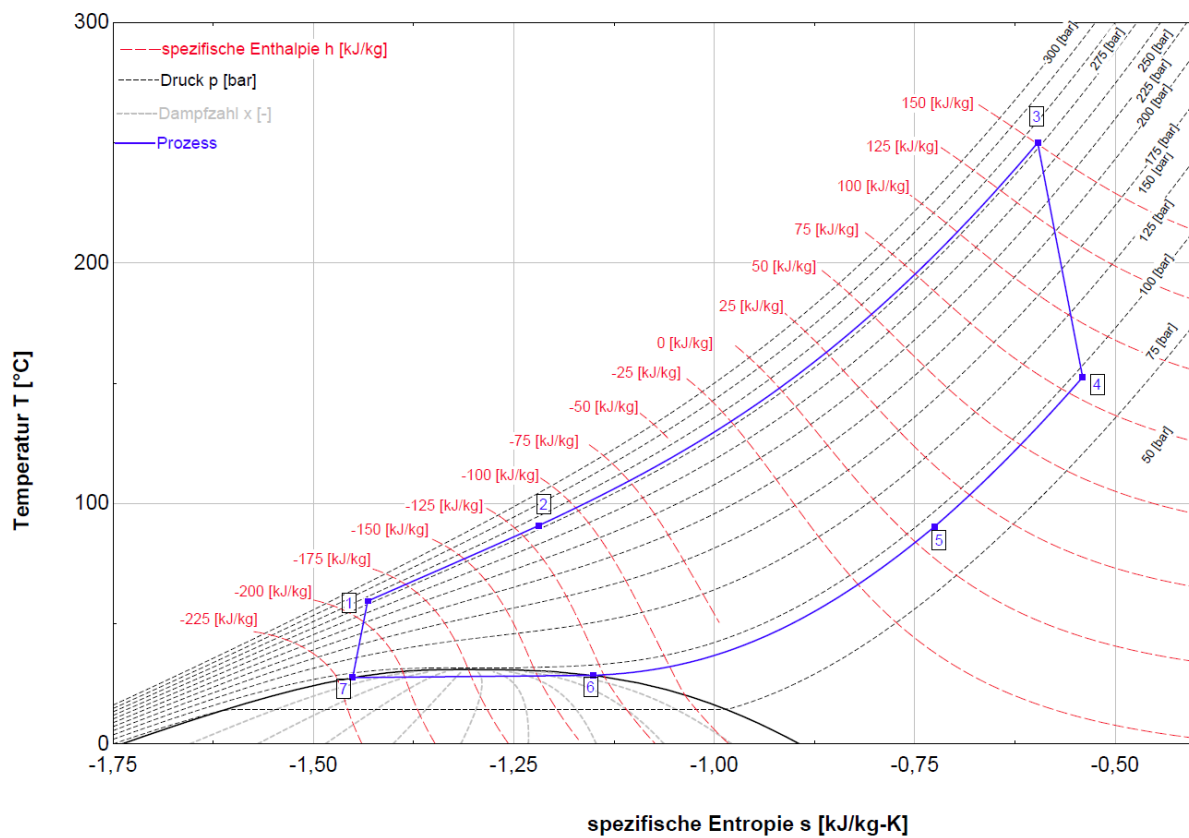
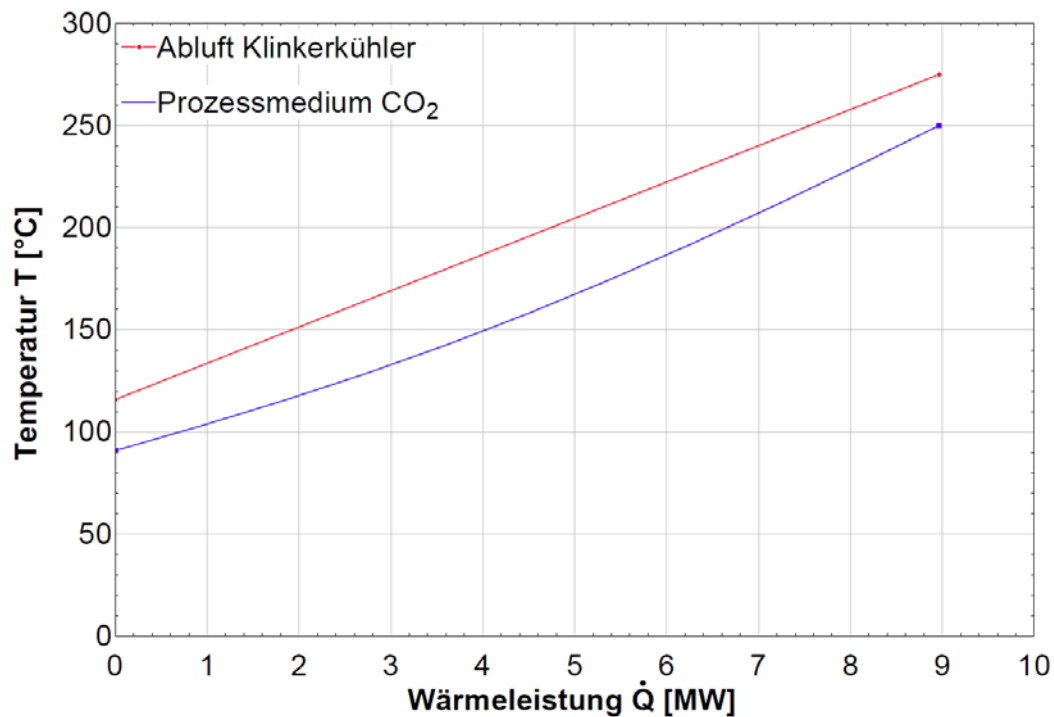


Abbildung 11-5: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Darstellung im T-s Diagramm

Abbildung 11-6: Überkritischer CO₂- Prozess, Darstellung im Q-T DiagrammTabelle 11-2: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall

Temperatur Abwärmestrom	275	°C
Abwärmeleistung, bezogen auf 25°C	14.000	kW
Ausgekoppelte Kesselleistung	8.967	kW
Temperatur Kühlluft Kondensator	11,0	°C
Arbeitsmedium	CO ₂	
Druck vor Turbine	230	bar
Kondensationsdruck	71	bar
Brutto- Leistung Generator	2.174	kW
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	1.046	kW
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	11,7	%
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Abwärmeleistung 25°C	7,5	%

Im weiteren Schritt wurde für diese Auslegungsbedingung eine Parametervariation der Kühllufttemperatur durchgeführt. Aus dem Ergebnis ist die Temperaturabhängigkeit der produzierten elektrischen Leistung erkennbar, was ein weiteres Effizienzkriterium für den Kreisprozess darstellt. Das Ergebnis der Parametervariation ist in Abbildung 11-7 ersichtlich.

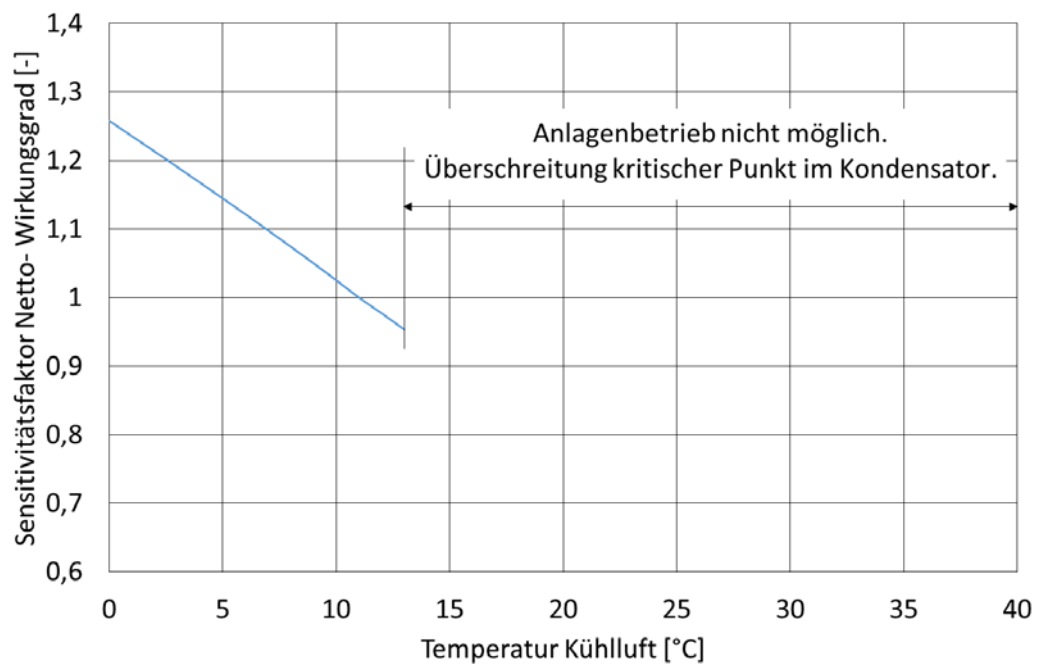


Abbildung 11-7: Überkritischer CO₂-Kreisprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 11-2

12 Vergleich innovativer Dampfprozess mit konkurrierenden Prozessen

12.1 Prozessvergleich

Die Tabelle 12-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der durchgeführten Prozesssimulationen. Eine Überlegenheit des Innovativen Dampfkreislaufes hinsichtlich seines Netto-Wirkungsgrades wurde zwar erhofft, überraschend ist aber das Ausmaß der Überlegenheit; dazu gibt es einige Erklärungsgründe: zunächst entfallen die Exergieverluste und die parasitären Verluste im Zwischenkreislauf vor dem eigentlichen ORC-Prozess. Die Wirkungsgrade, bezogen auf die Kesselleistung, bewegen sich noch in einem engeren Bereich, jedoch kann der innovative Dampfkreislauf wesentlich mehr Kesselleistung aus der Abwärmequelle auskoppeln als alle anderen Prozesse. Deshalb ist der Nettowirkungsgrad, bezogen auf die Abwärmeleistung, des Innovativen Dreidruckprozess relativ um 29 % höher als jene des nächstgereihten ORC-Prozesses. Selbst beim Realisieren eines Innovativen Zweidruckprozesses bleiben noch signifikante Effizienzvorteile gegenüber dem ORC-Prozess. Ein weiterer Aspekt wäre die relative Minderleistung, wenn die Kühllufttemperatur um 1 K steigt; wenn man den extrem empfindlichen CO₂-Prozess ausklammert zeigen die verbleibenden Prozesse eine vergleichbare und ähnliche Minderleistung von rund 1 %.

Tabelle 12-1: Prozessvergleich, Ergebnisse der Prozesssimulation

		Innovativer Dampfprozess RaCiA	ORC- Prozess unterkritisch	Eindruck-Wasserdampf Prozess	Überkritischer CO ₂ - Prozess
Temperatur Abwärmestrom	°C	275			
Abwärmeleistung, bezogen auf 25°C	kW	14.000			
Ausgekoppelte Kesselleistung	kW	9.841	8.458	7.910	8.967
Temperatur Kühlluft Kondensator	°C	11,0			
Arbeitsmedium		Wasserdampf	n-Pentan	Wasserdampf	CO ₂
Brutto- Leistung Generator	kW	1.564	1.353	1.220	2.174
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	kW	1.408	1.094	1.082	1.046
Minder-Leistung (Netto) vs. Kühllufttemperatur	kW/K	14,7	13,1	11,3	24,6 ⁽¹⁾
⁽¹⁾ Einsatzgrenze Kühllufttemperatur 13°C. Darüber überkritische Bedingungen im Kondensator.					

Tabelle 12-1 (Fortsetzung): Prozessvergleich, Ergebnisse der Prozesssimulation

		Innovativer Dampf- prozess RaCiA	ORC- Prozess unterkritisch	Eindruck- Wasserdampf Prozess	Überkritischer CO₂- Prozess
relative Minder-Leistung (Netto) vs. Kühllufttemperatur	%/K	1,0	1,2	1,0	2,4 ⁽¹⁾
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	%	14,3	12,9	13,7	11,7
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Abwärmeleistung 25°C	%	10,1	7,8	7,7	7,5
⁽¹⁾ Einsatzgrenze Kühllufttemperatur 13°C. Darüber überkritische Bedingungen im Kondensator.					

Neben den ponderablen Kriterien der Leistung und Effizienz sind für einen Verfahrensvergleich zwei weitere Kriterien von Bedeutung, und diese werden nachfolgend für die beiden effizientesten Prozesse, nämlich dem innovativen Dreidruckprozesses und dem unterkritischen ORC-Prozesses, diskutiert:

a. Aufwand und Anwendungsmöglichkeiten

In der nachfolgenden Tabelle 12-2 sind die Aufwendungen und die Anwendungsmöglichkeiten des ORC-Prozesses (Benchmark-Prozess) und des innovativen Dreidruckprozesses gegenübergestellt.

Die augenscheinlichsten Unterschiede ergeben sich durch die Wahl des Mediums im Hauptkreislauf: Im Falle des ORC-Prozesses macht die Hitzeempfindlichkeit und die Brennbarkeit des organischen Kreislaufmediums einen Zwischenkreis erforderlich, der nicht nur aufwändig ist, sondern auch Verluste verursacht sowie sicherheitstechnische Zusatzüberlegungen erfordert. Im Hauptkreislauf des ORC-Prozesses scheint unter den Hauptkomponenten ein rekuperativer Wärmetauscher („Reku“) und ein Enthitzer vor dem eigentlichen Kondensator des Rankine-Prozesses auf, und zwar wegen der Eigenschaft des Kreislaufmediums, bei der Dampfexpansion zu überhitzen. Bei dem Innovativen Dreidruckprozess suggeriert das Vorhandensein von drei Druckniveaus zunächst einen hohen Aufwand; durch die Innovationen der Flashdampferzeugung und der Dreidruckturbine mit einem Turbinenrad bleibt aber der Zusatzaufwand angemessen. Hinsichtlich der Forderung, nicht nur eine sondern auch mehrere Abwärmequellen (multivalenter oder sogar hybrider Herkunft), in der Regel mit unterschiedlichen Temperaturniveaus, verwerten zu können bieten die drei Kaskaden (Druckstufen) des Innovativen Dreidruckprozesses möglicherweise entscheidende Vorteile. Natürlich gibt es beim ORC-Prozess auch die Möglichkeit mehrere Abwärmequellen zu nutzen, jedoch geschieht dies über eine Sammelschleife auf der Seite des Zwischenkreislaufes, eben nacheinander und nicht parallel und unabhängig, wie beim Innovativen Dampfkreislauf.

Tabelle 12-2: Aufwendungen und die Anwendungsmöglichkeiten des innovativen Dreidruckprozesses sowie des unterkritischen ORC-Prozesses (Benchmark)

	Innovativer Dampfprozess RaCiA	ORC- Prozess unterkritisch
Abluft-Bypass:	1 oder 0	1
Zwischenkreislauf:	entfällt	1
Medium	entfällt	Thermoöl
Abhitzekeessel	entfällt	1
Pumpengruppe	entfällt	1
Expansionstank	entfällt	1
Hauptkreislauf:	1	1
Medium	H ₂ O	n-Pentan
Vorwärmer	eine	1
Verdampfer	Heizfläche	1
Dampfabscheider	1	1
Flashdampf-Stufen	2	entfällt
Dampfturbine	Dreidruck	Eindruck
Reku	entfällt	1
Kondensator	1	1, mit Enthitzer
Kondensator, Ventilatoren	1	1
Generator	1	1
Mehrere Abwärmequellen:	einbindbar	über Thermoölnetze
Integration in Dampfkraftwerke:	möglich	fraglich

b. Entwicklungsstand und Entwicklungspotential

Der ORC-Prozess wurde durch Entwicklungsarbeiten - und zwar in Richtung der Abwärmenutzung - in der letzten Jahrzehnten auf den jetzigen Stand der Technik gebracht. Die Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten des Dampfkreislaufes für Abwärmen wurde hingegen vernachlässigt; damit hat auch der Innovative Dampfkreislauf einen Entwicklungsrückstand, und dass obwohl seine Komponenten an sich bekannt sind.

Die Tabelle 12-3 zeigt die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten der beiden Technologien. Eine Weiterentwicklung des ORC-Technologie zur mehreren Stufen (Mehrdruck- oder Mehrkreissysteme) kann zu einer Effizienzsteigerung führen; der Schritt zu einem Mehrdrucksystem wurde beim Innovativen Dampfprozess bereits vollzogen. Offen steht für beide Technologien die Hinwendung zu zeotropen Gemischen (die Siedetemperatur gleitet bei der Verdampfung nach oben); Denkansätze auf Basis des Innovativen Kreisprozesses zur Nutzung der Abwärmen von Verbrennungskraftmaschinen sind vorhanden (Beckmann, et al., 2010), sie zielen weniger auf eine Wirkungsgraderhöhung, sondern auf die Frostsicherheit ab. Detailverbesserungen sind naturgemäß bei beiden Technologien möglich.

Tabelle 12-3: Weitere Entwicklungsmöglichkeiten der beiden Technologien: Innovativer Dampfprozess und ORC-Technologie

	Innovativer Dampfprozess RaCiA	ORC- Prozess unterkritisch
Über- statt unterkritisch	für NT-Abwärmen nicht möglich	ja
2-Druck bzw. 2-Kreis	im innovativen Konzept realisiert	ja, offen
3-Druck bzw. 3-Kreis		ja, offen
Azeotrope Gemische	angedacht	ja, offen
Diverse Verbesserungen	einige Varianten	?

12.2 Bereitgestellte Energiemengen

Die als Auslegungsbedingungen gewählte Temperatur von 11 °C kann auch für österreichische Standorte als repräsentativ betrachtet werden. Auf Basis des Klimadatensatzes von Graz (Thermal Energy System Specialists, LLC, 2012) wurde der zeitliche Verlauf der Außentemperatur über den Betrachtungszeitraum 01.03. – 23.12. gemittelt. Im Zeitraum von 24.12. – 28.02. wird davon ausgegangen, dass das Zementwerk für Revisionsarbeiten still steht. Die mittlere Temperatur der Umgebungsluft im Betrachtungszeitraum beträgt 10,8 °C.

In der Prozesssimulation der untersuchten Prozesse wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Kühllufttemperatur am Kondensatoreintritt und produzierter Netto- Leistung des Gesamtprozesses festgestellt. Aus diesem Grund können die jährlich bereitgestellten Energiemengen über die mittlere Temperatur im Betrachtungszeitraum und die Anzahl an Stunden in diesem Zeitraum ermittelt werden (siehe Tabelle 12-4).

Tabelle 12-4: Prozessvergleich, jährlich produzierte Energiemenge

	Innovativer Dampfprozess RaCiA	ORC- Prozess unterkritisch	Einheit
Jährliche Anlagen- Betriebszeit	01.03. – 23.12.		TT.MM
Jährliche Betriebsstunden	7.152		h
Mittlere Kühlluft- Temperatur Kondensator	11,0		°C
Netto- Leistung Gesamtprozess (abz. Leistung Pumpen und Ventilatoren)	1.408	1.094	kW
Jährlich produzierte Energiemenge	10.070	7.824	MWh

13 Sicherheitstechnische Fragestellungen beim innovativen Dampfprozess

13.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Fragestellungen interessiert, inwieweit der innovative Dampfkreislauf gegenüber einem konventionellen Dampfkreislauf neue sicherheitstechnische Fragen aufwirft, wie ein Vergleich der sicherheitstechnischen Erfordernisse aussieht und ob sogar gegenüber dem konventionellen Dampfkreislauf und punktuell gegenüber dem ORC-Prozess Erleichterungen möglich wären.

Die Gesamtproblematik ist wie folgt gegliedert:

- Notwendigkeit eines Abluft-Bypasses
- Druckbehälter: Anforderungen
- Fazit

Anders als bei der konventionellen Dampfkraftwerkstechnik sind die Sicherheitsaspekte bei dem innovativen Dampfkreislauf nicht standardisiert.

13.2 Notwendigkeit eines Abluft-Bypasses

Beim ORC-Prozess ist parallel zum Abhitzekeessel eine Bypassleitung mit einer Bypassklappe sowie vor und nach dem Abhitzekeessel mit jeweils einer Absperrklappe vorgesehen. Es ist in Zukunft die Frage zu stellen, ob ein derartiger Bypass bei dem innovativen Kreislauf unbedingt erforderlich ist, da das Medium Wasser/Dampf hitzefest ist und bei einer entsprechenden Auslegung des Ecos keine Gefahr für eine Überhitzung drucktragender Wandungen besteht.

13.3 Anforderungen druckführende Behälter

Der innovative Dampfkreislauf enthält die folgenden druckführenden Behälter mit den entsprechenden sicherheitsrelevanten Daten:

- Economiser mit Vorverdampfung: Attribute; beheizt, ist dieser überhaupt überhitzungsgefährdet? Wasserrohr-Design
- Abscheideflaschen: Attribute; nicht beheizt, nicht überhitzungsgefährdet; stehend; im Betrieb ohne Wasservorlage

Für Druckbehälter allgemein sind die Druckgeräteverordnung (DGVO, 2015) und Druckgeräteüberwachungsverordnung (DGÜW-V, 2015) zu nennen. Über die Sicherheits-Anforderungen für „befeuerte und anderweitig beheizte und überhitzungsgefährdete Druckgeräte“ existieren Richtlinien (EN 12952). Im Vergleich zu (konventionellen) Dampfkesseln, deren Aufstellung und Betrieb in der Vorschrift (Aufstellung und Betrieb von Dampfkesseln – (ABV, 2012)), derzeit, seit 02.05.2012 allerdings außer Kraft) umrissen ist, sind wegen des geringen Gefahrenpotentials des innovativen Kreislaufs zumindest Erleichterungen zu

erwarten, da „...auf Grund der Art der Beheizung bei Wassermangel keine Gefahr für eine (unzulässige) Überhitzung drucktragender Wandungen besteht...“ (ABV, 2012).

13.4 Fazit

Der innovative Dampfkreislauf wirft einschätzungsgemäß gegenüber einem konventionellen Dampfkreislauf keine grundlegend neuen die innovative Technologie blockierenden sicherheitstechnischen Fragen auf. Regeln über Dampfkesseln wurden, auch vor dem historischen Hintergrund betrachtet, mit besonderer Sorgfalt erstellt; gegenüber dem konventionellen Dampfkreislauf müssten sachlich begründbare Erleichterungen möglich sein. Im Zuge einer weiteren Forschung bzw. Entwicklung, nach einem Basic Engineering, wenn also Standort, Betreiber und Hersteller festliegen, wäre es der rechte Augenblick, in einer autorisierten Risiko-Analyse auch derartige, offene Fragen zu klären.

14 Betrachtung der Umweltauswirkungen

14.1 Einleitung/Allgemeines Ökobilanz

Innerhalb des Projektes sollen die Umweltauswirkungen des innovativen Dampfprozesses und einer konventionellen ORC-Anlage, beides Verfahren zur Nutzung von Abwärme zur Stromproduktion, analysiert und verglichen werden. Neben der technischen und wirtschaftlichen Beurteilung ist die Abschätzung der ökologischen Effekte die dritte Dimension, die innerhalb des Projektes Berücksichtigung findet.

Die Ökobilanzierung ist ein Tool zur Ermittlung von Umweltauswirkungen verbunden mit einem Produkt oder einer Serviceleistung. Die Ökobilanz kann sowohl dazu dienen ein einzelnes System zu untersuchen, als auch dazu Systeme miteinander zu vergleichen.

Nicht nur die Herstellung von Produkten, auch die Bereitstellung von Dienstleistungen, wie im Falle der Energiebereitstellung, ist mit unerwünschten Nebeneffekten verbunden. Die Umwelt wird durch Emissionen und Ressourcenverbrauch beeinträchtigt und belastet. Mithilfe von Methoden wie der Ökobilanzierung können Informationen darüber untersucht und bereitgestellt werden.

Die Ökobilanz, auch bekannt unter „Life Cycle Assessment (LCA)“ oder „Lebenszyklusanalyse“ ist ein genormtes Verfahren zur Abschätzung von Umweltaspekten und Umweltwirkungen. Die Normen EN ISO 14040, 2006 und EN ISO 14044, 2006 definieren die Vorgehensweise und geben wertvolle Informationen zur Durchführung einer Ökobilanzstudie. (Klopffer, et al., 2009)

Die Ökobilanzstudie nach ISO 14040 besteht aus 4 Phasen (Abbildung 14-1). Die Struktur der folgenden Untersuchung, die sich an die Vorgaben der ISO 14040 und 14044 orientiert, ist somit vorgegeben. (EN ISO 14040, 2006), (EN ISO 14044, 2006)

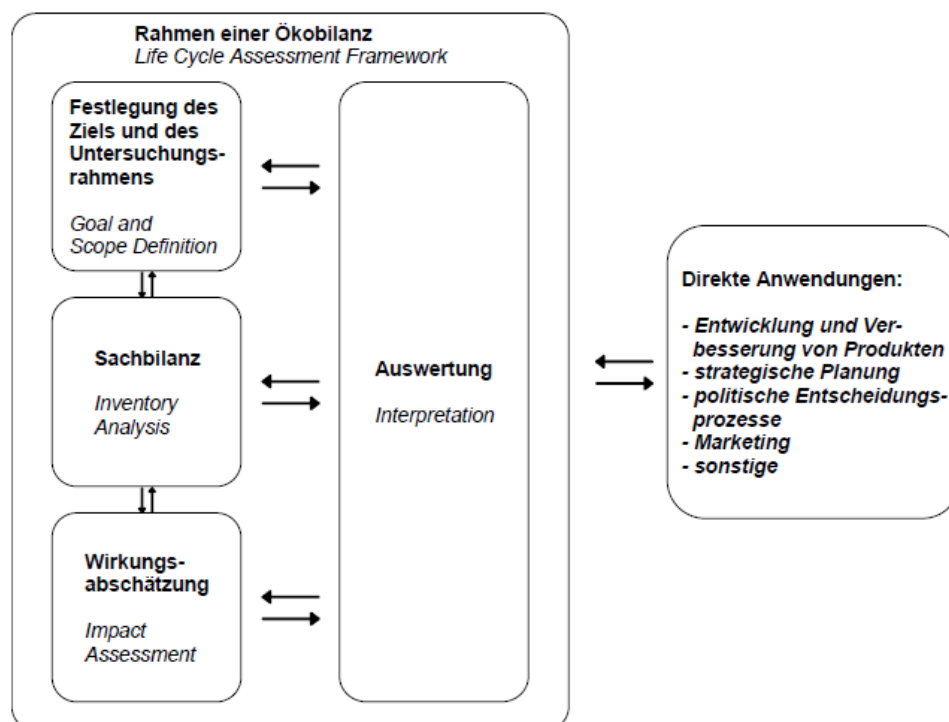


Abbildung 14-1: 4 Phasen der Ökobilanz nach (EN ISO 14040, 2006)

Die Ökobilanz beruht auf einem Lebenszyklus-Ansatz, was bedeutet, dass die Umweltwirkungen des betrachteten Systems von der Wiege bis zur Bahre erfasst und beurteilt werden. Somit werden alle nötigen Prozesse von der Rohstoffentnahme bis hin zur Entsorgung des Produktes und der Produktionsabfälle berücksichtigt.

14.2 Ziel und Rahmenbedingungen

Ziel eines Prozesses zur Abwärmenutzung ist es, möglichst viel Strom aus der zur Verfügung stehenden Wärmemenge zu produzieren. Der übergeordnete Gedanke hinter der Implementierung einer Abwärmenutzung ist die Optimierung bestehender Systeme, Anlagen. Die vorliegende Untersuchung soll eine Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung aus ökologischer Sicht bieten, welche Einsparpotentiale die Technologien zur Abwärmenutzung bieten können.

Untersucht werden zwei Prozesse zur Nutzung von Abwärme für die Stromerzeugung, ein ORC-Prozess und ein neuartiger Dampfprozess (RaCiA Prozess). Die Abschätzung der Umweltauswirkungen der beiden Prozesse, soll einen groben Vergleich der beiden Technologien zulassen und zeigen in welcher Lebensphase (Herstellung, Betrieb oder Entsorgung) Unterschiede in den Umweltauswirkungen auftreten können.

14.2.1 Ziel

Ziel der Ökobilanzstudie ist es die Umweltauswirkungen verbunden mit der Stromproduktion der beiden Verfahren zu erheben, evaluieren und diskutieren. Dazu werden die Belastungen aus der Anlagenherstellung, des Betriebes und der Beseitigung, Gutschriften aus einer vermiedenen Fremdstromproduktion gegenübergestellt.

14.2.2 Systembeschreibung / Systemgrenzen

Die Systemgrenzen werden technisch, örtlich und zeitlich gesetzt. Die örtliche Systemgrenze orientiert sich an dem Prozess der Abwärmenutzung im Zementwerk in Heidelberg (Heidelberger Zement AG, 2001). Es werden die nötigen Komponenten für die verschiedenen Systeme betrachtet, die rein aufgrund der Abwärmenutzung installiert werden. Somit stellt der Punkt der Abwärmeübernahme (inkl. Abwärmekessel) und der Punkt der Stromübergabe (Klemme nach Generator, vor Trafo und Netz) die örtliche Begrenzung dar. Die zur Produktion der Komponenten nötigen Ressourcen und Vorprodukte werden mit einbezogen, die verschiedenen Herstellungsorte der Materialien werden mit durchschnittlichen Transportdistanzen berücksichtigt. Als zeitliche Systemgrenze werden 20 Jahre Betriebszeit festgelegt. Die jeweiligen Lebensdauern der einzelnen Komponenten finden ebenfalls Berücksichtigung. Die produzierten und benötigten Energiemengen werden für die Betrachtungsdauer ermittelt.

Die grafische Darstellung der zu untersuchenden Systeme erfolgt mit Hilfe von Flussbildern im Kapitel 14.4 und 14.5. Die thermodynamische Prozessbeschreibung mit den Prozessfließbildern sind in Kapitel 8.1 und 10.1 dargestellt.

Für jeden Prozess (für jede betrachtete Komponente) wird die In/Output Analyse anhand des Lebensweges durchgeführt. Für die Komponenten werden die verbrauchten Materialien mit den dazugehörigen Massen ermittelt. Zur Herstellung der Anlage gehört auch die Befüllung mit den nötigen Betriebsflüssigkeiten, wie Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl und Arbeitsmedien. Während der Nutzung der

Anlagen wird Energie produziert. Daneben fallen Aufwendungen für den Betrieb an, wie Antriebsstrom, Verbrauch an Betriebsflüssigkeiten und Unterhaltungsaufwendungen für Reparaturen. Am Ende der Lebensdauer werden die verwendeten Materialien einer Entsorgung oder dem Recycling zugeführt. Der nötige Transport der Materialein zur Entsorgung wird ebenso berücksichtigt.

14.2.3 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit beschreibt die Funktion (den Nutzen) des Systems. Alle Inputs und Outputs (Ressourcen- Energieverbräuche und Emissionen) und deren Wirkungen werden auf die funktionelle Einheit bezogen. (Klöpffer, et al., 2009) Folgende funktionelle Einheit wird definiert:

„Erzeugung elektrischer Energie, ab Generator, über 20 Jahre Betrachtungszeit“

14.3 Sachbilanz

Im Zuge der Sachbilanz wird das zu untersuchende System in Teilsysteme aufgespalten und analysiert. Die Teilsysteme sind durch Flüsse (Stoff- und Energieströme) miteinander verbunden. Die Teilsysteme oder Basisprozesse werden als „black-box“ betrachtet. Die Datensammlung für die beteiligten Prozesse erfolgt systematisch mit Hilfe von Stoff- und Materialflussanalysen in Form einer Input- Outputanalyse. Es werden die Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie aus der Natur entnommene Ressourcen betrachtet und erfasst. (Curran, 2012), (Klöpffer, et al., 2009)

Für die vorliegende Untersuchung wird auf Daten aus der ecoinvent Datenbank (Ecoinvent, 2010) zurückgegriffen. Somit ist es zwar notwendig die Material- und Energiemengen zu erheben, die damit verbundenen Umweltauswirkungen werden von den Datenbankprozessen übernommen.

14.3.1 Allokation und Vereinfachungen (Abschneidekriterien)

Sobald bei einem Produktsystem Koppelprodukte entstehen oder Recycling eine Rolle spielt, muss die Allokation der Umweltauswirkungen in Betracht gezogen werden. In den vorliegenden Systemen zur Stromerzeugung werden keine Koppelprodukte erzeugt. Jedoch ist die Verwendung von Recyclingrohstoffen in der Produktion nicht ausgeschlossen. Wo jedoch Gewissheit besteht, ist dass das Recycling von Metallen am Ende der Nutzung passiert. Dieser Umstand macht Überlegungen zum Thema Allokation und möglichen Methoden notwendig. Aus Sicht der Datenbereitstellung wird die Cut-Off Methode bevorzugt. Auf die Datensätze der ecoinvent Datenbank wird die Cut-Off Methode angewendet. D.h. es werden keine Belastungen für das Recycling angerechnet, nur die direkten Belastungen aus der Entsorgung und Herstellung der Primärrohstoffe. Für die gesamte Untersuchung findet die Cut-Off Methode Anwendung. (Baumann, et al., 2004)

14.3.2 Daten (Materialien und Arbeitsmedien)

Als Datenquellen dienen Herstellerangaben und Literaturdaten. Die Herstellerangaben sind sehr allgemein und meist nicht auf die einzelnen verwendeten Materialien heruntergebrochen. Aus der Literatur können diese Informationen jedoch erhoben werden.

14.4 Innovativer Dampfprozess RaCiA

Die Abbildung 14-2 zeigt den Lebenszyklus der RaCiA Anlage und symbolisiert die betrachteten Inputs und Outputs. Die Grenze zur Umwelt und somit zum Betrachtungsraum wird mit der Systemgrenze definiert. Das Zementwerk selbst befindet sich außerhalb der Systemgrenze. Der Lebenszyklus wird in Herstellung, Nutzung/Betrieb und End-of-life unterteilt. In jeder dieser Lebenszyklusphasen werden Materialien und Energie benötigt, die Bereitstellung dieser Inputs ist mit Emissionen in Luft, Wasser und Boden verbunden. Die Stromproduktion wird mit Hilfe einer Gutschrift berücksichtigt, für die Substitution von Fremdstromproduktion. Das Zementwerk benötigt elektrische Energie die, so sie nicht vor Ort produziert wird, von Energieversorgungsunternehmen bezogen werden muss.

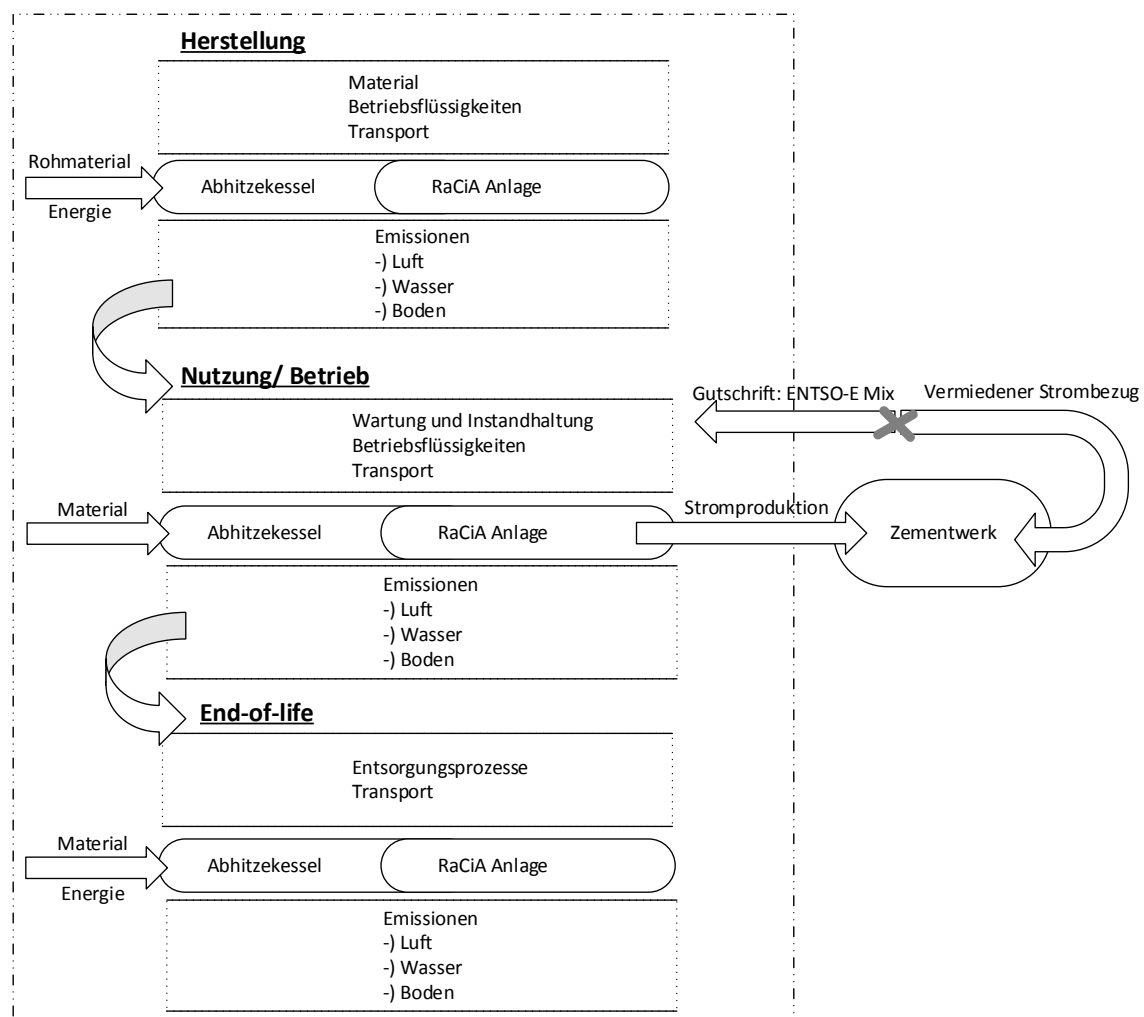


Abbildung 14-2: Lebenszyklus-Phasen RaCiA Prozess; Darstellung der Inputs und Outputs und der Stromgutschriften

14.4.1 Herstellung der Komponenten

Für die Modellierung der nötigen Komponenten der RaCiA Anlage wurden Herstellerangaben und Literaturangaben erhoben, eigene Berechnungen und Schätzungen waren teilweise zur Vervollständigung der Daten nötig.

Tabelle 14-1: Komponenten mit Materialmenge RaCiA

Komponente	ges. Masse [kg]	Stahl unlegiert [kg]	Stahl niederlegiert [kg]	Stahl hochlegiert [kg]	Gusseisen [kg]	Aluminium [kg]	Kupfer [kg]	Polyester [kg]	Silikon [kg]	Steinwolle [kg]	Quelle
Turbine inkl. Öl System	19.000	15.770	760	570	1.520	95	95	95	95		(Firma A, 2015); (Briem, et al., o.J.) ¹⁾
Generator inkl. Steuerschrank	9.850	5.609	1.505	137	1.368	91	1.140				(Firma A, 2015); (Briem, et al., o.J.) ¹⁾
Abhitzeessel (Eco)	32.000	30.000								2.000	(Firma C, 2015)
Flash Tanks	2.110	1.810								300	(Firma C, 2015)
Rohrleitungen	16.000	15.000								1.000	eigene Schätzung
Kondensator	75.000	74.257				743					(Firma C, 2015)
¹⁾ %-Aufteilung übernommen aus Datensätzen der Literatur (Briem, et al., o.J.)											

Die Menge an Betriebsflüssigkeiten für die erste Befüllung der Anlage beruht auf Herstellerangaben, eigenen Berechnungen bzw. wird von der Literatur (Briem, et al., o.J.) übernommen.

Tabelle 14-2: Betriebsflüssigkeiten RaCiA Anlage

Betriebsflüssigkeiten	ges. Masse [kg]	Wasser [kg]	Ölprodukte [kg]	Quelle
Kesselwasser	15.000	15.000		(Firma C, 2015), eigene Schätzung
Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl	1.110		1.110	(Briem, et al., o.J.)

Für den Transport der Anlagenkomponenten wurden die Literaturwerte aus (Briem, et al., o.J.) übernommen. Damit sind die wichtigsten Transportmittel berücksichtigt mit durchschnittlichen Distanzen. Mit deren Hilfe und den ermittelten Massen (Tabelle 14-1 und Tabelle 14-2) werden die gefahrenen Tonnenkilometer ermittelt (siehe Tabelle 14-3).

Tabelle 14-3: Transportdistanzen der Anlagenkomponenten (Briem, et al., o.J.)

Transport Anlagenkomponenten- Herstellung	Distanz	Einheit
Schiene	200	km
LKW 40t	100	km
LKW 28t	50	km
LKW 16t	40	km

Die Planung, Montage und Inbetriebnahme ist ebenfalls mit Aufwendungen verbunden. Verschiedene Energieträger werden gebraucht z.B.: im Planungsbüro, für die Bauinstallationen oder für projektbedingte Autofahrten. In (Heck, 2007) werden dafür Energiemengen bezogen auf die Planungskosten abgeschätzt und mit einem Verteilschlüssel auf die Energieträger Heizöl, Treibstoff und Strom aufgeteilt. Im Zuge der Herstellung der Anlage hat die Materialbereitstellung die übergeordnete Bedeutung (Rohstoffgewinnung bis Anlagenbau), weniger bedeutend sind: die Verarbeitung, der Zusammenbau und die Inbetriebnahme der Anlage (Dones, et al., 2007). In (Briem, et al., o.J.) werden die Endverarbeitung der Bauteile und die damit verbundenen Belastungen bis zum Einbau der Anlage vernachlässigt. Gründe dafür sind, dass die Aufwendungen vergleichsweise gering sind und keine Daten ermittelt werden konnten. Auch für die vorliegende Studie konnten keine belastbaren Daten von Herstellern erhoben werden, deswegen wird für die vorliegende Studie dieser Teil nicht betrachtet.

14.4.2 Betrieb inkl. Wartung

In der Betriebsphase entstehen Aufwendungen für Kesselwasser und Öl, aber auch für Reparaturen und Ersatzteile. Es kommt zu einem Verbrauch von Betriebsflüssigkeiten aufgrund von Verlusten oder Tausch. Die Mengenangaben dazu werden aus Literaturangaben übernommen (Briem, et al., o.J.). Das Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl wird alle 4 Jahre getauscht, jährlich muss 1 % Verlust berücksichtigt werden. Der jährliche Kesselwasserverbrauch wird als Prozentsatz auf Basis der Angaben für den Dampfturbinenprozess in (Briem, et al., o.J.), mit 33 % übernommen.

In Anlehnung an (Briem, et al., o.J.) erreichen alle Anlagenteile (Maschinen- und Elektrotechnik) ihr Lebensende nach 20 Jahren.

In der Betriebsphase ist die Energiegewinnung (unter Berücksichtigung des Eigenverbrauchs) eine bedeutende Größe. Die mögliche produzierte Energiemenge findet mit Hilfe von Stromgutschriften Berücksichtigung. Für die produzierte Energie wird dieselbe Menge an Strom aus dem europäischen Verbundnetz gutgeschrieben. Wenn Strom in einem Kraftwerk erzeugt wird, ist dies auch mit Umweltbelastungen verbunden. Wird der Strom vor Ort produziert, entfällt die Stromproduktion an anderer Stelle. Um dies abzubilden, wird eine Gutschrift in Höhe der Umweltbelastungen der potentiell substituierten elektrischen Energie vergeben. Die Berücksichtigung von Gutschriften hat zur Folge, dass die Umweltauswirkungen, die als Belastung aus der Anlagenherstellung und dem Anlagenbetrieb resultieren mit den Umweltauswirkungen aus der Bereitstellung von Strom (ENTSO-E Mix) gegengerechnet werden. Die produzierte Strommenge über 20 Jahre Betrachtungszeit ist in Tabelle 12-4 ersichtlich.

14.4.3 Entsorgung

Nach der jeweiligen Lebensdauer der Anlagenkomponenten werden diese dem Recycling oder der Entsorgung zugeführt. Gemäß einer Recyclingquote für Metalle von 80 % (Briem, et al., o.J.) werden 20 % entsorgt. Alle nichtmetallischen Materialien werden zu 100 % der Entsorgung zugeführt. Inertstoffe, wie die Steinwolle werden in einer Inertstoffdeponie entsorgt, Reste an Kunststoffen in der Müllverbrennungsanlage. (Primas, 2007) Im Fall der Metalle, gelangen die verbleibenden 20 % je zur Hälfte auf die Deponie und in die Verbrennung. Der Transportweg für das End-of-Life Szenario wird mit 50 km berücksichtigt. (Briem, et al., o.J.)

14.5 ORC- Prozess

Die Abbildung 14-3 zeigt den Lebenszyklus der ORC Anlage und symbolisiert neben den Lebenszyklus – Phasen auch die betrachteten Inputs und Outputs. Die Grenze zur Umwelt und somit zum Betrachtungsraum wird mit der Systemgrenze definiert. Das Zementwerk ist außerhalb der Systemgrenze. Die Stromproduktion wird mit Hilfe einer Gutschrift für die substituierte Fremdstromproduktion berücksichtigt.

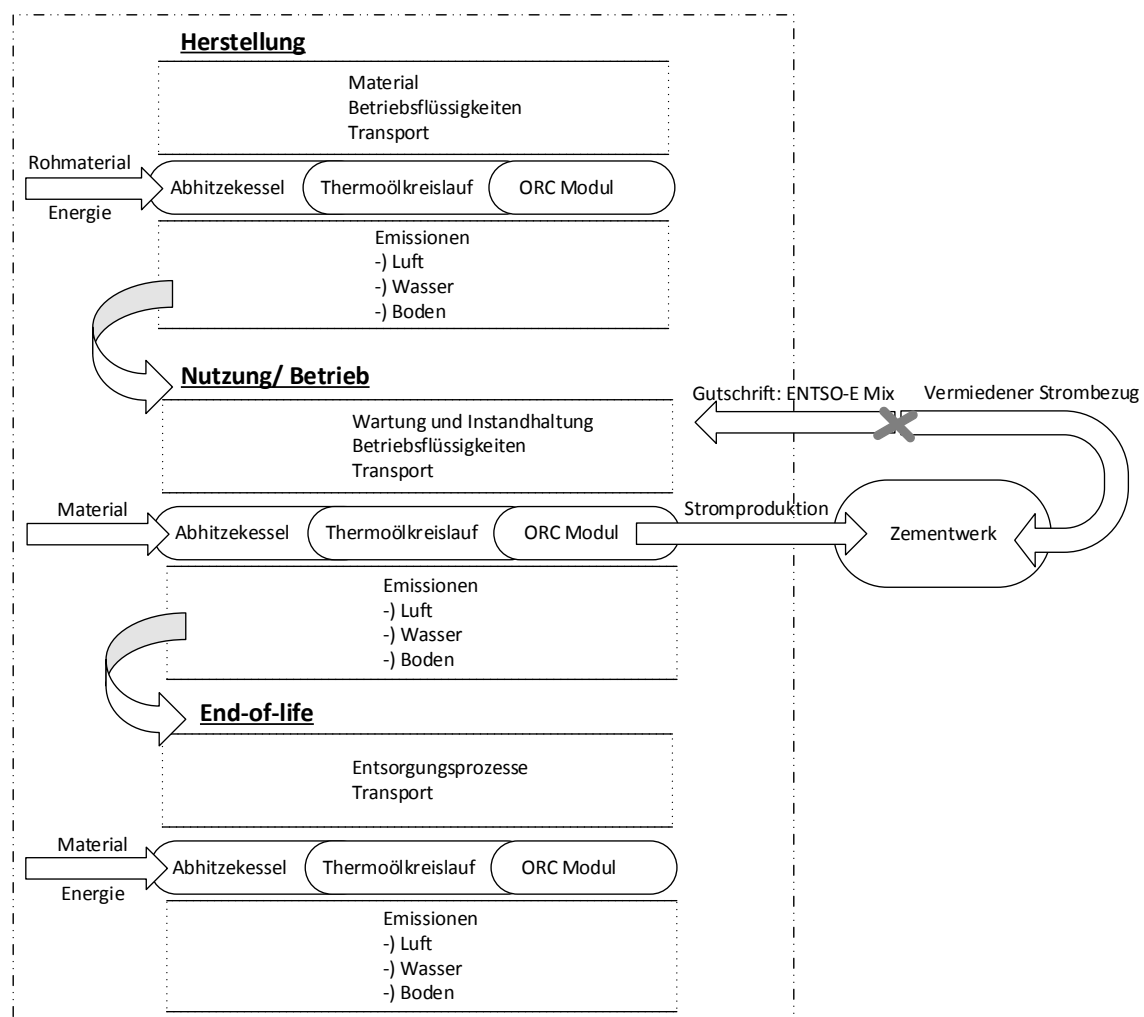


Abbildung 14-3: Lebenszyklus-Phasen ORC Prozess; Darstellung der Inputs und Outputs und der Stromgutschriften

14.5.1 Herstellung der Komponenten

Für den ORC-Prozess werden die Daten auf Basis von Literaturangaben (Briem, et al., o.J.) und Herstellerangaben (für den vorliegenden Anwendungsfall angepasst. Die in (Briem, et al., o.J.) beschriebene Anlage weist eine Nennleistung von 1 MW auf. Die Daten aus der Literatur werden mithilfe eines Skalierungsfaktors (basierend auf dem Gesamtgewicht ergibt dieser 1,22) auf die gewünschte Anlagengröße hochgerechnet, die prozentuale Aufteilung der einzelnen Materialien bleibt dieselbe. Die so errechnete Gesamtmasse wurde mit den Angaben von (Firma D, 2015) verglichen.

Tabelle 14-4: Komponenten mit Materialmenge ORC

Komponente	ges. Masse [kg]	Stahl unlegiert [kg]	Stahl niederlegiert [kg]	Stahl hochlegiert [kg]	Aluminium [kg]	Kupfer [kg]	Steinwolle [kg]	Quelle
Abhitzeessel (Eco)	32.000	30.000					2.000	(Firma C, 2015)
ORC Modul	67.000 ¹⁾	12.182	48.727			6.091		(Firma D, 2015); (Briem, et al., o.J.)
Thermoölkreislauf (ohne Thermoölkessel)	28.861	27.879	7	975				(Briem, et al., o.J.)
Kondensator	60.000	59.406			594			(Firma C, 2015)
¹⁾ Angabe Gesamtgewicht lt. Auskunft (Firma D, 2015); Prozentaufteilung der Materialien aus Literatur (Briem, et al., o.J.)								

Die Thermoölmenge für die erste Befüllung der Anlage wird von der Literatur (Briem, et al., o.J.) übernommen und mit dem Skalierungsfaktor (basierend auf dem Gesamtgewicht der Anlagen) für die etwas größere Anlage hochgerechnet. Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl bleibt unverändert zu den Literaturangaben, die nötige Menge n-Pentan ist aus den Angaben der Heidelberger Zement AG (2001) übernommen.

Tabelle 14-5: Betriebsflüssigkeiten ORC-Modul und Thermoölkreislauf

Betriebsflüssigkeiten	ges. Masse [kg]	Ölprodukte [kg]	Pentan [kg]	Quelle
Thermoöl	18.273	18.273		(Briem, et al., o.J.)
Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl	1.100	1.100		(Briem, et al., o.J.)
n-Pentan (anstelle vom Silikonöl)	3.780		3.780	(Heidelberger Zement AG, 2001)

Für den Transport der Anlagenkomponenten wurden die Literaturwerte für die Transportdistanzen aus (Briem, et al., o.J.) übernommen (siehe Tabelle 14-3). Die mit der Planung, Montage und Inbetriebnahme verbundenen Aufwendungen werden wie für die RaCiA-Anlage besprochen, nicht berücksichtigt. Die Endverarbeitung der Bauteile und die damit verbundenen Belastungen bis zum Einbau der Anlage werden vernachlässigt.

14.5.2 Betrieb inkl. Wartung

Während des Anlagenbetriebes kommt es zu einem Verbrauch von Betriebsflüssigkeiten aufgrund von Verlusten oder Tausch der Flüssigkeiten. Die Mengenangaben dazu werden aus Literaturangaben übernommen. (Briem, et al., o.J.) Das Hydraulik-, Turbinen- Antriebsöl wird alle 4 Jahre getauscht, jährlich muss 1 % Verlust berücksichtigt werden. Das Arbeitsmedium n-Pentan wird jährlich um 100 kg ergänzt, es erfolgt kein vollständiger Tausch während der Lebensdauer. Für das Thermoöl im Thermoölkreislauf wird weder ein Verlust noch ein Tausch in die Berechnung aufgenommen. Aus (Briem, et al., o.J.) kann auch eine Angabe zu Unterhaltungsaufwendungen für Maschinen- und Elektrotechnik um Reparaturen und Ersatzteile zu berücksichtigen entnommen werden. Es wird 1 % der gesamten verbauten Masse jährlich für diesen Zweck in der Berechnung der Umweltauswirkungen berücksichtigt.

Nach 15 Jahren hat das ORC Modul sein Lebensende erreicht. (Briem, et al., o.J.) Alle anderen Anlagenteile (Maschinen- und Elektrotechnik) erreichen ihr Lebensende nach 20 Jahren.

Die Energiegewinnung (unter Berücksichtigung des Eigenverbrauchs) ist eine bedeutende Größe. Die produzierte Energiemenge über 20 Jahre findet mit Hilfe einer Gutschrift Berücksichtigung. Dazu werden die Umweltauswirkungen aus der vermiedenen Stromproduktion (ENTSO-E Mix) gutgeschrieben. Die produzierte Strommenge ist in Tabelle 12-4 ersichtlich.

14.5.3 Entsorgung

Nach der jeweiligen Lebensdauer der Anlagenkomponenten werden diese dem Recycling oder der Entsorgung zugeführt. Gemäß einer Recyclingquote für Metalle von 80 % werden 20 % entsorgt. Alle nichtmetallischen Materialien werden zu 100% der Entsorgung zugeführt. Die Entsorgung erfolgt, wie in Kapitel 14.4.3 beschrieben, je Material in die Inertstoffdeponie oder in der Müllverbrennungsanlage. Der Transportweg für das End-of-life Szenario wird mit 50 km berücksichtigt. (Briem, et al., o.J.)

14.6 Wirkungsbilanz

Die Wirkbilanz hat die Aufgabe die Ressourcenverbräuche und Emissionen aus der Sachbilanz nach Ihren Umweltauswirkungen zu klassifizieren und anschließend zu charakterisieren. Klassifizieren bedeutet das Zuordnen der Sachbilanzergebnisse zu den einzelnen Wirkkategorien. Im Zuge der Charakterisierung werden diese dann mit Hilfe von Äquivalenzfaktoren gewichtet um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. (EN ISO 14040, 2006) Für die Darstellung der Ergebnisse können verschiedene Methoden gewählt werden, z.B. teilaggregierte, vollaggregierte oder schadensbasierende Methoden. Teilaggregierte Methoden stellen die Ergebnisse mit Hilfe einer Reihe von Wirkungsindikatoren dar. Diese sind voneinander unabhängig und werden nicht miteinander „verrechnet“, meist haben sie auch unterschiedliche Einheiten. Vollaggregierte Methoden „verrechnen“ die Ergebnisse so weit bis ein eindimensionales Ergebnis resultiert. Dieser Gewichtungsschritt basiert auf weiteren, oft subjektiven,

Faktoren. Da diese oft aus Befragungen oder politischen Zielsetzungen resultieren, ist dieser Schritt umstritten.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung darzustellen werden teilaggregierte Werte verschiedener Wirkungsindikatoren ausgewertet. Dafür wird aus bestehenden Methodenfamilien eine weit verbreitete Methode gewählt: CML2001 - Apr. 2013. Die Methode wurde in den Niederlanden entwickelt und ist nach dem wissenschaftlichen Institut benannt an dem sie entwickelt wurde. Die Methode ist wirkungsorientiert und nimmt keine Gewichtung vor, ihr räumlicher Gültigkeitsbereich ist Europa. (Guinée, 2002)

Die ausgewerteten und im Folgenden dargestellten Wirkungsindikatoren und Kennwerte sind:

Tabelle 14-6: Auflistung der betrachteten Wirkungsindikatoren und Kennwerte

Abkürzung	Benennung	Einheit
GWP	Treibhauspotential Betrachtungszeit 100 Jahre	kg _{CO2-Äqv.}
EP	Eutrophierungspotential	kg _{Phosphat-Äqv.}
AP	Versauerungspotential	kg _{SO2-Äqv.}
ODP	Ozonabbaupotential	kg _{R11-Äqv.}
POCP	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial	kg _{Ethen-Äqv.}
FAETP	Aquatisches Frischwasser Ökotoxizitätspotenzial	kg _{DCB-Äqv.}
PE n.E.	Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (oberer Heizwert)	MJ
PE E.	Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Ressourcen (oberer Heizwert)	MJ

Die Berechnung und erste Auswertung der Umweltauswirkungen erfolgt mit Hilfe der Software Gabi (Ganzheitliche Bilanzierung) (Thinkstep AG, 2015), verwendet werden die Prozessdaten der integrierten ecoinvent Datenbank (Ecoinvent, 2010). Die Ergebnisse werden für die gesamte Betrachtungszeit (20 Jahre) berechnet, dargestellt werden die Untersuchung der Einzelprozesse und die Vergleichswerte in Prozent.

14.6.1 Ergebnisse RaCiA Prozess

Die Untersuchung der Umweltbelastungen des RaCiA Prozess zeigt, dass die Herstellung mit den größten Umweltauswirkungen einhergeht (Abbildung 14-4). Die Gutschrift aus der Stromproduktion wird nicht in der Abbildung 14-4 dargestellt. Der nächstgrößere Anteil entfällt auf den Betrieb, dieser ist jedoch mit einen Anteil von rund 12 % (GWP 100) bzw. 15 % (PE n.E.) an den Gesamtbeiträgen weit abgeschlagen. Vergleichsweise vernachlässigbar sind die Anteile aus der Entsorgung und den Transport. Bei genauerer Betrachtung der Herstellung kann festgestellt werden, dass der Kondensator den bedeutendsten Anteil (45 % GWP100 bzw. 42 % PE n.E.) hat. Das ist auf den vergleichsweise hohen Materialbedarf dieses Bauteils zurückzuführen. Eine sehr untergeordnete Rolle spielt die Herstellung der Betriebsflüssigkeiten.

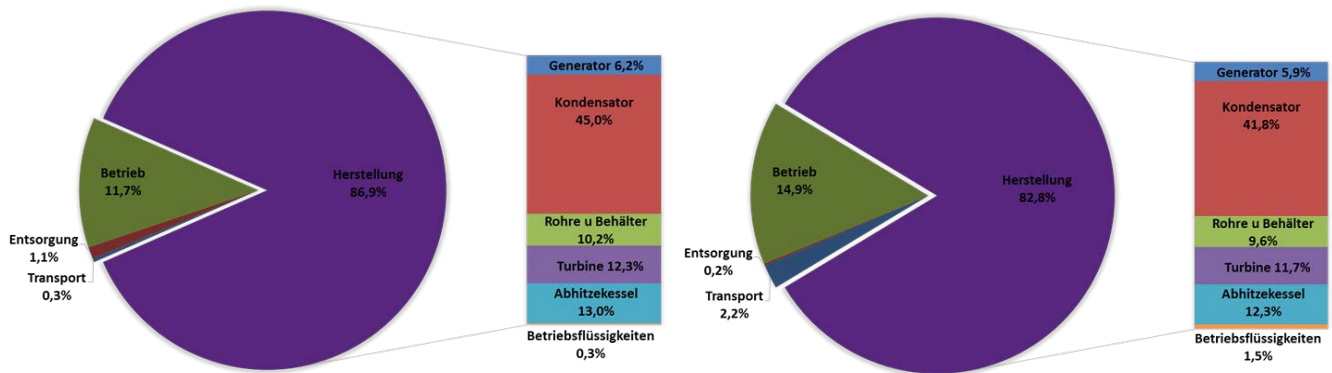


Abbildung 14-4: Ergebnisse GWP 100 (li.) und PE nicht erneuerbar (re.) für den RaCiA Prozess; Darstellung der %-Anteile aus den Belastungen über dem Lebenszyklus (somit ohne Stromproduktion)

14.6.2 Ergebnisse ORC- Prozess

Die Untersuchung der Umweltbelastungen des ORC Prozess zeigt ein ähnliches Bild wie das des RaCiA Prozesses. Auch hier hat die Herstellung die größten Anteil an den Umweltauswirkungen, mit über 80 % (GWP 100 und PE n.E.) an den Gesamtbelastungen (Abbildung 14-5). Da nur die Aufwendungen/ Belastungen dargestellt werden, ist die Gutschrift für die Stromproduktion nicht ersichtlich. Der Betrieb weist mit einem Anteil von 10 % (GWP 100) bzw. 12 % (PE n.E.) den nächstgrößeren Anteil auf. Im Fall des GWP 100 weist die Entsorgung einen merklich höheren Wert auf als im Indikator PE n.E. Das ist auf die Entsorgung des Thermoöls und des Arbeitsmediums zurückzuführen. Da es sich um Ölprodukte auf fossiler Basis handelt, hat dies bei der Verbrennung Einfluss auf das GWP 100. Der Einfluss des Transportes ist vernachlässigbar gering.

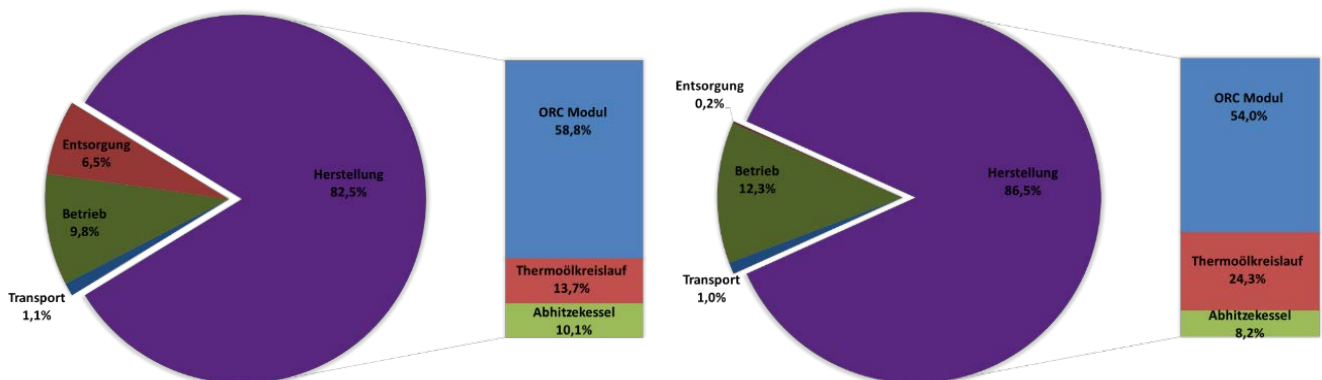


Abbildung 14-5: Ergebnisse GWP 100 (li.) und PE nicht erneuerbar (re.) für den ORC Prozess; Darstellung der %-Anteile aus den Belastungen über dem Lebenszyklus (somit ohne Stromproduktion)

14.6.3 Ergebnisse – Vergleich RaCiA Prozess zu ORC- Prozess

Die Abbildung 14-6 zeigt den Vergleich des Lebenszyklus der RaCiA Anlage zur ORC Anlage. Links wird die Summe von Herstellung, Betrieb und Entsorgung dem ORC Prozess, der 100 % gesetzt wird gegenübergestellt. Die rechte Seite der Abbildung 14-6 zeigt einen separaten Vergleich von Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Es werden nur die Belastungen, nicht die Stromgutschrift dargestellt. Unter die Belastungen fallen die Aufwendungen aus ökologischer Sicht für die Herstellung, die verschiedenen

Betriebsmittel und die Entsorgung. Bezogen zur ORC-Anlage (100 %) ist die RaCiA-Anlage mit geringeren Auswirkungen in den betrachteten Wirkindikatoren verbunden.

Gründe für die Einsparpotentiale verbunden mit dem RaCiA Prozess sind das im Vergleich geringere Gesamtgewicht, was einen Einfluss auf alle Lebenszyklusphasen hat, aber auch die Verwendung von Wasser als Betriebsmedium anstelle von Thermoöl und n-Pentan. Der Verbrauch an synthetischen Ölen und Ölprodukten hat vor allem einen Einfluss auf die Entsorgung, bei der Verbrennung dieser Betriebsstoffe wird fossiles CO₂ frei was sich in höheren Werten in der Wirkungskategorie GWP niederschlägt. Die großen Einsparungspotentiale im Vergleich zur ORC Anlage für die Wirkkategorien EP und FAETP sind auf den geringeren Kupfer- und Stahlmengen bei Herstellung der RaCiA Anlage zurückzuführen. Die Herstellung von Kupfer ist verbunden mit erhöhten EP, die Entsorgen von Kupfer mit FAETP.

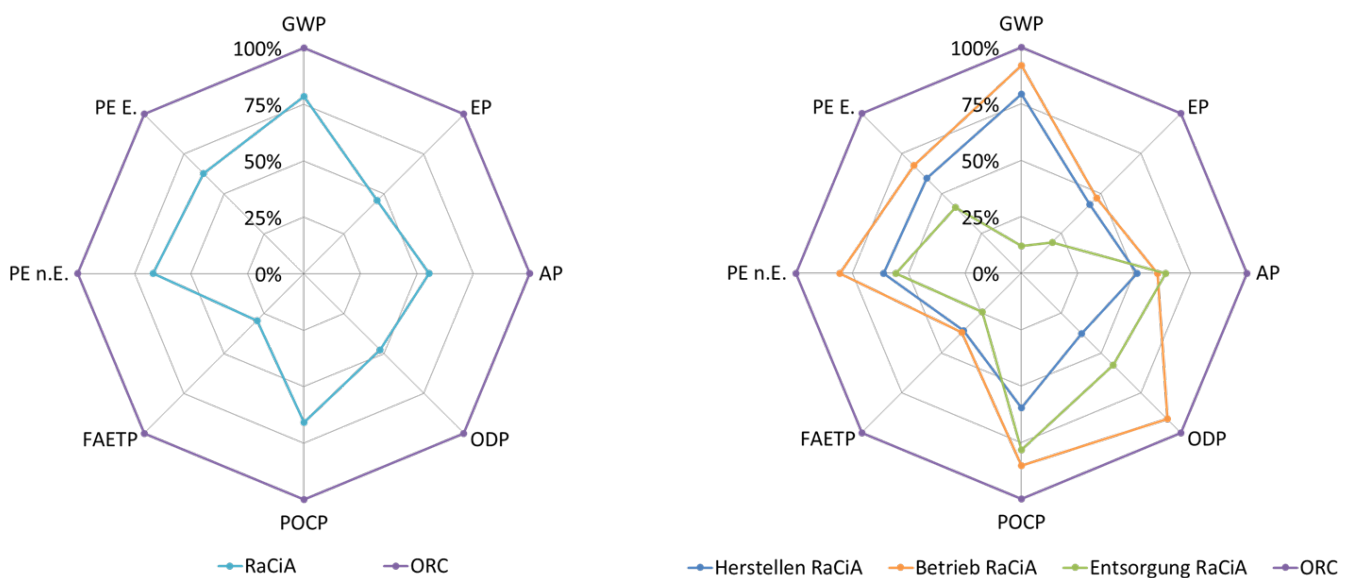


Abbildung 14-6: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage. Li. Summe von Herstellung, Betrieb (ohne Stromgutschrift) und Entsorgung. Re. separater Vergleich der einzelnen Phasen. ORC-Anlage = 100%; RaCiA-Anlage dazu in Bezug gesetzt

Die Abbildung 14-7 zeigt die Belastungen und die Gutschriften für die beiden Prozesse bei den Indikatoren Treibhauspotential (linke Seite) und Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (rechte Seite). Die Belastungen sind als positive Werte aufgetragen, die Gutschriften negativ. Die Werte sind auf die Gutschrift bezogen, die mit der vermiedenen Fremdstromproduktion aus dem ORC Prozess einhergehen. Die Darstellung zeigt, dass die Gutschrift aus der Substitution von Fremdstromproduktion die Belastungen deutlich überwiegt.

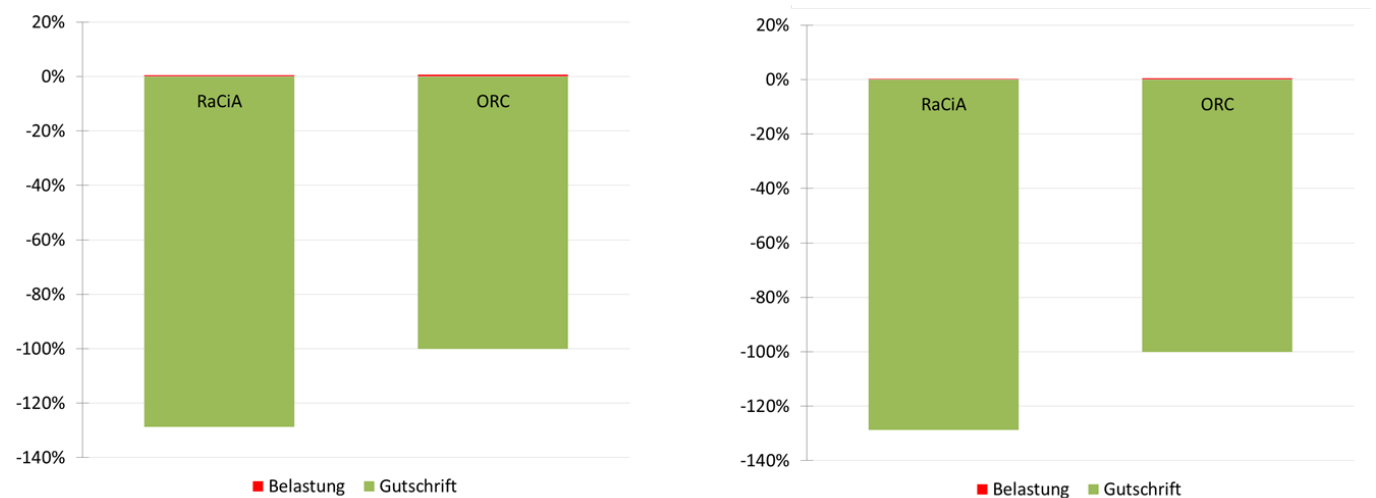


Abbildung 14-7: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage, separate Darstellung von Belastung und Gutschrift. Li. Treibhauspotential GWP 100. Re. Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (oberer Heizwert). Gutschrift ORC-Anlage = 100%

Das Gesamtergebnis setzt sich aus den Umweltauswirkungen der Herstellung, des Betriebs und der Entsorgung der Anlage zusammen. Für die produzierte Energie wird eine Gutschrift berücksichtigt. Da über 20 Jahre Energie erzeugt wird, hat diese Lebensphase den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die Abbildung 14-8 zeigt das Gesamtergebnis der RaCiA-Anlage in Bezug zur ORC-Anlage (100 %). Da mit dem RaCiA-Prozess mehr Energie über die Betrachtungszeit produziert werden kann, weist dieser höhere Gutschriften aus substituiert Fremdstromerzeugung auf und hat somit ein günstigeres Ergebnis bezogen auf die Umweltauswirkungen.

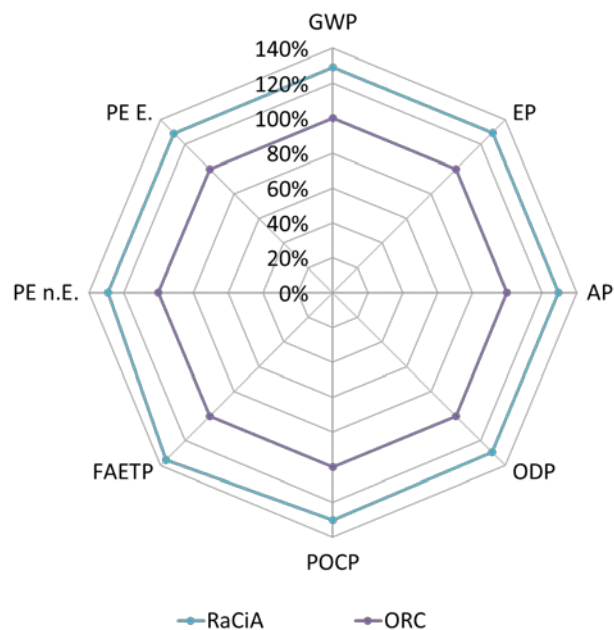


Abbildung 14-8: Höhe der Belastungen: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage ohne Berücksichtigung einer Gutschrift. ORC-Anlage = 100%; RaCiA Anlage dazu in Bezug gesetzt

14.7 Schlussfolgerungen

Die Datenerhebung basiert nur teilweise auf Herstellerangaben, es musste auf Literaturdaten zurückgegriffen werden, was einen Schwachpunkt in der Analyse darstellen könnte. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist dennoch kaum bis gar nicht beeinflusst, da die Energieproduktion und damit gewonnene Gutschriften aus vermiedener Fremdstromproduktion die Belastungen aus Herstellung, Betrieb und Entsorgung weit überwiegen. Empfehlungen für künftige Untersuchungen sind, die Analyse der Herstellungsphase mit umfangreicheren Herstellerangaben zu hinterlegen – vor allem bezüglich Materialmengen, wie Kupfer aber auch das Gesamtgewicht der Anlagen. Um eine allgemeinere Aussage treffen zu können muss der Einfluss des Arbeitsmediums genauer betrachtet werden, wär es z.B. auch denkbar nicht fossil basierte Ölprodukte anzuwenden.

Generell tragen die Umweltauswirkungen aus der Bereitstellung der Infrastruktur wenig zu den kumulierten Ergebnissen bei. Aufgrund dessen, dass mit dem RaCiA Prozess mehr Energie erzeugt wird, weniger Material benötigt wird und Wasser als Kreislaufmedium dient kann je Wirkkategorie ein Verbesserungspotential von 29 % bis zu 35 % erreicht werden.

15 Ökonomische Betrachtung

15.1 Ökonomische Betrachtung RaCiA Prozess

Die Stromgestehungskosten aus der Abwärmenutzung hängen in erster Linie von den spezifischen Anlagekosten der Abwärmenutzungsanlage ab. Genaue und belastbare Angaben für ein konkretes Projekt können nur unter Berücksichtigung der an dem jeweiligen Standort vorliegenden Randbedingungen erfolgen (Köhler, 2006), sodass man im vorliegenden Falle auf eine verallgemeinerte und vereinfachte Kostenkalkulation angewiesen ist. Die vorliegende Kostenermittlung geht allerdings über die reine Kostenabschätzung hinaus und basiert auf eingeholten Angeboten über die Hauptkomponenten. Zu diesem Zwecke wurden für die Hauptkomponenten Spezifikationen erstellt und diese einem Anbieterkreis vorgelegt; auf diesem Wege erhielt man auch ein Feedback bezüglich der Technologie und der Marktverfügbarkeit der in Rede stehenden Komponenten. Die Tabelle 15-1 zeigt die Lieferpreise der Hauptkomponenten; die weiter anfallenden Kosten bis zu einer Gesamtanlage wurden nach der gängigen Praxis der „rapid cost estimations“ (Perry, et al., 1984) durch prozentuale Zuschläge, bezogen auf die Summe der Komponentenkosten, siehe Tabelle 15-2, berücksichtigt.

Tabelle 15-1: Lieferpreise der Hauptkomponenten RaCiA

			Preise [€]	
Hauptkomponenten	Leistung	Einheit	absolut	spezifisch
Eco mit Vorverdampfung	9.841	kW _{th}	wie angeboten	
Flash-Tanks	3	Stück	wie angeboten	
Venturi-Kondensatableiter	9	Stück	wie angeboten	
Turbogruppe mit Generator	1.564	kW _{el}	wie angeboten	
Abdampfkondensator, inkl. TurbBypass	8.186	kW _{th}	wie angeboten	
Summe Hauptkomponenten			2.787.904	
Kostenfaktor			243,5%	
Direkte Anlagekosten	1.408	kW_{el,Netto}	6.788.546 [€]	4.821 [€/kW_{el,Netto}]

Tabelle 15-2: Kostenfaktoren

	Kostenfaktoren nach	
	Wood ¹ in %	Miller ¹ in %
Summe Hauptkomponenten	100	100
Montage	27	10
Stahlbau und Fundamente	13	3
Rohrleitungen, Armaturen	16	15
Isolation	0	5
Elektrik	9	8
MSR	13	4
Gebäude	18	18
Hilfsanlagen	40	55
Engineering	12	12
Faktor, auf Preise ab Werk	248	230
Faktor, auf Preise ab Werk, gewählt²	243,5	

¹ Kostenfaktoren nach Perry, et al. (1984)

² 3/4 nach Wood + 1/4 nach Miller

Die spezifischen Anlagekosten liegen demnach bei 4.821 €/kW_{el,Netto}.

Aus den Fachgesprächen mit den Anbieterkreis erhärtete sich die Einschätzung, dass viele Komponenten nicht der Routine entsprechen, also neuartig sind, sodass eine Verbilligung durch einen Lerneffekt zunächst ausbleibt. Von den Kosten dominiert erwartungsgemäß die Turbogruppe mit Generator (es war nicht möglich, ein Angebot über die Dampfturbine nach der innovativen Bauart zu bekommen); die Kosten des luftgekühlten Abdampfkondensators schlagen zu Buche, wobei bei dieser konventionellen Komponente inkrementale, aber keine fundamentale Kostenreduktionen durch die Optimierung des kalten Endes möglich erscheinen.

15.2 Ökonomische Betrachtung Vergleichsprozesse

15.2.1 ORC-Anlage in der Zementindustrie

Für den Bechmark-Prozess: ORC, für die Nutzung der Abwärme aus der Abluft von Klinkerkühlern (Heidelberger Zement AG, 2001) liegen die in der Tabelle 15-3 verwendeten Daten vor.

Tabelle 15-3: Investitionskosten ORC-Anlage nach Heidelberger Zement AG (2001)

	Wert	Einheit	Preisbasis	Referenz
Gesamtinvestition	7.880.000	DM	2000	(Heidelberger Zement AG, 2001)
Nettoleistung, wie angegeben	1.200	kW _{el,Netto}		(Heidelberger Zement AG, 2001)
Nettoleistung*	1.094	kW _{el,Netto}		
Spezifische Anlagekosten	7.203	DM/kW _{el,Netto}	2000	
Währungsumrechnung	1,95583	DM/€		
Spezifische Anlagekosten	3.683	€/kW _{el,Netto}	2000	
VerbraucherPreisIndexFaktor	1,342			
Spezifische Anlagekosten	4.942	€/kW_{el,Netto}	Mitte 2015	
*) nach Abzug der fiktiven Ventilatorleistung zum Kompensieren des Druckverlustes, s. Simulation				

Die spezifischen Anlagekosten liegen demnach bei 4.942 €/kW_{el,Netto} und sie liegen im Bereich der ermittelten spezifischen Anlagekosten des RaCiA-Prozesses.

15.2.2 Wärmerückgewinnungs-Anlage in der Zementindustrie

In einer neueren Veröffentlichung (IIP & IFC, 2014) werden spezifische Investitionskosten – ohne Angabe des involvierten Prozesses - in Abhängigkeit der elektrischen Leistung, angegeben, siehe Abbildung 15-1.

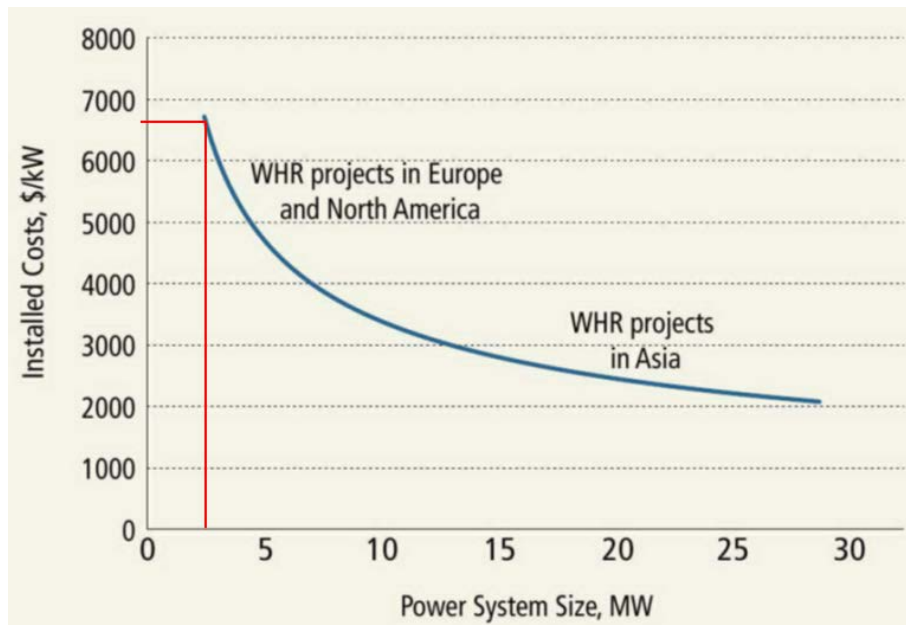


Abbildung 15-1: Investitionskosten Vergleichsprozess – Ausgeführte Anlagen in der Zementindustrie nach IIP & IFC (2014)

Nach Umrechnungen der Kosten ergeben sich spezifische Anlagekosten nach Tabelle 15-4.

Tabelle 15-4: Spezifische Anlagenkosten für Wärmerückgewinnungsanlagen in der Zementindustrie nach IIP & IFC (2014)

	Wert	Einheit	Preisbasis	Referenz
Nettoleistung	2.500	kW _{el,Netto}		(IIP & IFC, 2014)
Spezifische Anlagekosten	6.700	\$/kW _{el,Netto}	2014	(IIP & IFC, 2014)
Währungsumrechnung	0,9045	€/€		
Spezifische Anlagekosten	6.060	€/kW _{el,Netto}	2014	
Verbraucherpreisindex Faktor	1,015			
Spezifische Anlagekosten	6.151	€/kW_{el,Netto}	2015	

Bei einer elektrischen Leistung von 2500 kW_{el} liegen die spezifischen Anlagekosten mit 6.150 €/kW_{el,Netto} und diese sind um 28 % höhere als die ermittelten spezifischen Anlagekosten des RaCiA-Prozesses.

15.2.3 Geothermische Kraftwerke

Ein ökonomischer Vergleich des innovativen Dampfprozesses RaCiA für diesen Anwendungszweck stellt insofern eine Herausforderung dar, da dies streng genommen nur möglich ist, wenn exakt idente Auslegungsbedingungen vorliegen. Dies betrifft zum einem die elektrische Leistung, zum anderen das Temperaturniveau und die Art der Abwärmequelle und somit die Ausprägung des Abhitzeessels/Wärmetauschers sowie die Ausprägung des Kondensators (Luft-/Wassergekühlt). Ein weiteres Kriterium ist ob der Prozess mit oder ohne Wärmeauskopplung betrieben wird. Auf Grund der unterschiedlichen Ausprägung von Anlagen in der Geothermie kann nur versucht werden, die Errichtungskosten von Anlagen in vergleichbaren Leistungsklassen zu recherchieren und einen Vergleich mit spezifischen Kostenangaben anzustellen. In Köhler (2006) wurde ein solcher Vergleich auf Basis von Geothermie- Anlagen durchgeführt. Es wurden dabei die Investitionskosten von geothermischen Kraftwerken für unterschiedliche Thermalwassertemperaturen (100 °C, 150 °C und 200 °C) sowie verschiedene Kühlsysteme (Frischwasserkühlung und Luftkühlung) erhoben. Die Kosten wurden weiter für unterschiedliche Prozesse (ORC und Kalina Prozess) erhoben. In den Diagrammen (Abbildung 15-2) sind zusätzlich die spezifischen Investitionskosten für konkrete Anfragen für das geothermische Kraftwerk Husavik (Island), für zwei ORC- Prozesse und einen Kalina- Prozess, eingezeichnet.

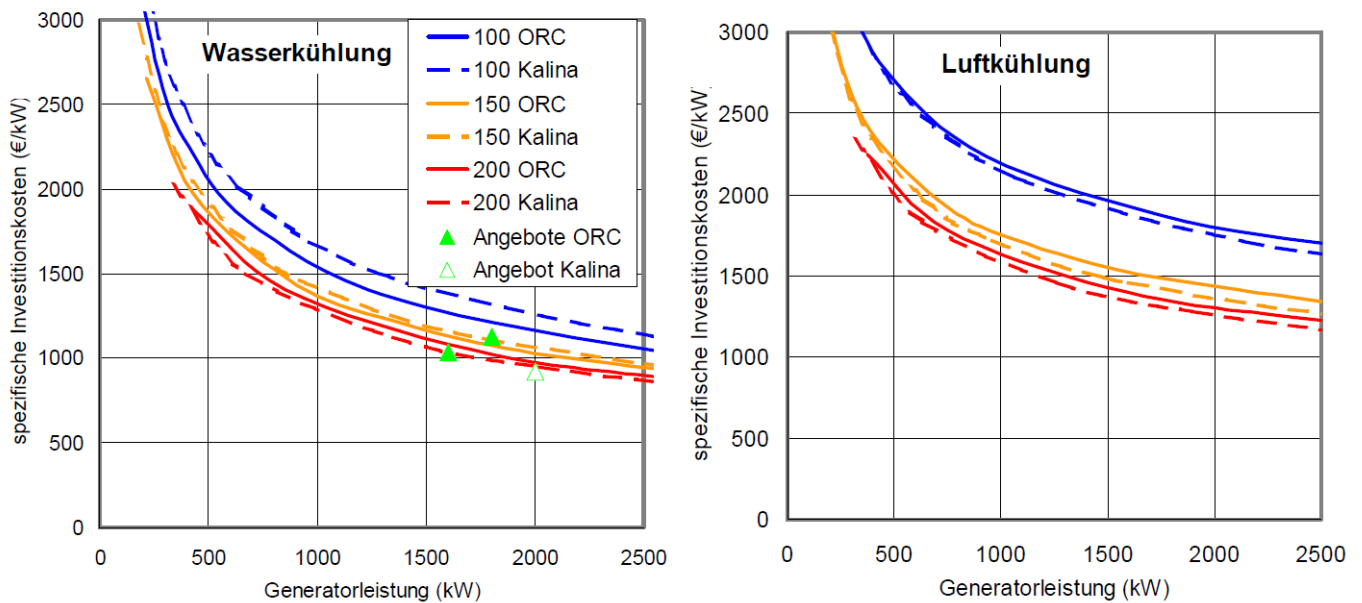


Abbildung 15-2: Spezifische Investitionskosten geothermischer Anlagen in Abhängigkeit der Generatorleistung für Verschiedene Arten der Kühlung sowie unterschiedliche Temperaturen (100°C, 150°C, 200°C) des Thermalwassers, Kostenbasis 2003 (Köhler, 2006)

Am deutlichsten erkennbar ist die Kostendegression der spezifischen Kosten mit steigender Generatorleistung. Dieser Trend trifft bei allen Prozessen, ob Luft- oder Wassergekühlt, bei unterschiedlichen Temperaturen der Thermalwasserquelle zu. Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen ist weiter erkennbar, dass die spezifischen Kosten bei Luftkühlung deutlich über den Kosten bei Wasserkühlung liegen; diese signifikant hohen Kosten der Luftkühlung mussten auch in der Analyse der Kosten des RaCiA-Prozesses festgestellt werden.

Da sich diese Kosten auf das Jahr 2003 beziehen, ist für die derzeitige Kostensituation der Verbraucherpreisindex (VPI) anzuwenden. Der VPI 2000 beträgt für das Jahr 2003 105,9 %, für das Jahr 2014 132,8 %, was einer Teuerungsrate in diesem Zeitraum vom 26,9 % entspricht (Statistik Austria, 2015). Abgesehen von den Einflussfaktoren (Generatorleistung; Wasserkühlung oder Luftkühlung) auf die spezifischen Investitionskosten ist ein direkter Vergleich mit den Daten gemäß Kapitel 15.1 sowie Kapitel 15.2 kaum zulässig.

16 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von industriellen Abwärmen zur Stromerzeugung ist ein Beitrag zur Treibhausgasreduktion wegen der Substitution von fossil gefeuerten Kraftwerken. Neben dem Dampfkreislauf wurden dazu Prozesse mit anderen Kreislauf-Medien und -Gemischen entwickelt; einigen davon entsprechen bereits dem Stand der Technik. Eine breite Umsetzung der industriellen Abwärmennutzung durch Verstromung ist allerdings noch nicht in Schwung gekommen.

Der vorgeschlagene Rankine-Cycle kehrt zum ökologisch unbedenklichen Kreislauf-Medium Wasserdampf zurück, ist eine Weiterentwicklung des Dampfkreislaufes, speziell für die Abwärmennutzung, fokussiert auf den Temperaturbereich von 140 bis 550 °C, und beinhaltet (patentierte) Innovationen der Schaltung und der Ausgestaltung der Komponenten.

Zum Zweck der Sondierung, inwieweit die vorgeschlagene Technologie bezüglich der Energie- und Kosteneffizienz Raum beanspruchen kann, wird ein Vergleich mit dem Organic-Rankine-Cycle (ORC) als Benchmark, welcher unter den marktverfügbaren Technologien derzeit die Führerschaft hinsichtlich der Effizienz hat, am Projektfall der Stromerzeugung aus der Abluft von Klinkerkühlern in der Zementindustrie durchgeführt.

Das Forschungsprojekt umfasst folgende Disziplinen:

1. die Ermittlung des Standes der Technik,
2. die Analyse der Anwendungsfelder, mit Hinblick auf die (Zement-) Industrie,
3. die Thermodynamik,
4. der Anlagenbau,
5. die ökologischen und ökonomischen Aspekte,
6. die Zukunftsperspektiven,

und nimmt verfahrenstechnische Patentrecherchen, Kreativtechniken, thermodynamische Simulationen sowie die Life Cycle Analysis zur Hilfe.

Folgende Ergebnisse konnten erzielt werden:

- a. Die ursprünglich eingeschätzte verbesserte Stromausbeutung gegenüber dem Benchmark-Prozess in der Höhe von 12 bis 15 % wird klar übertroffen und sie beträgt 29 %; dieser Vorsprung wird selbst bei einer zukünftigen Weiterentwicklung des ORC-Prozesses schwer einzuholen sein.
- b. Die vorgeschlagene Technologie zeigt weitere Vorteile bezüglich der Anpassungsfähigkeit an Abwärmequellen: vorteilhafte Lastanpassungsregime wurden erarbeitet; zusätzliche Abwärmen können eingebunden und Prozesswärmen können ausgekoppelt werden. Das hohe Replikationspotential gründet darauf, dass die vorgeschlagene Technologie mehrere Abwärmequellen (prozessinterner oder hybrider Herkunft) gleichzeitig nutzen kann.
- c. Ökologische Gesamtbetrachtung: auf Grund der verbesserten Stromausbeute ergeben sich auch höherer Gutschrift aus der Substitution von Fremdstromproduktion gegenüber dem Benchmark-Prozess.
- d. Die spezifischen Installationskosten liegen im Bereich anderer Systeme der Abwärmennutzung zur Stromerzeugung bzw. darunter.
- e. Naturgemäß liegt die Marktverfügbarkeit der innovativen Komponenten teilweise noch nicht vor.
- f. Die Erprobung der vorgeschlagenen Technologie in einem industriellen Forschungsprojekt, im industriellen Umfeld, steht noch bevor.

Wegen der bisher durchwegs positiven Ergebnisse könnte die vorgeschlagene Technologie, sofern weitergeführt, eine effiziente, kostengünstige und ökologisch vorteilhafte Alternative zu etablierten Technologien darstellen und zu einer Verbreitung der industriellen Abwärmenutzung durch Verstromung beitragen.

Anhang

A 1 Detaillierte Patentrecherche

A.1.1 Detaillierte Patentrecherche zu Projektbeginn

Die nachfolgende Patentrecherche gibt die patentrechtliche Situation zu Projektbeginn, mit Stand August 2014, wieder.

Veröffentlichte Patenschriften sind ein Beitrag zum Stand des Wissens, wenn auch nicht immer zum Stand der Technik im engeren Sinne. Wenn der Grundsatz eingehalten wird: zuerst offenlegen lassen, dann erst in Fachzeitschriften veröffentlichen, dann erhält man ggf. mit Patentrecherchen frühzeitiger Informationen. Für die Beurteilung, ob die eingereichte Verfahrensidee noch einen Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik aufweist, sind diese Recherchen essentiell, wenngleich sie keine absolute Sicherheit darstellen, ob nicht doch irgendwo ähnliches angemeldet wurde. Weiteres ist von Interesse, ob die Patentanmeldungen nur offengelegt oder schon erteilt oder die Schutzdauer bereits abgelaufen ist (spätestens nach 20 Jahren nach der Anmeldung oder durch Nichteinzahlung der Patentgebühren; bei Gebrauchsmustern beträgt die Schutzdauer nur 10 Jahre).

Es wurde eine Einsteigerrecherche bei der Datenbank des Deutschen Patentamtes durchgeführt, und zwar mit Hilfe von Suchkriterien; dabei geht es um die Darstellung des Gefundenen und weniger um die Einschätzung der Innovation oder der Sinnhaftigkeit.

Zu den folgenden Themen gab es folgende relevante Treffer:

- **Abwärmenutzung und Klinkerkühler**
 - Gebrauchsmuster DE29608816U1 (Babcock Lentjes Kraftwerkstechnik, 1996)
- **Abwärmenutzung und Stromerzeugung**
 - Kreisprozesse für (industrielle) Abwärmen und Geothermie:**
 - Offenlegung DE102009014036A1 (Gromoll, 2010); Gebrauchsmuster DE202011101243U1 (Robert Bosch GmbH, 2011); Internationale Anmeldung WO03/076781A1 (Dittmann, et al., 2002)
 - Kreisprozesse mit Energiespeichern:**
 - Offenlegung DE102006008600A1 (Nopper, 2007); Offenlegung DE3606681A1 (Brocks, et al., 1986); Patent AT511823B1 (Beckmann, 2012)
 - Erzeugung von mechanischer Energie aus Abwärmen von Maschinen:**
 - Offenlegung DE102010056299A1 (Herrmann, et al., 2012) ; Offenlegung DE102009050263A1 (Burk, et al., 2010) ; Patent DE102005048795B3 (Köhler, et al., 2006) ; Patent DE19650183C2 (Mueller, 2003) ; Offenlegung DE102004020753A1 (Gericke, et al., 2005)
- **Dampfmotor und Wassereinspritzung**
 - Offenlegung DE19528900A1 (Kurpiers, 1997) ; Offenlegung DE102006006129A1 (Piatkowski, 2007)
- **Personenbezogenes Suchkriterium**

Abgefragt wurde nach den Autoren: Michael Löffler, Michael Steffen und Karlheinz Schaber des Entwicklungsprojektes (Löffler, et al., 2010), mit einem relevanten Ergebnis:

 - Offenlegung DE102006012852A1

A.1.2 Detaillierte Patentrecherche zu Projektende

Die zum Anfang der Sondierung erarbeitete („damalige“) Patentrecherche endete mit dem Wissensstand Mitte August 2014 und es war vorgesehen, gegen Ende der Sondierung ein Update durchzuführen (ermittelter Stand: Anfang Oktober 2015). Eine Zusammenschrift der Patentrecherche und ihres Updates erfolgte nicht, um die Bewegung der Patentsituation nach dem Ablauf eines Jahres festzuhalten. Das Update wurde nach der gleichen Methodik wie damalige Patentrecherche durchgeführt.

Zu den folgenden Themen gab es folgende relevante Treffer:

- **Abwärmenutzung und Klinkerkühler**

Keine weiteren Treffer, verglichen mit der damaligen Patentrecherche.

- **Abwärmenutzung und Stromerzeugung**

Verfahren zum Betreiben und Regeln von Kreisprozesse für Abwärmen hinter Brennkraftmaschinen:

- Offenlegung DE 102014206033A1 (MTU Friedrichshafen GmbH, 2014) ;Offenlegung DE 102014206043A1 (MTU Friedrichshafen GmbH, 2014)

Leistungserhöhung aus der Abwärme von Gasturbinen:

- Patent DE102013202111B4 (Siemens Aktiengesellschaft, 2013) und die entsprechende Offenlegung DE102013202111A1 (Siemens Aktiengesellschaft, 2013)

- **Dampfmotor und Wassereinspritzung**

- Patent DE102011082620B4 (Kuhl, 2011)

- **Personenbezogenes Suchkriterium**

Abgefragt wurde: Michael Löffler, der Haupt-Autor des Entwicklungsprojektes (Löffler, et al., 2010),

- Die internationale Anmeldung WO 2007/115769A2 (Electricite de France, 2007), inkl. des Recherchen-Berichtes WO 2007/115769A3 (Electricite de France, 2007)

A 2 Literaturverzeichnis

- ABB. 2011.** Abwärme in saubere Energie umwandeln. *ZementKalkGips International*. 2011, 2-2011.
- ABB Motors and Generators. 2014.** *Low voltage process performance motors according to EU MEPS*. s.l. : ABB Motors and Generators, 2014. 9AKK105944 EN 11-2014.
- Abu-Halimeh, Shada Said Ata. 2004.** *Performance Analysis of Venturi Orifice Steam Trap*. Belfast : Queen's University Belfast, Faculty of Engineering, Chemical Engineering Department, 2004.
- ABV. 2012.** *Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Aufstellung und den Betrieb von Dampfkesseln (ABV)*. Wien : Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, 2012. Außerkrafttretensdatum am 02.05.2012 .
- ACG Ges.m.b.H. o.J..** *Dreiphasen Synchrongenerator ACG1250-4-400 - Technisches Datenblatt*. St. Florian : ACG Ges.m.b.H., o.J.
- Angelino, G. 1968.** Carbon dioxide condensation cycles for power production. *Journal of Engineering for Power*. 1968.
- Babcock Lentjes Kraftwerkstechnik. 1996.** *Anordnung zur Nutzung der Abwärme von Zementklinkerlinien*. DE29608816U1 Deutschland, 12. 09 1996.
- Bai, Lijun. 2012.** *Life Cycle Assessment of Electricity Generation from Low Temperature Waste Heat*. s.l. : Norwegian University of Science and Technology , 2012. Master Thesis.
- Bakas, Ioannis, et al. 2009.** *Ökobilanzieller Vergleich zweier Verwertungsalternativen für Altreifen*. Stoffliche Verwertung und Mitverbrennung im Zementofen. s.l. : Genan Business & Development A/S, 2009.
- Baumann, H. und Tillmann, A.-M. 2004.** *The Hitch Hiker's Guide to LCA – An orientation in life cycle assesment methodology and application*. Lund : Studentlitteratur AB, 2004.
- Beckmann, Georg. 2014.** *Mehrdruckdampfturbine zur Stromerzeugung*. AT513548B1 Österreich, 15. 01 2014.
- Beckmann, Georg und Fränkle, Gerhard. 2010.** *Verfahren und Einrichtung zur Nutzung der Abwärmen von Verbrennungskraftmaschinen mittels eines Dampfkreislaufes*. DE102010023174A1 Deutschland, 09. 06 2010.
- Beckmann, Georg und Gilli, Paul Viktor. 1984.** *Thermal Energy Storage - Basics, Design, Applications to Power Generation and Heat Supply*. Wien, New York : Springer Verlag, 1984. ISBN 978-3-211-81764-3.
- Beckmann, Georg. 2012.** *Verfahren und Einrichtung zur Erzeugung von Kälte und/oder Nutzwärme sowie mechanischer bzw. elektrischer Energie mittels eines Absorptionskreislaufes*. AT511823B1 Österreich, 03. 02 2012.
- . 2005.** *Verfahren und Einrichtung zur Erzeugung von Kraft und Wärme*. EP1584798B1 Europa, 31. 03 2005.
- Berger, Helmut, et al. o.J..** *Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie*. Wien : Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, o.J.
- Bösch, Michael Elias. 2010.** *Improving the environmental performance of cement production: a life cycle perspective*. Zürich : Dissertation ETH Zürich, 2010.
- Briem, Sebastian, et al. o.J..** *Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken*. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität

Stuttgart; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart; Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum; Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Deutschland : s.n., o.J.

Brocks, Klaus, Simon, Hans Gerry und Wedde, Eckart. 1986. *Verfahren und Vorrichtung zur Rückgewinnung von Abwärmeenergie.* DE3606681A1 Deutschland, 09. 10 1986.

Burk, Roland und Grünwald, Jürgen. 2010. *System mit einem Rankine-Kreislauf.* DE102009050263A1 Deutschland, 10. 06 2010.

Curran, Mary Ann. 2012. *Life Cycle Assessment Handbook A Guide for Environmentally Sustainable Products.* Cincinnati : John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 978-1-118-09972-8.

Deutsche Energie-Agentur GmbH. 2010. *Lufttechnik in Industrie und Gewerbe.* Berlin : s.n., 2010.

DGÜW-V. 2015. *Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über sicherheitstechnische Bestimmungen für Prüfungen bei der Inbetriebnahme und während des Betriebes von Druckgeräten (Druckgeräteüberwachungsverordnung - DGÜW-V).* Wien : Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2015. i.d.F.v. 04.11.2015.

DGVO. 2015. *Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über Druckgeräte (Druckgeräteverordnung - DSGVO).* Wien : Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft , 2015. i.d.F.v. 04.11.2015.

Dittmann, Rolf und Frutschi, Hans Ulrich. 2002. *Krafterzeugungsanlage.* WO03/076781A1 Weltweit, 14. 03 2002.

Dones, Roberto, et al. 2007. *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Ecoinvent report No. 5.* Dübendorf : Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

Dones, Roberto, et al. 2007. *Sachbilanzen von Energiesystemen, ecoinvent report No. 6.* Villigen und Uster : Paul Scherrer Institut, ESU-services Ltd., 2007.

EBE Engineering Ltd. 2011. *Weniger Dampf = geringere Energiekosten. CITplus - Das Praxismagazin für Verfahrens- und Chemieingenieure.* GIT Verlag GmbH & Co. KG Darmstadt, 2011, Bde. CITplus - Das Praxismagazin für Verfahrens- und Chemieingenieure, 04.

Ecoinvent. 2010. *Database Ecoinvent v2.2. Datenbank inkludiert im Software System GaBi 6.* St. Gallen : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010.

Electricite de France. 2007. *Kolbendampfmaschine mit interner Flash- Verdampfung des Arbeitsmediums (Patentschrift).* WO2007/115769A2 International, 04. 04 2007.

—. **2007.** *Kolbendampfmaschine mit interner Flash- Verdampfung des Arbeitsmediums (Recherchen Bericht).* WO2007/115769A3 International, 04. 04 2007.

EN 12952. *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten (Normenreihe).* s.l. : Europäisches Komitee für Normung.

EN ISO 14040. 2006. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO14040:2006).* Brüssel : Europäisches Komitee für Normung, 2006.

EN ISO 14044. 2006. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO14044:2006).* Brüssel : Europäisches Komitee für Normung, 2006.

Europäische Kommission. 2010. *Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen.* s.l. : Europäische Kommission, 24. 11 2010.

F-Chart Software. 2014. *EES - Engineering Equation Solver .* 2014. V9.765-3D (10/27/2014).

- Feiza, Roozbeh , et al. 2012.** *Utilizing LCA and key performance indicators to assess development within the cement industry -a case study of a cement production cluster in Germany.* Linköping, Sweden : Linköping University, Department of Management and Engineering, Division of Environmental Technology and Management, 2012.
- Firma A. 2015.** Angebot und technische Informationen über die Dampfturbinenanlage vom 19.03.2015. 2015.
- Firma B. 2015.** Angebot und technische Informationen über die Dampfturbinenanlage vom 15.08.2015. 2015.
- Firma C. 2015.** Angebot und technische Informationen über Komponenten für den RaCiA Dampfprozess vom 17.11.2015. 2015.
- Firma D. 2015.** Technische Informationen über ORC Anlagen vom 06.10.2015. 2015.
- Fischer, Johann. 2011.** Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles. *Energy.* 2011, Volume 36.
- Gardner, Tim. 2003.** Venturi- Kondensatableiter minimieren Dampfverluste. *Chemie Technik.* Hüthig GmbH, 2003, 11.
- Gericke, Bernd, Kuzmanovski, Pavle und Woelk, Gerd-Ulrich. 2005.** *Vorrichtung zur Ausnutzung der Abwärme von Verdichtern.* DE102004020753A1 Deutschland, 29. 13 2005.
- Goldstern, Walter. 1963.** *Dampfspeicheranlagen - Bau, Berechnung und Betrieb industrieller Wärmespeicher.* Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer Vergag, 1963.
- . **1933.** *Dampfspeicheranlagen - Elemente, Prinzip, Aufbau und Berechnung der Gefälle- und Gleichdruckspeicher sowie Anwendung und Wirtschaftlichkeit.* Berlin : Springer Verlag, 1933.
- Gromoll, Bernd. 2010.** *Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von Dampf mit hohem Wirkungsgrad.* DE102009014036A1 Deutschland, 23. 09 2010.
- Guinée, JB (Ed.). 2002.** *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards.* Dordrecht : Kulwer Academix Publishers, 2002.
- Hampel, Jens. 2008.** Getriebefreie Kleindampfturbine - Wirkungsgradsteigerung bei Teillast durch variable Drehzahl. *VGB PowerTech.* VGB PowerTech e.V., 2008, 04.
- Harder, Joachim. 2013.** Neueste Trends bei der Abwärmenutzung in Zementanlagen. *ZementKalkGips International.* Bauverlag BV GmbH, 2013, 6-2013.
- . **2011.** Neueste Trends bei Klinkerkühlern. *ZementKalkGips International.* Bauverlag BV GmbH, 2011, 3-2011.
- . **2011.** Trends in power generation from waste heat in cement plants. *ZementKalkGips International.* Bauverlag BV GmbH, 2011, 5-2011.
- Heberle, Florian und Brüggemann, Dieter. 2010.** Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering.* 2010, Volume 30.
- . **2012.** *Thermodynamische Grundlagen des ORC und aktuelle Forschungsaktivitäten.* Bayreuth : Jahrestagung des ORC-Fachverbandes e.V, 2012.
- Heck, Thomas.** Wärme-Kraft-Kopplung.
- . **2007.** *Wärme-Kraft-Kopplung, ecoinvent report No. 6-XIV.* Villigen : Paul Scherrer Institut , 2007.
- Heidelberger Zement AG. 2001.** *Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG.* Augsburg : Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, 2001.

- Hennauer, L und Schmitt, B. 1988.** Neue Entwicklungstendenzen bei kleinen Industriedampfturbinen. *BWK - Das Energie-Fachmagazin*. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 1988, 09.
- Herrmann, Konrad, et al. 2012.** *Abwärmenutzungsanlage*. DE102010056299A1 Deutschland, 28. 06 2012.
- Huenges, Ernst, et al. 2000.** *Geothermische Technologieentwicklung - geologische und energietechnische Ansatzpunkte*. Potsdam : GeoForschungsZentrum Potsdam, 2000.
- IEC/EN 60034-30-1. 2014.** *Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code)*. 2014.
- IIP & IFC. 2014.** *Waste Heat Recovery for the Cement Sector - Market and Supplier Analysis*. s.l. : Institute for Industrial Productivity (IIP) and International Finance Cooperation (IFC), 2014.
- Kaboldy, Péter. 2005.** Wikipedia. *Dampfturbine*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 22. 12 2005. [Zitat vom: 16. 12 2014.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampfturbine>.
- Kanyarusoke, Kant E und Noble-Jack, Ian. 2012.** Failed Steam Trap: First Step to Replacement. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2012, Bd. 03.
- Kauder, Knut und Kliem, Bernhard. 1998.** *Der Füllungsvorgang des Zweiphasen-Schraubenmotors*. Düsseldorf : VDI- Verlag, 1998.
- Klöpffer, Walter und Grahl, Birgit. 2009.** *Ökobilanz (LCA) - Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. ISBN: 978-3-527-32043-1.
- Köhler, Harald und Lorenz, Mathias. 2006.** *Kraft-Wärme-Kopplungsanlage*. DE102005048795B3 Deutschland, 28. 12 2006.
- Köhler, Silke. 2005.** *Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse - Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke*. Berlin : Technischen Universität Berlin (Dissertation), 2005.
- . **2006.** *Geothermisch angetriebene Dampfprozesse*. Potsdam : GeoForschungsZentrum Potsdam, 2006. Scientific Technical Report STR06/02.
- Kuhl, Norbert. 2011.** *Hubkolbendampfmaschine mit innerer Kühlung*. DE102011082620B4 Deutschland, 13. 09 2011.
- Kunicic, Tedy und Hartmann, Klaus. 2003.** *2-Phasen-Schraubenexpansionsmaschinen in großen Kälteanlagen*. Heidelberg : Hüthig GmbH, 2003.
- Kurpiers, Christian. 1997.** *Dampfmotor*. DE19528900A1 Deutschland, 24. 07 1997.
- Larsen, Ulrik, et al. 2013.** Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection. *Energy - The international Journal*. 2013, 55-2013.
- Leibinger, Helmut. 2014.** Persönliche Auskunft. *Projekttreffen RaCiA, Fa. Rohrdorfer Zement*. Gmunden, 05. 11 2014.
- Löffler, Michael. 2007.** *Wärmepumpen mit Phasenwechsel des Arbeitsmediums im Arbeitsraum einer Verdrängungsmaschine*. DE102006012852A1 Deutschland, 27. 09 2007.
- Löffler, Michael, Steffen, Michael und Schaber, Karlheinz. 2010.** *Umsetzung einer Kolbendampfmaschine mit interner Flashverdampfung*. Karlsruhe : Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2010.
- Macho, H, Kaltenbrunner, G und Beckmann, G. 2015.** *Sicherheitstechnisches Gespräch mit den Firmen TPA und TÜV am 04.11.2015*. Wien : s.n., 2015.

- MAN B&W Diesel A/S. 2005.** *Thermo Efficiency System (TES) for Reduction of Fuel Consumption and CO2 Emission.* Kopenhagen : MAN B&W Diesel A/S, 2005.
- Menny, Klaus. 2006.** *Strömungsmaschinen - Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen.* Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2006. ISBN-10 3-519-46317-2.
- Mergner, Hanna, et al. 2012.** *Geothermische Stromerzeugung: Bruchsal und Soultz-sous-Forêts. mining + geo.* VGE Verlag GmbH, 2012, 4-2012.
- Moser, Simon, Leitner, Karl-Heinz und Steinmüller, Horst. 2014.** *F&E Fahrplan - Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie.* Wien : Klima- und Energiefonds, 2014.
- MTU Friedrichshafen GmbH. 2014.** *Verfahren zum Betreiben eines Systems für einen thermodyn. Kreisprozess mit einem mehrfl. Verdampfer, Steuereinrichtung für ein System, System für einen thermodyn. Kreispr. mit einem mehrfl. Verdampfer, und Anordnung einer Brennkraftmaschine und Systems.* DE102014206043A1 Deutschland, 31. 03 2014.
- . **2014.** *Verfahren zum Betreiben eines Systems für einen thermodynamischen Kreisprozess, Steuereinrichtung für ein System für einen thermodynamischen Kreisprozess, System, und Anordnung aus einer Brennkraftmaschine und einem System.* DE102014206033A1 Deutschland, 31. 03 2014.
- Mueller, Herbert. 2003.** *Abwärmeverwertungsanlage für höher temperierte Abwärme.* DE19650183C2 Deutschland, 17. 07 2003.
- Noack, Karsten. 2008.** *Kreativitätstechniken - Schöpferisches Potenzial entwickeln und nutzen.* Berlin : Cornelsen Verlag, 2008. ISBN 358923427X.
- Nopper, Helmut. 2007.** *Effizientes Niedertemperatur-Energieerzeugungsverfahren mit integriertem Energiespeicher.* DE102006008600A1 Deutschland, 16. 08 2007.
- Ogriseck, Sirko. 2009.** *Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study. Applied Thermal Engineering.* 2009, 29-2009.
- Pehnt, Martin, et al. 2010.** *Die Nutzung industrieller Abwärme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung.* Heidelberg, Karlsruhe : s.n., 2010.
- Perry, Robert H. und Green, Donald W. 1984.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* Columbus : Mcgraw-Hill Education Ltd, 1984. ISBN-10: 0071422943.
- Piatkowski, Reimund. 2007.** *Verfahren zum Betreiben eines Schraubenmotors sowie Schraubenmotor.* DE102006006129A1 Deutschland, 23. 08 2007.
- Primas, Alex. 2007.** *Life Cycle Inventories of new CHP systems, ecoinvent report No. 20.* Dubendorf und Zürich : Basler & Hofmann, 2007.
- Recknagel, Hermann, Sprenger, Eberhard und Schramek, Ernst-Rudolf. 2010.** *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik.* München : Oldenbourg Industrieverlag, 2010.
- Robert Bosch GmbH. 2011.** *Abwärmenutzungsanlage.* DE202011101243U1 Deutschland, 30. 05 2011.
- Siemens Aktiengesellschaft. 2013.** *Abwärmenutzung und Leistungserhöhung von Gasturbinenanlagen (Offenlegungsschrift).* DE102013202111A1 Deutschland, 08. 02 2013.
- . **2013.** *Abwärmenutzung und Leistungserhöhung von Gasturbinenanlagen (Patentschrift).* DE102013202111B4 Deutschland, 08. 02 2013.
- SimTech GmbH. 2014.** *IPSEpro.* 2014. Version 5.1 und 6.0.
- Sorensen, B. 2011.** *Life Cycle Analyses of Energy Systems. From Methodology to Applications.* Cambridge : RSC Publishing, 2011.

- Spliethoff, Hartmut und Wieland, Christoph. 2012.** *Stand und Perspektiven geothermischer Stromerzeugung*. 8. Internationale Geothermiekonferenz Freiburg : Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München, 2012.
- Statistik Austria. 2015.** Verbraucherpreisindex. [Online] 2015. [Zitat vom: 18. 11 2015.] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/verbraucherpreisindex_vpi_hvpi/index.html.
- Strauß, Karl. 2009.** *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009. ISBN 978-3-642-01430-7.
- Suárez de la Fuente, Santiago und Greig, Alistair R. 2013.** *Making shipping greener: ORC modelling under realistic operative conditions*. Low Carbon Shipping Conference, London 2013 : UCL Energy Institute, 2013.
- Thermal Energy International Inc. o.J..** *Vor- und Nachteile von GEM-Kondensatableitern*. Ottawa : Thermal Energy International Inc., o.J.
- Thermal Energy System Specialists, LLC. 2012.** TRNSYS - Transient System Simulation Tool Basispaket, Referenzklimadatensatz Graz. 2012. Version 17.
- Thinkstep AG. 2015.** Software System GaBi 6 ("Ganzheitliche Bilanzierung"). LBP-GaBi. Leinfelden-Echterdingen : Universität Stuttgart, 2015.
- Tuschy, Ilja. 2001.** *Thermische Hybridkraftwerke zur Krafterzeugung aus Niedertemperaturwärme aus Niedertemperaturwärme*. Düsseldorf : VDI- Verlag, 2001.
- Umweltbundesamt. 2010.** *Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zement-, Kalk- und Magnesiumoxidindustrie*. Dessau : Umweltbundesamt, 2010.
- VÖZ. 2010.** *Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie*. Wien : Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, 2010.
- Walsh, Conor und Thornley, Patricia .** *The environmental impact and economic feasibility of introducing an Organic Rankine Cycle to recover low grade heat during the production of metallurgical coke*. Manchester, UK : Tyndall Centre for Climate Change Research, Pariser Building, The University of Manchester.
- Willinger, R und Pikbougoum, M. 2008.** *Effects of Partial Admission on the Flow Field in the Wheel Chamber of an Industrial Steam Turbine*. Lille, France : 6th European Conference on Turbomachinery – Fluid Dynamics and Thermodynamics, 2008.

A 3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Energiebilanz der Österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007 (Berger, et al., o.J.)	8
Abbildung 2-2: Brennstoffenergiebedarf in Abhängigkeit der Produktionskapazität (Berger, et al., o.J.) ...	9
Abbildung 2-3: Abwärme im Rohgas – Nutzung und verbleibendes Potenzial sowie Rohmaterialfeuchte (Berger, et al., o.J.)	10
Abbildung 2-4: Nutzpotenzial und Nutzung von Abwärme in der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)	10
Abbildung 2-5: Abwärme an den Standorten der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)	11
Abbildung 2-6: Potenzial ORC- Prozess in der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.) ..	11
Abbildung 3-1: Spannweiten der Prozessparameter für Wärmerückgewinnungsanlagen in der Zementindustrie (Harder, 2013)	14
Abbildung 3-2: Mögliche Anlagenleistungen in Abhängigkeit von Prozessparametern (Harder, 2011)....	15
Abbildung 3-3: Typische Anlagenleistungen in Abhängigkeit der Klinkerkapazität (Harder, 2011)	15
Abbildung 3-4: Marktanteile, Hersteller von Wärmerückgewinnungsanlagen (Harder, 2011)	16
Abbildung 3-5: Ausgeführte Wärmerückgewinnungsanlagen nach Ländern (Harder, 2013)	16
Abbildung 4-1: T/Q-Diagramm des Eindruck-Abhitzekeessels (MAN B&W Diesel A/S, 2005)	19
Abbildung 4-2: Herkömmlicher Eindruck-Dampfprozess zur Nutzung der Abgaswärme (MAN B&W Diesel A/S, 2005)	19
Abbildung 4-3: Zweidruck-Dampfprozess zur Verbesserung der Nutzung der Abgaswärme, aber mit einem höheren Aufwand gegenüber dem Eindruck-Dampfprozess gemäß der Abbildung 4-2 (MAN B&W Diesel A/S, 2005)	19
Abbildung 4-4: Abwärmenutzung: die im Elektrofilter entstaubte Klinkerkühler-Abluft wird im Abhitzekeessels mittels eines Thermoölkreislaufes von 275 °C auf 125 °C abgekühlt; die ausgekoppelte Wärme versorgt die ORC-Stromerzeugungsanlage (Heidelberger Zement AG, 2001)	20
Abbildung 4-5: Gesamtanordnung der Abwärmenutzung der ORC-Technologie (blau eingezeichnet), integriert in einem Zementwerk: diese besteht im Wesentlichen aus dem Thermoöl-Abhitzekeessels (links, hinten), dem Maschinenhaus (rechts, vorne) mit den darüber liegenden Luftkühlern und Ventilatoren zur Rückkühlung (ABB, 2011)	21
Abbildung 4-6: Zweistufige Expansion: Zwei hintereinander geschaltete ORC-Prozesse (HD/HT und ND/NT) (Heberle, et al., 2012); der Strom der der Wärmequelle fließt von rechts nach links. ...	22
Abbildung 4-7: Der KALINA-Prozess, die thermische Energiequelle beheizt den Evaporator, das entstehende Dampf-Wassergemisch wird im Separator getrennt, der NH ₃ -reiche Dampf verstromt und die H ₂ O-reiche Lösung wird dem Abdampf der Turbine beigemischt und dieses Gemisch wird	

im Kondensator niedergeschlagen; Rekuperatoren verbessern die Thermodynamik (Ogriseck, 2009)	24
Abbildung 4-8: Vergleich der Siedetemperatur von Wasser und unterschiedlichen Ammoniak-Wasser Gemischen bei 30bar. Der Clou des KALINA-Prozesses besteht darin, dass sich im $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Gemisch während der Enthalpiezufuhr im Evaporator der H_2O -Anteil in der Flüssigphase und damit die Siedetemperatur steigert (Ogriseck, 2009), wodurch sich der Kreisprozess gut an die Gegebenheiten der thermischen Energiequelle anpassen kann	24
Abbildung 4-9: Single Flash Prozess; die Zustände gemäß den Punkten 1 bis 6 werden im nachfolgenden T-s Diagramm erläutert (Huenges, et al., 2000)	26
Abbildung 4-10: Der Single Flash Prozess im T-s Diagramm (Huenges, et al., 2000): isenthalpe Entspannung des Fluids in der Drossel von 1 nach 2, Entspannung in der Turbine von 3 nach 4, Kondensation von 4 nach 5.	27
Abbildung 4-11: Double Flash Anlagen mit einem zusätzlichen Flash-Dampf (Huenges, et al., 2000)....	28
Abbildung 8-1: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung	38
Abbildung 8-2: Wirkungsgradabschätzungen der Technologien: ORC-Prozess, Eindruck-Dampfprozess, innovativer Zweidruck- und Dreidruck-Dampfprozess	39
Abbildung 8-3: Verfahrensflißbild des besteffizienten „fortschrittlich konventionellen“ Dreidruckprozesses; der elektrische Wirkungsgrad, bezogen auf die Enthalpie der Abwärmequelle, beträgt 9,29 % (Zielwert), Kondensatordruck 0,075 bar	42
Abbildung 8-4: Verfahrensflißbild des innovativen Dreidruckprozesses; der elektrische Wirkungsgrad, bezogen auf die Enthalpie der Abwärmequelle, beträgt 9,493 %, ist also um sogar um 2,2 rel. % besser als der Zielwert, Kondensatordruck 0,075 bar	44
Abbildung 8-5: Lastanpassung mit den bekannten Technologien: a. Festdruckbetrieb durch Drosselregelung, b. Festdruckbetrieb durch Düsengruppenregelung, c. Gleichdruck-Fahrweise	45
Abbildung 8-6: Relative Nettoleistung (Bezugspunkt ist die Nettoleistung der Gleitdruckfahrweise bei 275°C Abluft- Eintrittstemperatur) in Abhängigkeit der Ablufteintritts-Temperatur für die drosselgeregelte Festdruckfahrweise (a.), die Regelrad geregelte Festdruckfahrweise (b.) und der ungeregelte er Gleitdruckbetrieb (c.).....	46
Abbildung 8-7: Venturi-Kondensatableiter („steam trap“) (EBE Engineering Ltd., 2011)	48
Abbildung 8-8: Bewertung der unterschiedlichen Kondensatableitersysteme nach Kanyarusoke, et al. (2012)	49
Abbildung 8-9: LAVAL-Turbine mit einem Düsenkasten, teilbeaufschlagt (Kaboldy, 2005).....	50
Abbildung 8-10: Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit Verhältnis Umfangs-/Düsengeschwindigkeit (u/c) bei einem Schaufelwirkungsgrad von 80 %.....	51

Abbildung 8-11: Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit des isentropen Gefälles bei 80 % Schaufelwirkungsgrad und 400 m/s Umfangsgeschwindigkeit	51
Abbildung 8-12: Innovative Gleichdruckturbine mit getrennten Düsenkästen für die HD- & ND- Dämpfe und gemeinsamen Gleichdruckrad	52
Abbildung 8-13: Innovative Gleichdruckturbine mit gemeinsamen Gleichdruckrad – Düsenkästen und Geschwindigkeitsdreiecke für die HD- & ND- Dämpfe (Beckmann, 2014).....	52
Abbildung 8-14: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus (aus Abbildung 8-1), Prozessschema als aufgelöste Darstellung der drei Druckniveaus mit Beschriftung der Teilstränge (HD...Hochdruck, MD...Mitteldruck, ND...Niederdruck).....	55
Abbildung 8-15: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Darstellung im T-s Diagramm.....	55
Abbildung 8-16: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Darstellung im Q-T Diagramm.....	58
Abbildung 8-17: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Druckoptimierung Hochdruck- und Niederdruckstrang	58
Abbildung 8-18: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Druckoptimierung Mitteldruckstrang für optimierten Hochdruckstrang (11,0 bar) und Niederdruckstrang (0,7 bar)	59
Abbildung 8-19: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 8-6	60
Abbildung 9-1: Eindruck- Wasserdampfprozess zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung.....	61
Abbildung 9-2: Eindruck- Wasserdampfprozess (aus Abbildung 9-1), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte	63
Abbildung 9-3: Eindruck- Wasserdampfprozess, Druckoptimierung.....	64
Abbildung 9-4: Eindruck- Wasserdampfprozess, Darstellung im T-s Diagramm	64
Abbildung 9-5: Eindruck- Wasserdampfprozess, Darstellung im Q-T Diagramm	65
Abbildung 9-6: Eindruck- Wasserdampfprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 9-2	66
Abbildung 10-1: ORC- Kreisprozess zur Nutzung von Klinkerabluft im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG	68
Abbildung 10-2: ORC- Kreisprozess (aus Abbildung 10-1), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte	71
Abbildung 10-3: ORC- Kreisprozess, Darstellung im T-s Diagramm	71
Abbildung 10-4: ORC- Kreisprozess, Darstellung im Q-T Diagramm	72
Abbildung 10-5: ORC- Kreisprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 10-2.....	73
Abbildung 11-1: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Schaltbild und T-s Diagramm (Angelino, 1968)	74

Abbildung 11-2: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung...	75
Abbildung 11-3: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess (aus Abbildung 11-3), Prozessschema mit Beschriftung der Prozesspunkte	77
Abbildung 11-4: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Druckoptimierung	78
Abbildung 11-5: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Darstellung im T-s Diagramm.....	78
Abbildung 11-6: Überkritischer CO ₂ - Prozess, Darstellung im Q-T Diagramm	79
Abbildung 11-7: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Parametervariation Kühllufttemperatur, Basis Auslegungsfall aus Tabelle 11-2	80
Abbildung 14-1: 4 Phasen der Ökobilanz nach (EN ISO 14040, 2006)	87
Abbildung 14-2: Lebenszyklus-Phasen RaCiA Prozess; Darstellung der Inputs und Outputs und der Stromgutschriften.....	90
Abbildung 14-3: Lebenszyklus-Phasen ORC Prozess; Darstellung der Inputs und Outputs und der Stromgutschriften.....	93
Abbildung 14-4: Ergebnisse GWP 100 (li.) und PE nicht erneuerbar (re.) für den RaCiA Prozess; Darstellung der %-Anteile aus den Belastungen über dem Lebenszyklus (somit ohne Stromproduktion)	97
Abbildung 14-5: Ergebnisse GWP 100 (li.) und PE nicht erneuerbar (re.) für den ORC Prozess; Darstellung der %-Anteile aus den Belastungen über dem Lebenszyklus (somit ohne Stromproduktion)	97
Abbildung 14-6: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage. Li. Summe von Herstellung, Betrieb (ohne Stromgutschrift) und Entsorgung. Re. separater Vergleich der einzelnen Phasen. ORC-Anlage = 100%; RaCiA-Anlage dazu in Bezug gesetzt	98
Abbildung 14-7: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage, separate Darstellung von Belastung und Gutschrift. Li. Treibhauspotential GWP 100. Re. Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (oberer Heizwert). Gutschrift ORC-Anlage = 100%	99
Abbildung 14-8: Höhe der Belastungen: Vergleich RaCiA Anlage mit ORC Anlage ohne Berücksichtigung einer Gutschrift. ORC-Anlage = 100%; RaCiA Anlage dazu in Bezug gesetzt.....	99
Abbildung 15-1: Investitionskosten Vergleichsprozess – Ausgeführte Anlagen in der Zementindustrie nach IIP & IFC (2014).....	103
Abbildung 15-2: Spezifische Investitionskosten geothermischer Anlagen in Abhängigkeit der Generatorleistung für Verschiedene Arten der Kühlung sowie unterschiedliche Temperaturen (100°C, 150°C, 200°C) des Thermalwassers, Kostenbasis 2003 (Köhler, 2006).....	105

A 4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Branchenkenzzahlen der Österreichischen Zementindustrie (Berger, et al., o.J.)	9
Tabelle 3-1: Beispiele für industrielle Abwärmenutzung, nach (Pehnt, et al., 2010)	12
Tabelle 3-2: Erforderliche Wärmeenergie für Ofensysteme, nach Harder (2013)	13
Tabelle 4-1: Gegenüberstellung des Flash Prozesses und des innovativen Dampfkreislaufes	28
Tabelle 7-1: Auslegungsbedingungen Prozesssimulation	34
Tabelle 7-2: Wärmetauscher Randbedingungen/Auslegungsdaten	35
Tabelle 8-1: Morphologische Matrix für Dreidruck-Dampfprozesse – zunächst ohne Bewertung	40
Tabelle 8-2: Morphologische Matrix für konventionelle Dreidruck-Dampfprozesse; die angeführten Ausprägungen sind aber ebenfalls mit dem konventionellen Dreidruck-Dampfprozesse kombinierbar	41
Tabelle 8-3: Morphologische Matrix für innovativen Dreidruck-Dampfprozesse - grau hinterlegt; die angeführten Ausprägungen sind aber ebenfalls mit dem innovativen Dreidruck-Dampfprozesse kombinierbar	43
Tabelle 8-4: Die elektrische Minderleistung und der Auskopplungsfaktor bei einer Entnahme von Wärme in Form von Dampf und als sensible Wärme	47
Tabelle 8-5: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Beschreibung der Zustandsänderungen	57
Tabelle 8-6: Innovativer Dampfprozess mit drei Druckniveaus, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall	59
Tabelle 9-1: Eindruck- Wasserdampfprozess, Beschreibung der Zustandsänderung	63
Tabelle 9-2: Eindruck- Wasserdampfprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall	65
Tabelle 10-1: ORC- Kreisprozess, Beschreibung der Zustandsänderungen	72
Tabelle 10-2: ORC- Kreisprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall	73
Tabelle 11-1: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Beschreibung der Zustandsänderungen	77
Tabelle 11-2: Überkritischer CO ₂ -Kreisprozess, Ergebnisse der Prozesssimulation für den Auslegungsfall	79
Tabelle 12-1: Prozessvergleich, Ergebnisse der Prozesssimulation	81
Tabelle 12-2: Aufwendungen und die Anwendungsmöglichkeiten des innovativen Dreidruckprozesses sowie des unterkritischen ORC-Prozesses (Benchmark)	83
Tabelle 12-3: Weitere Entwicklungsmöglichkeiten der beiden Technologien: Innovativer Dampfprozess und ORC-Technologie	84
Tabelle 12-4: Prozessvergleich, jährlich produzierte Energiemenge	84

Tabelle 14-1: Komponenten mit Materialmenge RaCiA	91
Tabelle 14-2: Betriebsflüssigkeiten RaCiA Anlage.....	91
Tabelle 14-3: Transportdistanzen der Anlagenkomponenten (Briem, et al., o.J.)	92
Tabelle 14-4: Komponenten mit Materialmenge ORC.....	94
Tabelle 14-5: Betriebsflüssigkeiten ORC-Modul und Thermoölkreislauf	94
Tabelle 14-6: Auflistung der betrachteten Wirkungsindikatoren und Kennwerte.....	96
Tabelle 15-1: Lieferpreise der Hauptkomponenten RaCiA.....	101
Tabelle 15-2: Kostenfaktoren.....	102
Tabelle 15-3: Investitionskosten ORC-Anlage nach Heidelberger Zement AG (2001)	103
Tabelle 15-4: Spezifische Anlagenkosten für Wärmerückgewinnungsanlagen in der Zementindustrie nach IIP & IFC (2014).....	104

Kontaktdaten

Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Dr. Beckmann	Forschung Burgenland GmbH
Georg Beckmann	Jürgen Krail
Anton Baumgartner Str. 44/B7/016 A-1230 Wien	Steinamangerstraße 21 A-7423 Pinkafeld
Tel.: +43 (699) 19230160 Mail: georg.beckmann@chello.at	Tel.: +43 (5) 7705 - 5432 Mail: juergen.krail@forschung-burgenland.at Web: www.forschung-burgenland.at