

# Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung „SETE – Prozess“

Prof.(FH) DI DR. Richard Krottil, DI(FH) Christian Pinter

Fachhochschule Burgenland GmbH, Steinamangerstraße 21, A-7423 Pinkafeld,  
Tel.: +43(0)57705-4141, [richard.krottil@fh-burgenland.at](mailto:richard.krottil@fh-burgenland.at), [www.fh-burgenland.at](http://www.fh-burgenland.at)

Green Consulting e.U., Alois-Gossi-Gasse 11, A-7471 Rechnitz, Tel.: +43(0)660 4629563,  
[pinter@green-consulting.at](mailto:pinter@green-consulting.at), [www.green-consulting.at](http://www.green-consulting.at)

**Kurzfassung:** Auf dem Gebiet der gekoppelten Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung, auch bekannt unter Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK), sind unterschiedliche Technologien bekannt. Dabei werden vorwiegend die bereits etablierten Kraft-Wärme-Kopplungsprozesse (Dampfprozesse, Gasturbinenprozesse, Gas- und Dampfturbinenprozesse, Diesel- und Gasmotorenprozesse, alternative Prozesse wie z.B.: Dampfkolbenmotorprozess oder ORC-Prozess, innovative Prozesse, wie z.B.: Brennstoffzelle, Stirling-Motor oder Dampfschraubenmotor) in Verbindung mit einem Kälteprozess gesetzt. Bei den Kälteprozessen kommen insbesondere Wasser-LiBr-Absorptionskältemaschinen, das DEC-Verfahren (desiccative and evaporative cooling), Wasser-Silicagel-Adsorptionskältemaschine oder Wasser-Ammoniak-Absorptions-kältemaschinen (insbesondere für Temperaturen unter 0 °C) zum Einsatz. Bei diesen Technologien entstehen hohe kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundene Kosten.

Ausgehend von diesem Stand der Technik wird im vorliegenden Beitrag ein neuartiger Prozess zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung (SETE Prozess) auf Basis eines Patentes [1] vorgestellt, der mit verringerten Investitionskosten, höherer Effizienz und geringem anlagentechnischem Aufwand realisiert werden kann. Zudem sollen dessen Einsatzbereiche und Einsatzgebiete dargestellt werden. Außerdem werden die ersten Ergebnisse einer thermodynamischen Berechnung des Prozesses präsentiert.

**Keywords:** KWKK, SETE Prozess, Solar, Dampf

## 1 Der SETE - Prozess

### 1.1 Prinzip

Der SETE-Prozess (Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung) ist im Prinzip eine Erweiterung des klassischen Dampfstrahlkälteprozesses.

Aus P. Nores „Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen – Konzepte und Erfahrungen“, KI Luft- und Kältetechnik, 11/2006, sind ein Verfahren sowie eine Anlage zur solarthermischen Kälteerzeugung bekannt, bei denen Kältemittel eines Strahlverdichters durch Anbindung eines Sonnenkollektors verdampft und der Kältemitteldampf nach Verdichtung durch den Strahlverdichter unter Wärmeabgabe kondensiert wird. Bei diesem Verfahren wird ausschließlich Kälte zur Klimatisierung oder zur Kühlung im Temperaturbereich von -5 bis +20°C bei Leistungen von 10 bis 15000 kW mit Hilfe von Sonnenenergie bereitgestellt. [2]

Beim SETE-Prozess erfolgt die Bereitstellung der Antriebsenergie Dampf solarthermisch aus einem Parabolrinnenkollektor oder Reflektor im Zwangsumlauf- oder Naturumlaufprinzip. Der Frischdampf wird im Gegensatz zu P. Nores nicht nur einem Strahlverdichter zur Kälteproduktion zugeführt, sondern entsprechend der Regelung einer Frischdampfregelarmatur auch einem Dampfschraubenmotor zur Strombereitstellung zugeführt. Dies hat den Vorteil, dass je nach Kälte- oder Strombedarf die Frischdampfzufuhr für den Dampfschraubenmotor entsprechend einer Massenstromregelung bzw. für den Strahlverdichter entsprechend einer Bypassregelung erhöht oder reduziert werden kann, ohne dabei eine Auswirkung auf die Wärmeproduktion für die Heizung und für die Warmwasserbereitstellung zu haben.

Der neuartige KWKK-Prozess kann in einem reinen Strombetrieb oder Kältebetrieb mit oder ohne gekoppelte Wärmebereitstellung für Heiz- bzw. Warmwasser betrieben werden. Dazu sind als Anlagenkomponenten zumindest ein Dampfschraubenmotor, ein Strahlverdichter, ein Kondensator, ein Verdampfer und ein solarer Dampferzeuger (Parabolrinnenkollektor, Reflektor), der die Energie für die Erzeugung des Frischdampfes liefert, vorhanden. Der solare Dampferzeuger umfasst einen Parabolrinnenkollektor bzw. einen Reflektor mit Dampftrommel und ist zur direkten Verdampfung des Arbeitsmittels für den Dampfschraubenmotor und Strahlverdichter ausgebildet.

Die Bereitstellung von Strom mittels Dampfschraubenmotor hat den Vorteil, dass ein Schraubenmotor ein gutes Teillastverhalten hat und unempfindlich auf Änderung der Dampfqualität ist. Lastschwankungen zwischen 30 % und 100 % der elektrischen Nennleistung werden problemlos bewältigt [5]. Dies ist vor allem für einen kälte- bzw. wärmegeführten Betrieb der vorliegenden Anlage von Vorteil. Zudem ergibt sich bei Dampfschraubenmotoren ein geringer Wartungsaufwand.

Das Betriebsverhalten ist wesentlich unkomplizierter als bei anderen bekannten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen (KWKK-Anlagen), da je nach Einsatzgebiet für die Kühlung (Klima- bzw. Prozesskälte) mit Wasser bzw. Ammoniak ein Reinstoff als Arbeitsmittel verwendet wird. Aus diesem Grunde kann die vorliegende KWKK-Anlage ohne aufwendige Werkstoffe und Anlagenteile realisiert werden. Die Investitionskosten sind daher im Vergleich zu anderen KWKK-Anlagen gering, die Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung erfolgt rein durch eine einzige kompakte Anlage. Zudem stellen die verwendeten Arbeitsmitteln keine globale Umweltbelastung dar (ODP Ozonschicht-Abbaupotential = Null, GWP Treibhauspotential = Null). Das Verfahren bietet weiterhin ein sehr gutes dynamisches Betriebsverhalten mit kurzen Ansprechzeiten.

In der Anlage wird der Frischdampf - entsprechend des geforderten Temperaturniveaus im Heiz-/Warmwasserkreislauf - im Dampfschraubenmotor und/oder im Strahlverdichter nicht auf den herkömmlichen Kondensatordruck entspannt. Dies bewirkt eine Verschlechterung der Teilwirkungsgrade für die Strom- und Kältebereitstellung. Betrachtet man jedoch wie im Kapitel 2 vorliegenden Ausführungsbeispiel die angegebenen Parameter, so ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 125 % für die gekoppelte Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung, was eine höhere Effizienz als bei herkömmlichen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen ergibt. Gekoppelte Dampf- und Gasturbinenprozesse (GUD-Prozesse) - auf dem neuesten Stand der Technik - erreichen Gesamtwirkungsgrade von maximal 90 %.

Nach Nutzung der Kondensatorwärme für die Heizung und/oder für die Warmwasserbereitung, erfolgt je nach Bedarf im Kondensatorsammler eine Aufteilung des Kondensats. Ein Teil

wird über ein Drosselventil dem Verdampfer zur Kälteerzeugung und ein anderer Teil wird über die Speisewasserpumpe der Dampftrommel zur solaren Dampferzeugung zugeführt.

Im Gegensatz zu P. Nores wird auf einen internen Kältespeicher verzichtet. Je nach Schwankungen des Kälte- bzw. Heiz-/Warmwasserbedarfs ist ein Kältespeicher im Kaltwasserkreislauf bzw. ein Warmwasserspeicher im Heiz-/Warmwasserkreislauf vorzusehen um einen bedarfsgerechten kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten. Diese Speicher sind nicht Bestandteil der Anlage zur gekoppelten Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung.

Falls überschüssige Wärme am Kondensator anfällt, welche nicht mehr genutzt bzw. gespeichert werden kann, muss diese je nach Einsatzort entsprechend rückgekühlt werden.

Die Leistungsregelung der Anlage erfolgt ausschließlich über eine Frischdampfregelarmatur, welche die Menge der Frischdampfzufuhr für die Strombereitstellung bzw. Kältebereitstellung bestimmt, ohne dabei einen Einfluss auf die Wärmebereitstellung für Heizung bzw. Warmwasser zu haben.

Für den Fall, dass ein geringer Kältebedarf vorliegt (z.B.: Winterbetrieb), wird über die Frischdampfregelarmatur mehr Dampf dem Dampfschraubenmotor zugeführt und zur Strombereitstellung verwendet. Dieser Strom steht - je nach Nachfrage und Einspeisetarif - für den Eigenbedarf zur Verfügung oder kann in das öffentliche Netz eingespeist werden. Die dabei am Kondensator anfallende Wärme kann wiederum je nach Nachfrage von Warmwasser und Heizwasser zur Warmwasserbereitstellung und zur Beheizung des Gebäudes verwendet werden. Überschüssige Produktion von Warm- bzw. Heizwasser muss durch Pufferung im Heiz-/Warmwasserkreislauf abgefedert oder durch eine Rückkühlanlage rückgekühlt werden. Nach Kondensation des Arbeitsmittels muss bei einer entsprechend geringen Nachfrage an Kälte, das Drosselventil nach dem Kondensatorsammler entsprechend geregelt werden, sodass mehr Arbeitsmittel über die Speisewasserpumpe der solaren Dampferzeugung zugeführt wird.

Tritt der Fall ein, dass ein großer Kältebedarf vorliegt (z.B.: Sommerbetrieb), so muss mehr Frischdampfmenge über die Frischdampfregelarmatur dem Strahlverdichter zugeführt werden und das Drosselventil nach dem Kondensatorsammler muss so geregelt werden, dass dem Verdampfer ein Teilstrom zur Kaltwasserproduktion und der restliche Kondensatorstrom zur solaren Dampferzeugung zur Verfügung steht. Falls gleichzeitig auch Wärme zur Warmwasserbereitstellung zur Verfügung gestellt werden soll, so geschieht dies unabhängig von der Nachfrage an Kälte und Strom über den Kondensator.

Besteht ein gleichzeitiger Bedarf an Strom und Kälte, so ist dies über eine entsprechende Auslegung der Einzelkomponenten und Regelung der Frischdampfarmatur und des Drosselventils der Anlage zu bewerkstelligen.

Die Anlage kann auch im reinen Strombetrieb betrieben werden, in dem der gesamte Frischdampfstrom über die Frischdampfarmatur dem Dampfschraubenmotor zugeführt und die anfallende Wärme am Kondensator – ohne Nachfrage von Warmwasser und Heizwasser – über eine Rückkühleinheit an die Umgebung abgeführt wird.

Je nach solarem Angebot kann zu viel oder zu wenig Frischdampf für die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte zur Verfügung stehen. Sollte das solare Energieangebot größer als der Bedarf an Antriebsenergie sein, so kann der überschüssige Dampf über den Dampfschraubenmotor und/oder Strahlverdichter am Kondensator an die Umgebung abgegeben

werden. Zweckmäßiger ist es natürlich den Überschussdampf in Form von Wärmeenergie im Heiz-/ Warmwasserkreislauf bzw. in Form von Kälteenergie im Kaltwasserkreislauf zu puffern.

Bei solarem Unterangebot ist über eine entsprechende Regelung der Frischdampfarmatur und des Drosselorgans vor dem Verdampfer eine Aufteilung der Antriebsenergie für die Strom- und Kältebereitstellung durchzuführen. Zudem können Rückschlagklappen in der Saugleitung zwischen Strahlverdichter und Verdampfer vorgesehen werden, die sicherstellen, dass aus dem Kondensator keine Rückverdampfung in den Verdampfer erfolgen kann. Außerdem sind entsprechende Speicher im Heiz- / Warmwasserkreislauf bzw. im Kaltwasserkreislauf vorzusehen um dem geringem solaren Angebot gegenzusteuern.

## 1.2 Funktion

Die Abbildung 1.1 zeigt die Schaltung der gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellungsanlage, die in dieser Ausführung mit einem Dampfschraubenmotor (3), einem Strahlapparat (Verdichter) (4), einer indirekten Anbindung an den Kaltwasserkreislauf (27) und den Heiz-/Warmwasserkreislauf (28) realisiert wird.

Die Antriebsenergie Dampf wird solarthermisch bereitgestellt und besteht aus einem Parabolrinnenkollektor oder Reflektor (11), einer Dampftrommel (9), einer Verdampferpumpe (10) sowie aus dem Umlaufverdampferkreislauf (17).

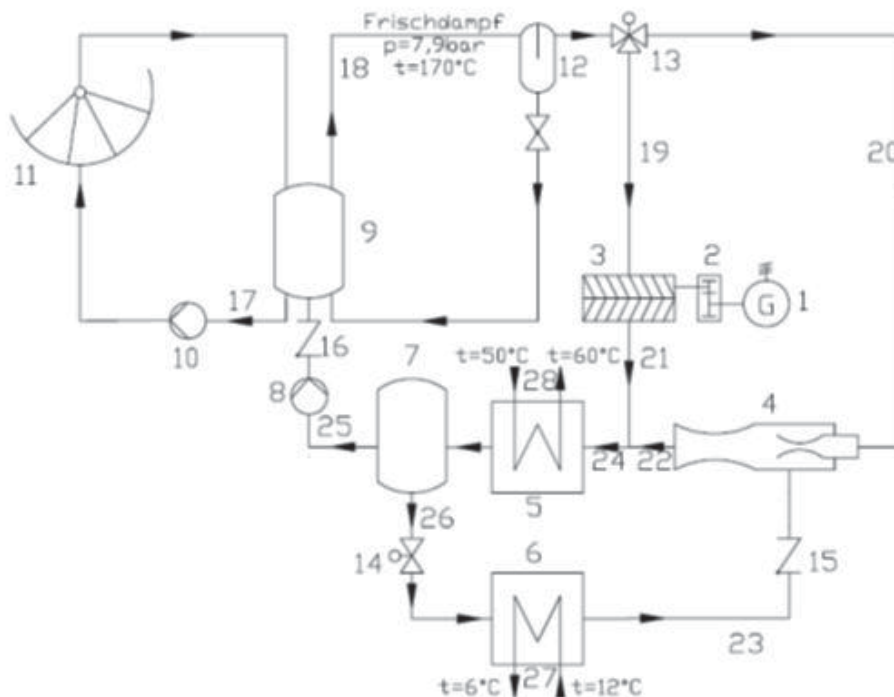
In der solaren Dampferzeugung (11) (Parabolrinnenkollektor, Reflektor) wird durch Sonneneinstrahlung direkt Wasserdampf aus dem mit der Verdampferpumpe (10) umgepumpten Wasser bereitgestellt. Dieser Wasserdampf gelangt in die Dampftrommel (9). Der im Dampferzeuger (11) erzeugte Dampf wird als Frischdampf (18) über einen Dampftrockner (12) und eine Frischdampfregelarmatur (13) zum einen einem Dampfschraubenmotor (3) zur Strombereitstellung und zum anderen als Treibdampf (20) einem Strahlapparat (Verdichter) (4) zur Wärme- und Kältebereitstellung zugeführt. Im vorliegenden Beispiel wird Frischdampf mit einem Druck von  $p = 7,9$  bar und einer Temperatur von  $t = 170$  °C bereitgestellt. Der Dampfschraubenmotor wandelt das Enthalpiegefälle in mechanische Energie um und überträgt diese über ein Umsetzungsgetriebe (2) an einem Asynchrongenerator (1). Nach der Entspannung des Frischdampfes (19), verlässt der Dampf als Abdampf (21) den Dampfschraubenmotor (3).

Der dem Strahlapparat (4) als Treibdampf (20) zugeführte Dampf saugt nach dem Prinzip des Impulsaustausches Saugdampf (23) aus dem Kaltwasser-Wärmetauscher (6) bei der erforderlichen Temperatur an und der entstehende Mischdampf (22) wird im Strahlapparat (4) auf das Kondensatordruckniveau verdichtet. Zwischen dem Kaltwasser-Wärmetauscher (6) und dem Strahlapparat (4) ist ein Rückschlagventil (15) eingebaut.

Der verdichtete Mischdampf (22) wird zusammen mit dem aus dem Dampfschraubenmotor (3) entspannten Abdampfstrom (21) als Kondensatorstrom (24) im Heiz-/Warmwasser Wärmetauscher (5) kondensiert, dabei wird die nutzbare Wärme an den Heiz-/Warmwasserkreislauf (28) abgegeben und dem Kondensatorsammler (7) zugeführt. Im vorliegenden Beispiel wird Heiz-/Warmwasser mit einer Vorlauftemperatur von 60 °C bzw. Rücklauftemperatur von 50 °C bereitgestellt.

Aus dem Kondensatorsammler (7) wird ein Teilstrom des Kondensats (25) über eine Speisewasserpumpe (8) der Dampftrommel (9) zurückgeführt, und steht somit der solaren Dampferzeugung wieder zur Verfügung. Bei der Zuführung des Kondensats (25) zur Dampftrommel (9) des solaren Dampferzeugers (11) ist auf eine kontinuierliche Regelung des Kondensatzulaufs (25) zu achten, da es sonst zu einer unregelmäßigen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung kommen kann. Dies kann über eine drehzahlgeregelte Speisewasserpumpe (8) in Verbindung mit einer Füllstandsmessung in der Dampftrommel (9) verhindert werden. Zwischen der Speisewasserpumpe (8) und der Dampftrommel (9) ist ein Rückschlagventil (16) eingebaut.

Der andere Teilstrom im Kondensatorzulauf Verdampfer (26) wird über ein geregeltes Drosselventil (14) dem Kaltwasser-Wärmetauscher (6) zugeführt wo er durch Entzug der Wärme aus dem Kaltwasserkreislauf (27) verdampft und als Saugdampfstrom (23) dem Strahlapparat (Verdichter) (4) zur Verfügung steht. Im vorliegenden Beispiel wird Kaltwasser mit einer Vorlauftemperatur von 6 °C bzw. Rücklauftemperatur von 12 °C bereitgestellt.



**Abbildung 1.1:** Schaltung des SETE-Prozesses [1]

Legende zur Abbildung 1.1:

- |    |   |
|----|---|
| 1  | Asynchrongenerator  |
| 2  | Umsetzungsgetriebe  |
| 3  | Dampfschraubenmotor                                       |
| 4  | Strahlapparat (Verdichter)                                |
| 5  | Heiz-/Warmwasser-Wärmetauscher (Kühlwasser)               |
| 6  | Kaltwasser-Wärmetauscher                                  |
| 7  | Kondensatorsammler  |
| 8  | Speisewasserpumpe   |
| 9  | Dampftrommel  |
| 10 | Verdampferpumpe   |
| 11 | Solare Dampferzeugung (Parabolrinnenkollektor, Reflektor) |
| 12 | Dampftrockner   |
| 13 | Frischdampfregelarmatur                                   |



14	Drosselventil
15	Rückschlagventil (Rückschlagverhinderer)
16	Rückschlagventil (Rückschlagverhinderer)
17	Umlaufverdampferkreislauf
18	Frischdampfstrom
19	Frischdampfeintritt
20	Treibdampf
21	Abdampfaustritt
22	Mischdampf
23	Saugdampfstrom
24	Kondensatorstrom
25	Kondensatorzulauf Speisewasser
26	Kondensatorzulauf Verdampfer
27	Kaltwasserkreislauf
28	Heiz- / Warmwasserkreislauf

Auf Grund des hohen Temperaturniveaus im Heiz-/Warmwasserkreislauf (28) kommt es zu einer Verschlechterung der Teilwirkungsgrade für die Strom- und Kältebereitstellung, jedoch ergibt sich im vorliegenden Ausführungsbeispiel mit den angegebenen Parametern ein Gesamtwirkungsgrad von 125 % für die gekoppelte solarthermische Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung und somit eine höhere Effizienz als bei herkömmlichen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen.

Die Anlage kann durch die Regelung der Frischdampfregelarmatur (13) auch in einem reinem Strombetrieb oder Kältebetrieb mit oder ohne gekoppelte Wärmebereitstellung für Heiz- bzw. Warmwasser betrieben werden.

Je nach Wärme- bzw. Kältebedarf des zu versorgenden Objektes ist ein Kältespeicher im Kaltwasserkreislauf (27) bzw. ein Warmwasserspeicher im Heiz-/Warmwasserkreislauf (28) vorzusehen um eine kontinuierliche Energiebereitstellung zu gewährleisten. Diese Speicher sind nicht Bestandteil der Anlage zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung.

Die Strombereitstellung im Asynchrongenerator (1) dient zur Abdeckung des Eigenbedarfs für die Hilfsenergien der ausgeführten Anlage (Speisewasserpumpe (8), Verdampferpumpe (10), Regelung, Pumpen im Heiz-/Warmwasserkreislauf (28) und Kaltwasserkreislauf (27) und Ventilatoren für die eventuelle Rückkühlung der überschüssige Wärme am Heiz-/Warmwasser-Wärmetauscher (5)) sowie für die Versorgung eines Objektes und/oder zur Einspeisung in das öffentliche Stromnetz.

### 1.3 Anwendung

In der obigen Ausführung des SETE-Prozesses wird der Frischdampf solarthermisch bereitgestellt. Dieser kann auch von einer anderen Wärmequelle, zum Beispiel Abdampf oder Dampf eines Biomasseheizwerks bereitgestellt werden. Daher ergibt sich ein breites Anwendungsgebiet für den neuartigen SETE-Prozess.

Ein Einsatzgebiet wäre die Effizienzsteigerung von bestehenden Biomasseheizwerken (vor allem im ländlichen Raum), insbesondere in der Sommerperiode, wo kein Heizwärmebedarf und geringer Warmwasserbedarf anfällt, durch die Einbindung des SETE-Prozesses in die bestehende Anlage zu einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage (KWKK-Anlage). Darüber hinaus soll den Anlagenbetreibern auch das Geschäftsfeld „Kälte“ geöffnet werden. Durch Skalierung der Anlagenkomponenten steht somit eine KWKK – Erweiterungseinheit für einen

relativ großen Leistungsbereich zur Verfügung, der von Biomasseanlagen im Privatbereich bis zu größeren Nahwärmesystemen reicht.

Der SETE-Prozess stellt eine dezentrale kompakte Energiebereitstellungsanlage dar, die eine Versorgung eines Gebäudes mit Strom, Wärme zur Warmwasserbereitung, Wärme zur Beheizung, Kälte zur Klimatisierung bzw. alternativ mit Prozesskälte unterhalb von 0 °C sicherstellt.

Je nach Art der Gebäudenutzung können folgende Einsatzgebiete genannt werden:

- Mehrfamilienhäuser
- Hotels
- Thermen und Hallenbäder
- Kleingewerbe
- Industrie
- Schulen
- Verwaltungsgebäude
- Mikronetze für Reihenhaussiedlungen
- Krankenhäuser usw.

Zudem besteht auch die Möglichkeit den neuartigen Prozess als Containerlösung für den mobilen Hilfs- und Katastropheneinsatz oder für den Tourismus in Gebieten ohne Infrastruktur (Inseln, Gebirge, ...) einzusetzen.

Die klassischen Einsatzgebiete des solarthermisch betriebenen SETE-Prozesses erstrecken sich von Europa über Asien bis Afrika, bzw. auf alle weiteren Regionen die ausreichend Sonnenstunden aufweisen. Das heißt im Prinzip all jene Gebiete die derzeit durch die solarthermischen Anlagen bzw. Photovoltaikanlagen erobert werden.

Zudem zeichnet sich der SETE-Prozess mit folgenden Eigenschaften aus:

- Geringer anlagentechnischer Aufwand
- Einfache Prozessführung
- Variabler Leistungsbereich (Strom, Wärme, Kälte)
- Geringer Platzbedarfs/Gewicht
- Kombinationsmöglichkeiten/Variantenvielfalt
- Vorteile gegenüber Kombianlagen (BHKW + Sorptionsanlagen)
  - Reduktion der Investitionskosten
  - Einsparung an Antriebsenergie
  - Wärme (Dampf) als Antriebsenergie
- Umweltfreundliche Arbeitsmedien (Wasser bzw. Ammoniak)

## 2 Thermodynamische Berechnung

Nachfolgend werden die Ergebnisse einer thermodynamischen Betrachtung des SETE-Prozesses für einen Nennbetriebspunkt auf Basis eines mit der Software Engineering Equation Solver (EES) [3] erstellten Modells dargestellt.

### 2.1 Modell

Die Grundfunktion dieses Programms besteht im Lösen von Gleichungen. Zudem sind in der Software thermodynamische Stoffdaten verschiedener Substanzen hinterlegt. Diese Built-in Functions können über einfache Befehle im Equations-Window aufgerufen und zur weiteren Berechnung verwendet werden. Im Diagram-Window kann eine Berechnung bzw. ein Prozess auch grafisch dargestellt werden, wobei die Variablen im Diagram-Window eingegeben und die davon abhängigen Ergebnisse sofort ersichtlich gemacht werden können. Die Berechnung wird im Diagram-Window über den Calculate-Button gestartet. In Abbildung 2.1 ist das Modell des SETE-Prozesses im Diagram-Window dargestellt.

In diesem Modell wird die Dampferzeugung als äußere Wärmezufuhr, auf Grund unterschiedlicher eventueller verfügbarer Wärmequellen, berücksichtigt. Zudem werden die einzelnen Komponenten als adiabat betrachtet. Die Reibungsverluste des Dampfschraubensmotors, des Strahlapparates und der Speisepumpen werden durch Wirkungsgrade aus der Literatur berücksichtigt. Strömungsverluste in den Wärmeübertragern und Rohrleitungen bleiben außer Acht.

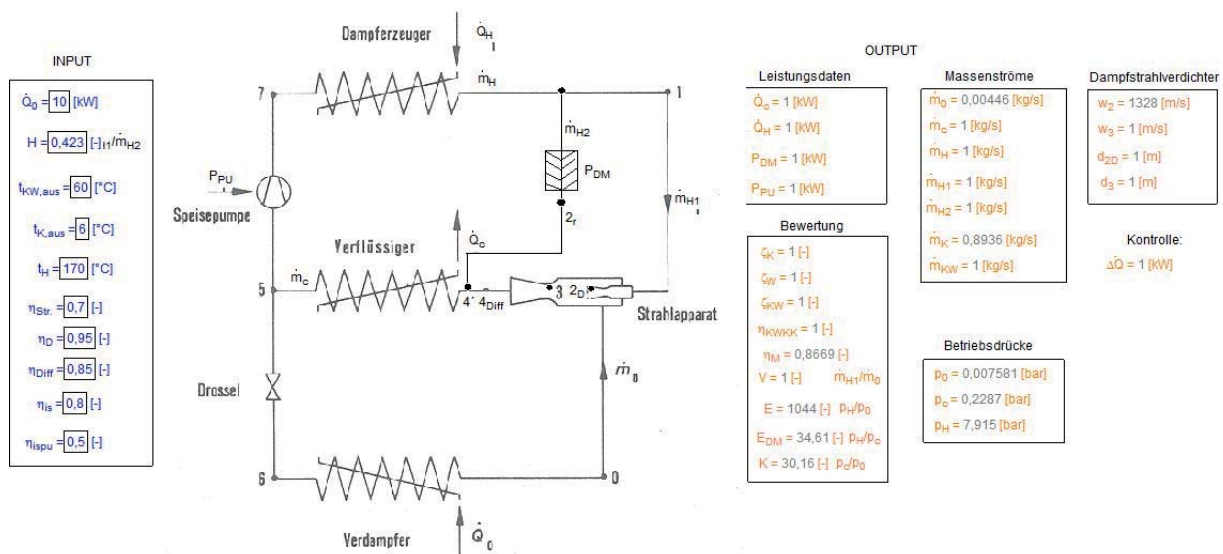


Abbildung 2.1: Modell des SETE-Prozesses im EES

### 2.2 Randbedingungen

Für die thermodynamische Berechnung eines Nennbetriebspunktes des SETE-Prozesses werden die in der Tabelle 2.1 angeführten Randbedingungen festgelegt.

Mit den in der Tabelle 2.1 angeführten Randbedingungen wird mit entsprechenden Energie- und Massenbilanzen im erstellten EES-Modell eine thermodynamische Berechnung durchgeführt.



**Tabelle 2.1:** Randbedingungen für die thermodynamische Berechnung des SETE-Prozesses

	Bezeichnung	Wert	Anmerkung/Quelle
<b>Leistungsgrößen [kW]</b>			
Kälteleistung	$\dot{Q}_0$	10	Festlegung
Elektrische Leistung	$P_{DM}$	10	Festlegung
<b>Temperaturen [°C]</b>			
Kaltwasseraustrittstemperatur	$t_{K,aus}$	6	Festlegung
Kühlwasseraustrittstemperatur	$t_{KW,aus}$	60	Festlegung
Antriebstemperatur	$t_H$	170	Festlegung
<b>Wirkungsgrade [-]</b>			
Gütegrad des Strahlapparates	$\eta_{Str.}$	0,7	[2]
Wirkungsgrad der Düse (Strahlapparates)	$\eta_D$	0,95	[4]
Wirkungsgrad des Diffusors (Strahlapparat)	$\eta_{Diff}$	0,85	[4]
Isentroper Wirkungsgrad des Dampfschraubenmotors	$\eta_{is}$	0,8	[5]
Isentroper Wirkungsgrad der Speisewasserpumpe	$\eta_{ispu}$	0,5	[6]

### 2.3 Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse der thermodynamischen Betrachtung sind - mit den oben festgelegten Randbedingungen - aus Tabelle 2.2 zu entnehmen.

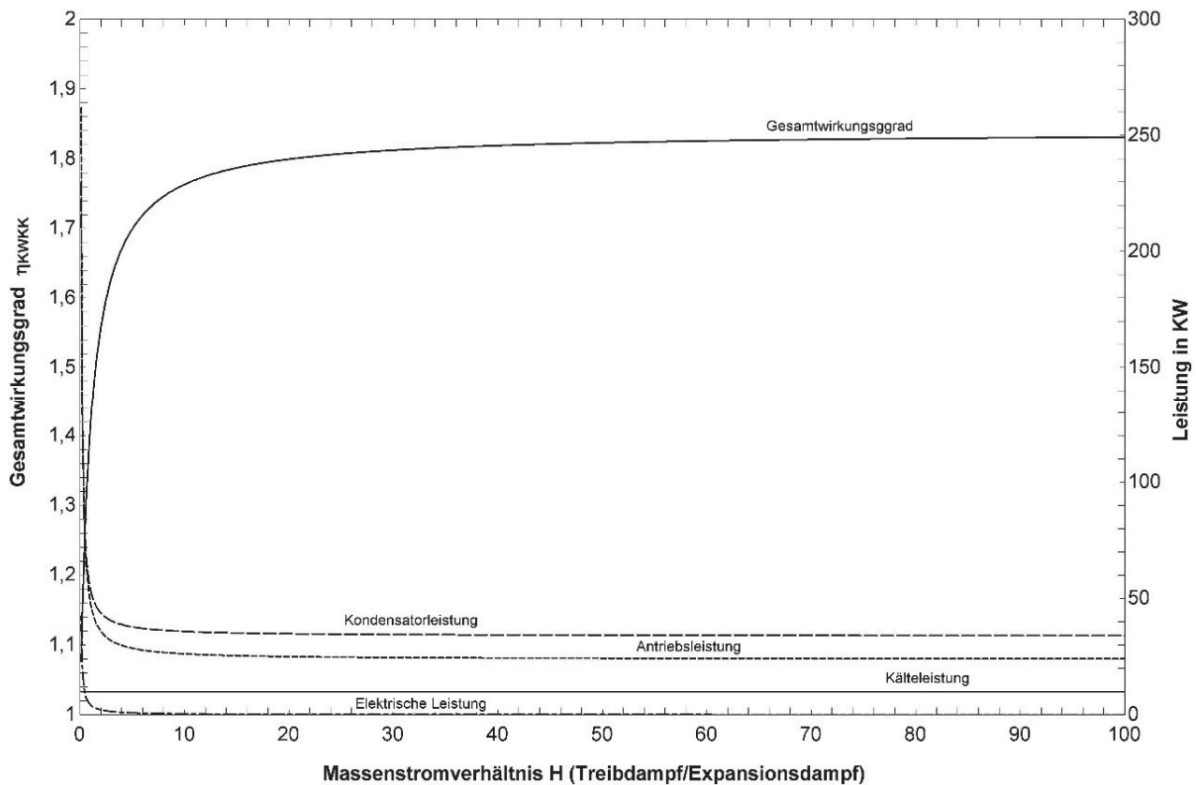
Mit den vorliegenden Leistungsgrößen (siehe Tabelle 2.1 und Tabelle. 2.2) ergibt sich für den SETE-Prozess ein Gesamtwirkungsgrad, der nach Gleichung 2.1 definiert ist, von 125 %.

$$\eta_{KWKK} = \frac{\dot{Q}_0 + \dot{Q}_C + P_{DM} - P_{PU}}{\dot{Q}_H} \quad (2.1)$$

**Tabelle 2.2:** Ergebnisse der thermodynamischen Berechnung des SETE-Prozesses

	Bezeichnung	Wert
<b>Leistungsgrößen [kW]</b>		
Kondensatorleistung	$\dot{Q}_C$	80,15
Antriebsleistung	$\dot{Q}_H$	80,10
Pumpleistung	$P_{PU}$	0,05
<b>Massenströme [kg/s]</b>		
Saugdampfmassenstrom (Kältemassenstrom)	$\dot{m}_0$	0,00446
Treibdampfmassenstrom	$\dot{m}_{H1}$	0,009512
Expansionsdampfmassenstrom	$\dot{m}_{H2}$	0,02249
Massenstromverhältnis Treibdampf/Expansionsdampf	H	0,423

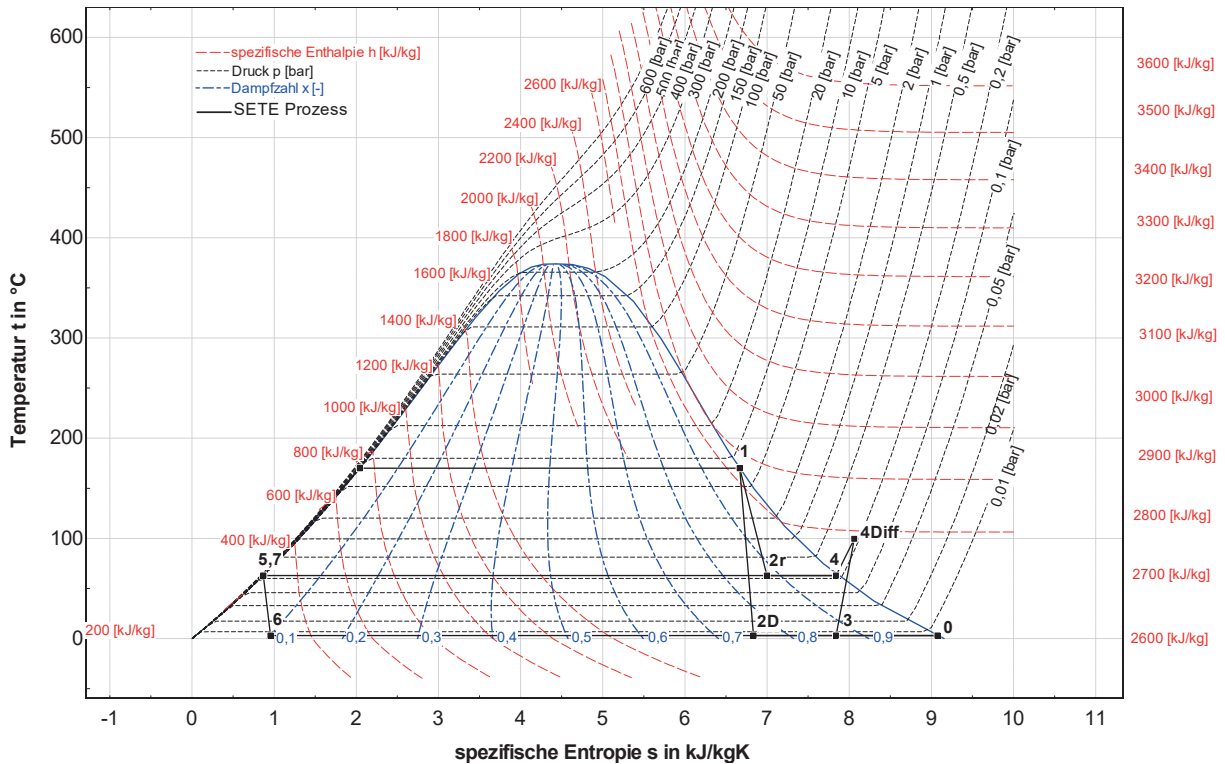
Dieser Gesamtwirkungsgrad kann durch Veränderung des Massenstromverhältnisses  $H$  (Verhältnis von Treibdampf zu Expansionsdampf) optimiert werden. Diese Optimierung ist aus Abbildung 2.2 zu entnehmen. Daraus ist ersichtlich, dass die Leistungsgrößen des SETE-Prozesses mit zunehmendem Massenstromverhältnis  $H$  abnehmen, da der Treibdampfmassenstrom sich nur in Abhängigkeit des Saugdampfmassenstroms (Kältemassenstrom) verändert. Bei dieser Optimierung wird die Kälteleistung mit 10 kW konstant gehalten, das heißt der Treibdampfmassenstrom bleibt unverändert, womit mit zunehmenden Massenstromverhältnissen  $H$  der Expansionsdampfmassenstrom abnimmt.



**Abbildung 2.2:** Optimierung des Gesamtwirkungsgrades in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses

Der Gesamtwirkungsgrad des SETE-Prozesses bewegt sich in einem Bereich von 100 bis 180 %. Dies gilt auch für einen höheren Kälteleistungsbereich.

Zum besseren Verständnis ist der SETE-Prozess mit dem oben definierten und berechneten Nennbetriebspunkt in einem T,s-Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 2.3).



**Abbildung 2.3:** T,s-Diagramm des SETE-Prozesses mit dem definierten und berechneten Nennbetriebspunkt

### 3 Zusammenfassung

Der SETE-Prozess (Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung) beruht auf einem patentierten Verfahren sowie einer kompakten Energiebereitstellungsanlage, die Objekte mit Strom, Wärme und Kälte versorgt. Dabei wird das Arbeitsmedium durch Anbindung eines Sonnenkollektors verdampft und der Frischdampf wird sowohl einem Dampfschraubenmotor zur Stromerzeugung als auch einem Strahlverdichter zur Wärme- und Kälteerzeugung bereitgestellt. Die Wärmequelle Dampf kann nicht nur solarthermisch erzeugt werden, sondern in Form von Abdampf oder auch von einem Biomasseheizwerk zur Verfügung gestellt werden. Daher ergibt sich ein breites Anwendungsgebiet für den neuartigen SETE-Prozess.

Durch Regelung der Frischdampfmenge ist ein stromgeführter oder kältegeführter Betrieb sowie ein reiner Strombetrieb oder Kältebetrieb mit oder ohne gekoppelte Wärmebereitstellung für Heiz- bzw. Warmwasser der Anlage möglich. Je nach Anforderung an der Kälte-seite kann als Arbeitsmedium Wasser oder Ammoniak zur Erzeugung von Klimakälte bzw. Prozesskälte bei gleichzeitiger Bereitstellung von Strom und Wärme eingesetzt werden.

Der SETE-Prozess erzielt eine höhere Effizienz (Gesamtwirkungsgrad bewegt sich zwischen 100 und 180 %) als herkömmliche Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen bei verringertem anlagentechnischem Aufwand und geringeren Investitionskosten.

Durch den Einsatz dieses Systems kann ein wesentlicher Beitrag zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energieträger geleistet und zum anderen ein enormes Ökostrompotential erschlossen werden.

- [1] R. Krottil, Ch. Pinter, „Verfahren und Anlage zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung“, Österreich Patent AT507218B1, 05.01.2009.
- [2] P. Nores, „Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen - Konzepte und Erfahrungen“, KI Luft- und Kältetechnik, 11/2006.
- [3] S.A. Klein, „Engineering Equation Solver (EES)“, Professional Version 10.040-3D, Copyright by S.A. Klein, F-Chart Software, 2016.
- [4] K. Cizungu, M. Groll, M., „Leistungsscharakteristik eines Kühlsystems mit Dampfstrahlverdichter“, KI Luft- und Kältetechnik, Heft 7, 1999.
- [5] K. Kauder, „Schraubenmaschinen“, Forschungsbericht Nr. 4 des FG Fluidenergiemaschinen, Universität Dortmund (HSRG.), Dortmund, Deutschland, 1996.
- [6] H. Jaberg, „Skriptum Hydraulische Strömungsmaschinen“, Institut für Strömungsmaschinen, TU Graz, 2016.