

Isentroper Wirkungsgrad

Sadi Carnot hat im Jahr 1824 in seinen « Réflexions sur la puissance motrice du feu » („Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers“) grundsätzliche Überlegungen zur maximal möglichen Nutzbarmachung von Wärme (oder Wärmestoff, wie dies in der deutschen Übersetzung benannt wird) zur Erzeugung von bewegender Kraft, bzw. Prozessleistung wie wir dies heute bezeichnen wollen, gemacht.

Dabei hat er die Wirkung des über ein Temperaturgefälle fliessenden Wärmestoffs mit jener des über eine Gefällsstufe fliessenden Wassers verglichen.

Zitat aus der deutschen Übersetzung:

Die bewegende Kraft des fallenden Wassers hängt von seiner Höhe und der Menge der Flüssigkeit ab; die bewegende Kraft der Wärme hängt gleichfalls von der Menge des angewendeten Wärmestoffes ab, und dem, was man seine Fallhöhe nennen könnte, und was wir in der That so nennen wollen, nämlich dem Temperaturunterschied der Körper, zwischen denen der Austausch des Wärmestoffes stattfindet.

Diese Analogie haben die Physikdidaktiker der Universität Karlsruhe wieder aufgegriffen und auf weitere Gebiete der Physik und die physikalische Chemie angewendet und daraus den innovativen Physikkurs KPK^[1] entwickelt und dabei die Entropie als verständliche Grösse im Sinne des Wärmestoffes von Sadi Carnot neu vermittelt.

Ebenso wurde auf dieser Basis an der Zürcher Hochschule der Angewandten Wissenschaften (ZHAW) die SystemPhysik^[2] aufgebaut.

Das Wesentliche beim KPK aus unserer Sicht ist, dass die Energie, als Erhaltungsgrösse, die also per Definition weder erzeugt noch vernichtet werden kann, immer zusammen mit einer anderen mengenartigen Grösse bewegt, ja von dieser getragen wird und in Prozessen von einer mengenartigen, extensiven Grösse zu einer anderen mengenartigen Grösse umgelagert, bzw. übertragen werden kann. Zu jeder mengenartigen Grösse gehört das Potential bzw. die Tragfähigkeit für Energie (intensive Grösse), wie folgt:

	mengenartige Grösse extensive Grösse	Potential intensive Grösse	Stromstärke der mengenartigen Grösse	Energiestrom [in Watt]
Mechanik	Impuls p	Geschwindigkeit v	Impulsstrom I_p , (Kraft)	$P = v \cdot I_p$
Elektrizität	Ladung Q	el. Spannung U	el. Strom I	$P = U \cdot I$
Wärme	Entropie S	Temperatur T	Entropiestrom I_s	$P = T \cdot I_s$
Chemie	Stoffmenge n	chem. Potential μ	Stoffstrom I_n	$P = \mu \cdot I_n$

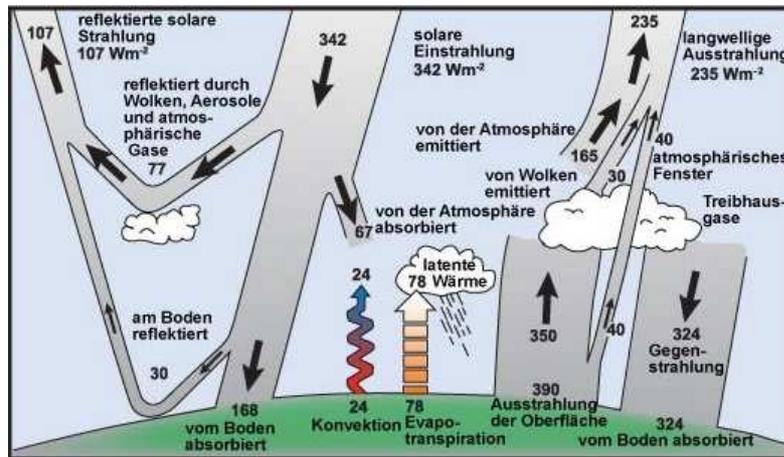
Fällt nun eine mengenartige Grösse über eine zugehörige Potentialdifferenz, so wird dabei die Differenz des zugehörigen Energiestromes als Prozessleistung frei verfügbar. Also z.B. bei der Elektrizität ergibt sich eine Prozessleistung von $P = \Delta U \cdot I$ (Spannungsdifferenz multipliziert mit dem elektrischen Strom) oder in der Thermodynamik eine Prozessleistung von $P = \Delta T \cdot I_s$ (Temperaturdifferenz multipliziert mit dem Entropiestrom).

Wir wollen uns nachfolgend vor allem mit der Thermodynamik, bzw. Wärmelehre befassen, welche ja alle realen Prozesse überlagert, da dabei immer auch Entropie erzeugt wird.

Die uns Menschen nachhaltig zur Verfügung stehenden Energieströme sind:

- Strahlung der Sonne als Träger des dominierenden, bestimmenden Entropiestromes
- Von Gravitationsfeldern des Mondes und der Sonne herrührende Bewegungen, wie Gezeiten
- Aus dem Erdinnern an die Oberfläche fliessender Entropiestrom

Aus den bekannten Energieflussbildern sind die wichtigsten globalen Energieströme ersichtlich (z.B. nachstehend aus einem IPCC-Bericht 2007, IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change):



Die Zahlen geben die **auf die gesamte Erdoberfläche bezogenen** Energieströme wider. Bekannter ist bezüglich die eintreffende Strahlung der Wert $4.342 = 1'367 \text{ W/m}^2$ welcher sich auf die Querschnittsfläche der Erde bezieht ($1/4$ der Oberfläche); siehe auch weiter unten. Nur der über Tage, Nächte und Jahreszeiten gemittelte Wert ist jedoch für Quervergleiche und gemittelte Wirkungen geeignet.

Auch ist es sinnvoll, solange die Zeit läuft, mittlere Energieströme darzustellen, insbesondere dort, wo es sich um (labile) Fließgleichgewichte handelt.

Die im Bild nicht angegebenen Energieströme aus den Gravitationskräften von Mond und Sonne (ca. 0.01 W/m^2), sowie aus dem Erdinneren (ca. 0.1 W/m^2) sind im Vergleich, wieder bezogen auf die Erdoberfläche, vernachlässigbar klein.

Durch die absorbierte Strahlung der Sonne in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche, aber vor allem auch durch die sehr unterschiedliche Intensität dieser Strahlung zwischen dem Äquator und den Polen, werden die globalen Zirkulationen von Wind und Wasser angetrieben, will heissen, die Impulsströme von Wind und Wasser tragen nun Teile der von der Sonnenstrahlung herrührenden Energieströme.

Abschätzungen haben für in Bodennähe nutzbare, durch Windströmungen getragene, Energieströme einen spezifischen Wert von ca. 0.5 W/m^2 ergeben. Für von Laufwasser auf den Kontinenten getragene Energieströme werden ca. 0.025 W/m^2 angegeben.

Häufig wird der auf die Erde treffende Energiestrom von $1.75 \cdot 10^{17} \text{ W}$ (gesamter Strahlungs-Energiestrom der ausserhalb der Atmosphäre auf den Kugelquerschnitt der Erde trifft) mit dem gesamten technischen Energieumsatz der Menschen verglichen und so festgestellt, dass es von daher gesehen überhaupt kein Versorgungsproblem gebe.

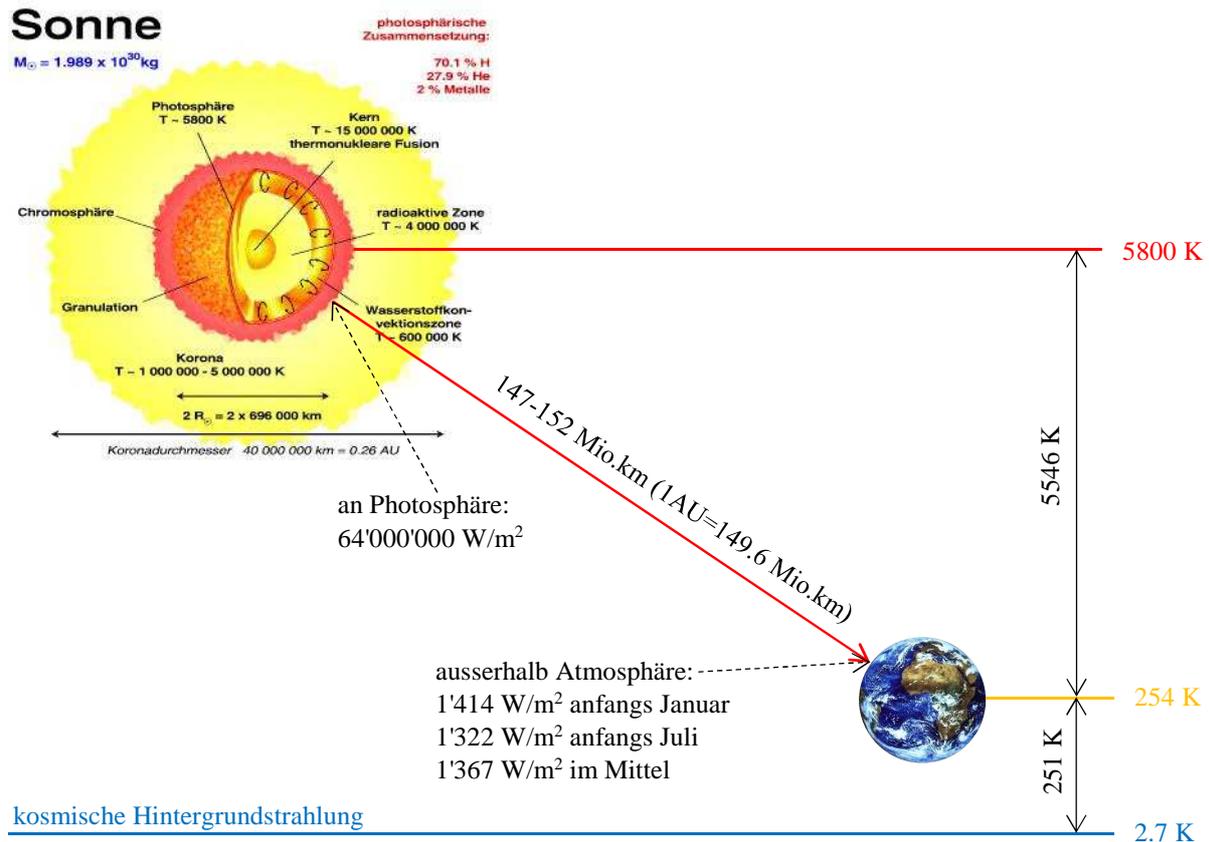
Solche Aussagen sind jedoch wertlos. Derselbe Energiestrom von $1.75 \cdot 10^{17} \text{ W}$, bzw. noch ein klein wenig mehr, geht von der Erde weg (dazu kommen noch die von der Gravitation und dem Erdinneren fliessenden, sowie die aus den fossilen Speichern von Menschen geförderten Energieströme). Also kommt man mit reiner Energiediskussion nicht weiter. Die Energie, als Erhaltungsgrösse, ist sehr gut geeignet zum Erstellen von Bilanzen, wie oben dargestellt, jedoch nicht oder nicht als alleinige Grösse, zur Beurteilung der Qualität von Prozessen und deren Quervergleich.

Eine nachhaltige Wirtschaft – und Wirtschaft ist ja der Kampf des Menschen gegen die Knappheit von Bedürfnissen und Dingen, die er als nützlich empfindet – muss sich am alles dominierenden Strahlungs- und Entropiestrom der Sonne, dem Antrieb der Biosphäre, orientieren. Die erforderliche Prozessleistung zur Befriedigung dieser Bedürfnisse des Menschen, wie Prozessleistung für mechanische Arbeit (z.B. im Bereich Verkehr), Beleuchtung, Informationsverarbeitung, Stoffumwandlung oder Stoffaufbau, für Heizung, Kühlung etc. kann nachhaltig also nur aus dem Strahlungs- und Entropiestrom der Sonne oder aus einem, durch diesen Strom angetriebenen Energie-Umlagerungsprozess, folgenden Energieträger gewonnen werden.

Es ist auch einsichtig, dass wenn dieser Strahlungs- und Entropiestrom mit hohem Potential möglichst direkt genutzt werden kann, viel mehr Prozessleistung verfügbar wird, als wenn dazwischengeschaltete Umlagerungsprozesse vorkommen, wie z.B. bei der Biomassenutzung. Jeder

reale Energie-Umlagerungsprozess ist verlustbehaftet, also dissipativ und demnach wird dabei auch immer Entropie erzeugt.

Man kann die Sonne in guter Näherung durch einen schwarzen Strahler, also durch einen Körper der sämtliche Strahlung aller Wellenlängen absorbiert und emittiert, mit einer Temperatur von 5800 K beschreiben, der Temperatur der Photosphäre der Sonne. Demnach gilt das Gesetz von Stefan und Boltzmann, welches die Intensität der Strahlung eines schwarzen Körper mit der gleichnamigen Konstanten $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ beschreibt, also besagt, dass die Intensität sehr massiv mit der Temperatur steigt, nämlich mit der vierten Potenz. Demnach wird an der Photosphäre bei der Temperatur von 5800 K ein Strahlungs-Energiestrom von 64 MW/m^2 emittiert.



Die sehr hohe Intensität der Strahlung an der Photosphäre der Sonne von ca. $64'000'000 \text{ W/m}^2$ wird über die mittlere Distanz Sonne-Erde, von knapp 150 Mio. km, umgekehrt proportional zum Quadrat des Verhältnisses dieser Distanz zum Sonnenradius, von 0.696 Mio. km, reduziert. Daraus ergibt sich die bekannte **Solarkonstante von 1367 W/m^2** [$64'000'000 \text{ W/m}^2 / (150/0.696)^2$].

Dieser Wert der Solarkonstanten entspricht dem weiter oben, im Energieflussbild angegebenen Wert von 342 W/m^2 wenn der Strahlungs-Energiestrom auf die ganze Erdoberfläche bezogen wird, also auf das Vierfache der von der Solarkonstanten angestrahlten Querschnittsfläche der Erde.

Gemäss dem besagten Energieflussbild werden ca. 107 W/m^2 (31%) des ankommenden Strahlungsenergiestromes von 342 W/m^2 (100%) reflektiert; entweder in der Atmosphäre (Wolken etc.) oder an der Erdoberfläche. Der restliche Teil nach der Bilanzierung gemäss dem Energieerhaltungssatz wird über den abgehenden Strahlungs-Energiestrom von 235 W/m^2 (69%) ans Weltall mit der Hintergrundstrahlung von 2.7 K abgegeben.

Die Erde ist kein schwarzer Strahler ansonsten würde ja keine Strahlung reflektiert. Wir wollen die Erde hier trotzdem, für Abschätzungen, auf dem Temperaturniveau von 250 bis 300 K, als schwarzen Strahler betrachten. So gesehen und wiederum nach dem Gesetz von Stefan und Boltzmann ergibt sich aus dem abgehenden Strahlungs-Energiestrom von 235 W/m^2 ein Abstrahlungstemperaturniveau von

254 K (-19°C). Diese grobe Abschätzung entspräche dann der Mitteltemperatur aus emittierender Atmosphärentemperatur und Erdoberflächentemperatur (atmosphärisches Fenster).

Wir wollen mit dieser Abschätzmethode auch noch eine Sensitivitätsanalyse vornehmen. Vorerst stellen wir uns die Erde als vollständig schwarzen Strahler vor, wonach dann der gesamte Strahlungs-Energiestrom der Sonne (342 W/m²) absorbiert und auch wieder emittiert würde. Diese Vorstellung ergibt dann ein Abstrahlungstemperaturniveau von 279 K (6°C). Wenn wir uns die Erde nun mit einer Albedo von 0.5 vorstellen, wonach dann nur noch 171 W/m² absorbiert/emittiert würden und wir trotzdem für die Emission mit dem Gesetz von Stefan und Boltzmann rechnen, so ergibt sich ein Abstrahltemperaturniveau von noch 234 K (-39°C).

Aus dieser groben Abschätzung resultiert also bei Variation des Absorptionsanteils von 50 bis 100% eine Änderung beim Abstrahlungstemperaturniveau von -39°C bis +6°C ($\Delta T=45$ K).

Die obige Darstellung und die vorstehenden Überlegungen sollen veranschaulichen wie die Erde im Temperaturgefälle zwischen Sonne und Weltall „hängt“, bzw. über die Energiebilanz gehalten wird. Auf die für uns Menschen zudem massgebende und komplexe Vorgänge innerhalb der Atmosphäre und zwischen Erdoberfläche und Troposphäre (z.B. Treibhauseffekt durch Wasserdampf in Atmosphäre, durch Treibhausgase etc.) können und wollen wir hier nicht eingehen.

Aus der Darstellung soll zudem, wie bereits erwähnt, ersichtlich werden, dass die direkte Nutzung des Strahlungs-Energie- und Entropiestromes von der Sonne, mit entsprechend hohem Potentialgefälle, die höchst mögliche Prozessleistung für den Antrieb technischer Prozesse und Maschinen verfügbar macht. Hernach sind alle Umlagerungsprozesse mit einer Dissipation, also einer Entropieproduktion verbunden und die Prozessleistung, welche nach einer Kaskade von Energie-Umlagerungsvorgängen noch verfügbar gemacht werden kann, schwindet stark (z.B. bei der Gewinnung von Brenn- oder Treibstoff aus Biomasse).

Der Strahlungs-Energie- und Entropiestrom von der Sonne kommt mit geringer Entropie daher und bei der natürlichen Absorption in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche wird massiv Entropie und damit „Wärme“ erzeugt, d.h. grosses Potential für Prozessleistung wird dissipiert und es stehen dann nur noch stark eingeschränkte Gewinnungsmöglichkeiten zur Verfügung.

Nun kommen wir zu unserem eigentlichen Thema dem **isentropen Wirkungsgrad η_s** . Im KPK und auch anderswo wurde ein Prozess-Wirkungsgrad so definiert:

$$\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{real}} \quad \text{wo Prozessleistung aufgewendet wird (Prozessantrieb)}$$

$$\eta_s = \frac{P_{real}}{P_{ideal}} \quad \text{wo Prozessleistung verfügbar wird}$$

Es wird also immer ein realer Prozess mit einem idealen Prozess verglichen, das heisst mit einem Prozess bei dem keine Entropie erzeugt wird und also reversibel ist (isentrop). So erhält man eine objektive Angabe zur Qualität des technischen Prozesses, wonach dessen isentroper Wirkungsgrad bei hoher Qualität gegen 1 oder 100% tendiert.

Wenn wie üblich bei Wirkungsgradangaben z.B. ein Nutz-Ausgangsenergiestrom mit einem Prozess-Eingangsenergiestrom verglichen wird, also nur über Energieströme definiert wird, so bleiben die eigentlichen Energieträger und dem entsprechende Qualitätsunterschiede unberücksichtigt und ein Quervergleich von Prozessen mit solch einer Wirkungsgraddefinition führt zu Falschaussagen und Fehlbeurteilungen.

Als Beispiel stellen wir uns zwei Prozesse vor, mit demselben Eingangsenergiestrom und -träger. Im ersten Prozess resultiert ein Nutz-Ausgangsenergiestrom von $P = 50$ W, getragen von elektrischer Ladung (z.B. $I = 1$ A auf dem Potential von $U = 50$ V). Im zweiten Prozess wird ebenfalls ein Nutz-Ausgangsenergiestrom von $P = 50$ W, jedoch getragen von Entropie, bereitgestellt, z.B. $I_s = 0.149$ W/K auf einem Potential von $T = 335$ K (62°C).

Gemäss gängiger Wirkungsgraddefinition (Energiestromvergleich) sind also beide Prozesse gleich wirkungsvoll.

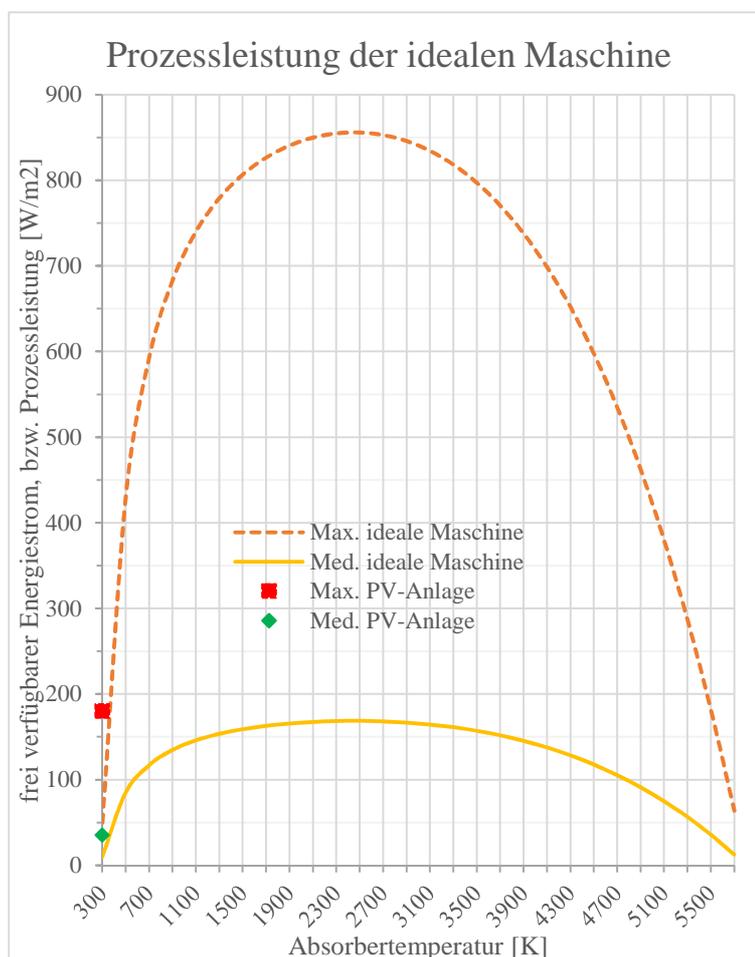
Zum korrekten Prozessvergleich könnte man im ersten Fall mit dem von elektrischer Ladung getragenen Energiestrom eine ideale Entropie-Pumpe (Wärmepumpe) betreiben und erhielte so einen dem zweiten Prozess vergleichbaren Energieträger. Demnach ergäbe sich bei einer angenommenen Entropie-Quellentemperatur von $T_1 = 285 \text{ K}$ (12°C) und einer Potentialdifferenz von $\Delta T = 50 \text{ K}$, sowie bei der zur Verfügung stehenden Antriebsleistung der Entropie-Pumpe von $P = 50 \text{ W}$ ein mit dem zweiten Prozess vergleichbarer Entropiestrom von $I_s = 1.0 \text{ W/K}$, der von $T_1 = 285 \text{ K}$ auf das Niveau von $T = 335 \text{ K}$ gefördert werden könnte. So gesehen wäre der erste Prozess um den Faktor 6.7 ($1.0 / 0.149$) besser als der zweite.

Den Prozessvergleich könnte man sich auch umgekehrt vorstellen, indem man den Entropiestrom des zweiten Prozesses einem idealen Entropie-Motor (Wärme-Kraftmaschine) zuführen würde und so Prozessleistung erzeugen könnte, welche mit derer des ersten Falls vergleichbar wäre. Man würde also den Entropiestrom des zweiten Prozesses ($I_s = 0.149 \text{ W/K}$) über ein Potentialgefälle von $\Delta T = 50 \text{ K}$ fließen lassen und so eine Prozessleistung von $P = 7.45 \text{ W}$ verfügbar machen - und auch so betrachtet führte dies zum Faktor 6.7, um den der zweite Prozess schlechter bewertet werden müsste.

Wir wollen uns nun bekannte Prozesse zur Nutzung des Strahlungs-Energiestromes der Sonne näher betrachten und deren isentropen Wirkungsgrad bestimmen.

Dazu müssen wir den idealen Referenzprozess zuerst definieren. Wir stellen uns also eine Maschine auf der Erdoberfläche vor, welche am Eingang mit einem Absorber ausgestattet ist, welcher nur die Strahlung der Sonne „sieht“ und ansonsten gegen die Umgebung vollständig isoliert ist. Dieser Absorber, den wir uns konstruktiv nicht vorstellen können, auch weil dieser auf nicht beherrschbar hoher Temperatur betrieben würde, soll nur als theoretisches Modell für besagte Vergleichszwecke dienen. Der Absorber empfängt den Strahlungs-Energie- und Entropiestrom der Sonne und übergibt leitungsartig einen Entropiestrom auf Absorber-Temperaturniveau an einen idealen Prozess nach Sadi Carnot, der das Temperaturgefälle zwischen Absorber und Umgebungs-Erdtemperatur (hier: 285 K) nutzt (idealer Entropie-Motor).

Wenn bei dieser idealen Maschine die Absorber-Temperatur variiert wird, gemäss nebenstehendem Bild, so ergibt sich ein Prozessleistungs-Maximum bei ca. 2500 K . Darüber sinkt die Prozessleistung und wäre dann bei 5800 K Null, da dort netto kein Strahlungs-Energiestrom mehr übertragen würde. Bei Absorbertemperaturen unterhalb des Optimums würde zwar der übertragene Strahlungs-Energiestrom noch steigen, aber das Potentialgefälle würde immer kleiner und bei Absorbertemperatur auf dem Umgebungstemperaturniveau (hier mit 285 K festgelegt) würde nur



noch Entropie erzeugt, jedoch keine Prozessleistung verfügbar gemacht.

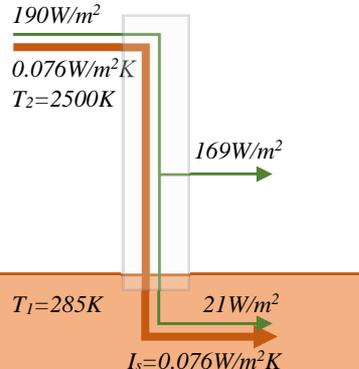
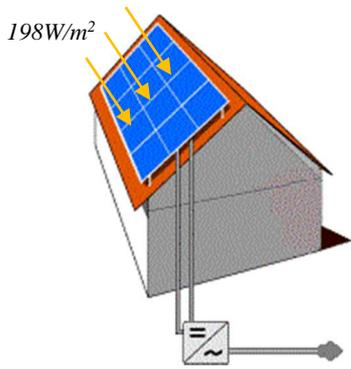
Man erkennt auch, dass die Übertragung der Strahlungs-Energie von der Sonne zur Erde, bzw. hier zu unserem Absorber immer mit Entropieproduktion verbunden ist; erst nach der leitungsartigen Übertragung der Entropie vom Absorber zum idealen Entropie-Motor verläuft unser theoretischer Referenz-Prozess ideal isentrop, also ohne Entropiezunahme.

Im Diagramm dargestellt ist einerseits die maximal mögliche Prozessleistung (Max. ideale Maschine) mit einem Maximum von ca. 860 W/m², welche bei optimalen Strahlungs-Bedingungen (wolkenlos, senkrechte Einstrahlung etc.) erreicht werden könnte. Andererseits ist die durchschnittliche Prozessleistung (Med. ideale Maschine) angegeben, welche ein Maximum von 169 W/m² aufweist. Dieser frei verfügbare Energiestrom (Prozessleistung) von $P_{ideal} = 169 \text{ W/m}^2$ unserer theoretischen Referenzmaschine ist mit den im oben stehenden Energieflussbild der Erde dargestellten Energieströmen vergleichbar und dient uns im Weiteren als Referenzgrösse zur Bestimmung des isentropen Wirkungsgrades von realen Prozessen.

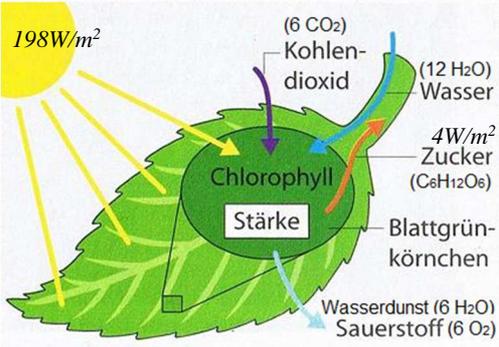
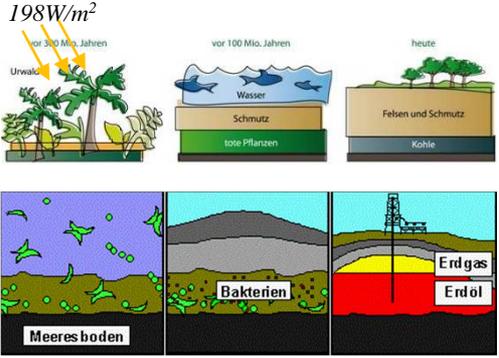
Der gemäss Energieflussbild auf die Erdoberfläche treffende, durchschnittliche Strahlungs-Energiestrom beträgt 198 W/m² (168 W/m² absorbiert plus 30 W/m² reflektiert) und dieser wird nachfolgend als Eingangs-Strahlungs-Energiestrom für die existierenden, realen Prozesse zu Grunde gelegt.

Bei unserem beschriebenen idealen, theoretischen Referenz-Prozess ist der Netto-Eingangs-Strahlungs-Energiestrom tiefer bei etwa 190 W/m², da die Absorbtemperatur sehr hoch ist.

In Mitteleuropa liegt dieser auf der Erdoberfläche eintreffende, durchschnittliche Strahlungs-Energiestrom etwa im Bereich von 130-150 W/m².

<p>Prozess: Solar-Entropie-Motor</p>  <p>190W/m² 0.076W/m²K T₂=2500K</p> <p>169W/m²</p> <p>T₁=285K 21W/m² I_s=0.076W/m²K</p>	<p>Prozessleistung:</p> $P = 169 \text{ W/m}^2 \quad [=I_s \cdot (T_2 - T_1)]$ <p><i>Dies ist der ideale Referenzprozess zur Nutzung des Strahlungs-Energiestromes der Sonne, als Basis für die Bestimmung des isentropen Wirkungsgrades realer Prozesse</i></p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{169 \text{ W/m}^2}{169 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 100\%$</p>
<p>Prozess: Photovoltaik</p>  <p>198W/m²</p> <p>36W/m²</p>	<p>Prozessleistung:</p> $P = 198 \text{ W/m}^2 \cdot 0.18$ <p><i>0.18 ist der durchschnittliche Energie-Umlagerungsfaktor vom Energieträger Solarstrahlung auf den Energieträger Elektrizität AC, heutiger, guter Installationen</i></p> $P = 36 \text{ W/m}^2$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{real}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{36 \text{ W/m}^2}{169 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 21\%$</p>

<p>Prozess: Solar-Entropie-Pumpe</p>	<p>Prozessleistung (prozessintern):</p> $P = 169 \text{ W/m}^2 \quad [=I_{s1} \cdot (T_2 - T_1)]$ <p>Dies ist der ideale Referenzprozess, als Basis für die Bestimmung des isentropen Wirkungsgrades bei reinem Entropiebedarf, also mit Entropie (I_{s2}) als Nutzenergieträger auf dem Potential von $T_3 = 335 \text{ K}$ (62°C)</p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{1130 \text{ W/m}^2}{1130 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 100\%$</p>
<p>Prozess: Sonnenkollektor</p>	<p>Energiestrom (Wärme):</p> $P = 198 \text{ W/m}^2 \cdot 0.40$ <p>0.40 ist der durchschnittliche Energie-Umlagerungsfaktor vom der Solarstrahlung bis auf den Nutzenergieträger Entropie, realer Installationen mit Nutzung bei 335 K (62°C),</p> $P = 80 \text{ W/m}^2$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{real}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{80 \text{ W/m}^2}{1130 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 7.1\%$</p>
<p>Prozess: Solar-„WKK“</p>	<p>Prozessleistung („Kraft“):</p> $P = 165 \text{ W/m}^2 \quad [=I_s \cdot (T_2 - T_1)]$ <p>Energiestrom (Wärme):</p> $P = 25 \text{ W/m}^2$ <p>Dies ist der ideale Prozess zur gekoppelten Verfügbarmachung von Entropie („Wärme“, hier bei: 335 K, 62°C) und Kraft (WKK)</p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{190 \text{ W/m}^2}{190 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 100\%$</p> <p>($W / K = 0.15$)</p>
<p>Prozess: Sonnenkollektor („ideal“)</p>	<p>Energiestrom (Wärme):</p> $P = 190 \text{ W/m}^2$ <p>Der Nutzenergiestrom (Wärme) ist gleich dem Eingangs-Energiestrom; ein vermeintlich idealer Kollektor; jedoch wird das Potential nicht genutzt und deswegen Entropie produziert ($II = 165 \text{ W/m}^2 / 335 \text{ K} = 0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$)</p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{190 \text{ W/m}^2}{1130 \text{ W/m}^2}$ <p>$\eta_s = 17\%$</p>

<p>Prozess: Photosynthese</p> 	<p>Prozessleistung:</p> $P = 198 \text{ W/m}^2 \cdot 0.02$ <p><i>0.02 ist der durchschnittliche Energie-Umlagerungsfaktor vom Energieträger Solarstrahlung auf den Stoffstrom Glucose, bei guten Bedingungen (Pflanze, Lage ...)</i></p> $P = 4 \text{ W/m}^2$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{real}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{4 \text{ W/m}^2}{169 \text{ W/m}^2}$ $\eta_s = 2.4\%$
<p>Prozess: Nutzung fossiler Stofflager</p> 	<p>Prozessleistung:</p> $P < 0 \text{ W/m}^2$ <p><i>Der nachhaltig fließende Stoffstrom, inklusive dessen Umwandlungsschritte von der Photosynthese bis zu den angegebenen Stoffen ist nicht messbar klein; für die Förderung, Aufbereitung und den Transport ist jedoch Prozessleistung P_f nötig</i></p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{real} - P_f}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{0 - ?? \text{ W/m}^2}{169 \text{ W/m}^2}$ $\eta_s = -??\%$

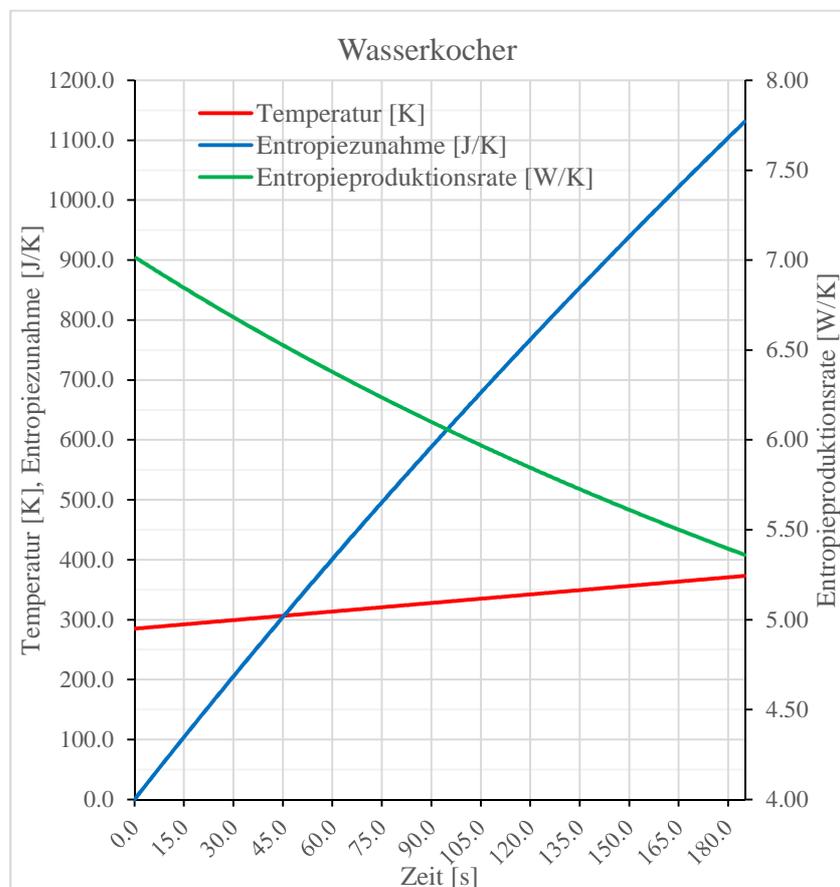
Nachdem wir nun vorstehend einige Prozesse und deren Wirkungsgrad zur Verfügbarmachung von Prozessleistung betrachtet und beurteilt haben, wollen wir uns nachfolgend der anderen Seite, den technischen Prozessen zur Befriedigung der menschlichen Bedürfnisse zuwenden. Vorerst aber noch einige Bemerkung zum Zwischenglied für die Übertragung der Prozessleistung. Bereits heute ist die elektrische Ladung, bzw. Elektrizität einer der wichtigsten Energieträger, ja überhaupt **der** Energieträger zur weiträumigen Übertragung von Prozessleistung mit relativ geringer Dissipation, will heissen mit geringer Entropieproduktion. Dazu steht heute für grosse Distanzen die Technik der Gleichstromübertragung auf sehr hohem Potential (Spannung +/-800'000V) zur Verfügung. So wie es aussieht, wird dieser Energieträger in Zukunft noch bedeutender werden. Die direkte Speicherung von elektrischer Ladung ist allerdings nur beschränkt in elektrischen Kondensatoren möglich und dies wird auch so genutzt zur lokalen Deckung von kurzzeitigem Spitzenbedarf, zum Beispiel bei elektrischer Traktion (Bahnnetze) oder generell zur Deckung kurzer Prozessleistungs-Bedarfsspitzen oder in der Wechselstromtechnik auch zur lokalen Kompensation von Blindleistung. Wenn nun europaweit die bestehenden elektrischen Höchstspannungsnetze weiter ergänzt und verstärkt werden, so können die kurzfristig und regional gesehen eher stochastisch anfallenden Energieströme aus der Photovoltaik und den Windkraftanlagen besser überregional verteilt und somit bei geringerem Speicherbedarf genutzt werden. Grundsätzlich ergänzen sich diese beiden Prozesse, einerseits die direkte Nutzung unseres nachhaltigen Strahlungs-Energiestromes von der Sonne mittels Photovoltaik und andererseits dessen indirekte Nutzung nach den Umlagerungsschritten auf den Impulsstrom des Windes, recht gut. Insbesondere könnten unter der Berücksichtigung des unterschiedlichen, regionalen Bedarfs an Prozessleistung mit koordinierter Planung der Nutzungsgebiete und des Verhältnisses von Photovoltaikanlagen zu Windkraftanlagen vor allem auch saisonale Unterschiede gut ergänzt werden. Dies würde jedoch einen kontinentalen, länderübergreifenden, planwirtschaftlichen Ansatz bedingen. Somit könnten auch die Speicherbedürfnisse minimiert werden, d.h. diese wären dann nicht so sehr saisonaler, sondern eher

kurzfristiger Natur. Geeignete Systeme mit relativ wenig Dissipation, wie beispielsweise die Pumpspeicherkraftwerke, sind ja etabliert. Diese Kraftwerke ($P = \dot{m} \cdot g \cdot \Delta h$), welche nach dem Vergleichsprozess von Sadi Carnot die schwere Masse, bzw. den Massenstrom (\dot{m}) des Wassers und die Gravitations-Potentialdifferenz ($g \cdot \Delta h$) nutzen, müssen einerseits über grosse, variable Pumpleistung zur kurzfristigen Aufnahme von gerade nicht benötigter Prozessleistung (P) aus dem Netz verfügen und andererseits auch, wie bereits herkömmlich üblich, über entsprechende grosse Turbinenleistung zur kurzfristigen Verfügbarmachung von Prozessleistung.

Wir können jetzt auch grob abschätzen, wie gross der Flächenbedarf pro Person ist, um nachhaltig Prozessleistung für unsere Bedürfnisse verfügbar zu machen. Wenn wir den effizientesten, heute bekannten Prozess, also die Photovoltaik ($\eta_s = 21\%$), zu Grunde legen und Mitteleuropa betrachten, wo der Prozessleistungsbedarf pro Kopf in der Grössenordnung von $4'000 \text{ W/Kopf} - 6'000 \text{ W/Kopf}$ und der ankommende Strahlungs-Energiestrom bei ca. 140 W/m^2 liegt, so ergibt sich daraus ein Flächenbedarf von $130 - 200 \text{ m}^2/\text{Kopf}$. Man erkennt also, dass allein durch Nutzung geeigneter Dachflächen nur ein Teil des Bedarfs gedeckt werden kann. Es ist aber ohnehin sinnvoll, wie vorstehend erläutert, die andern nachhaltig zur Verfügung stehenden Energieträger, wie Wind und Wasser, zum Zwecke zeitlichen und regionalen Ausgleichs, in gut geplanter Kombination und weiträumiger, starker Vernetzung, sowie ergänzt durch die nötige Speicherkapazität, zu nutzen. So können z.B. auch Konflikte mit landwirtschaftlicher Nutzung vermieden werden.

Nun, Auch auf der Nutzerseite, also bei den Prozessen und Systemen zur Befriedigung unserer Bedürfnisse gibt es Verbesserungspotential um letztendlich den Prozessleistungsbedarf pro Kopf auf ein nachhaltiges Niveau zu senken. Dies wollen wir, auf dieser Nutzungsseite, ebenfalls mit dem isentropen Wirkungsgrad aufzeigen.

Bei vielen, solchen Prozessen geht es um die Bereitstellung von Entropie („Wärme“) auf einem gewünschten Temperaturniveau, d.h. um den Energieträger Entropie. Es geht also um warme Raumluft, warmes Wasser, warme Getränke, warmes Essen etc. und die Prozesse oder Maschinen heissen Heizung, Wassererwärmer (Warmwasser), Kochherd, Kaffeemaschine, Wasserkocher usw. Stellvertretend für die vorstehend genannten „Maschinen“ wollen wir uns nun mit dem sogenannten Wasserkocher befassen und diesen Prozess eingehender betrachten. Das Gerät ist allgemein bekannt und dient der Erwärmung von Wasser bis hin zum Siedepunkt. Wir

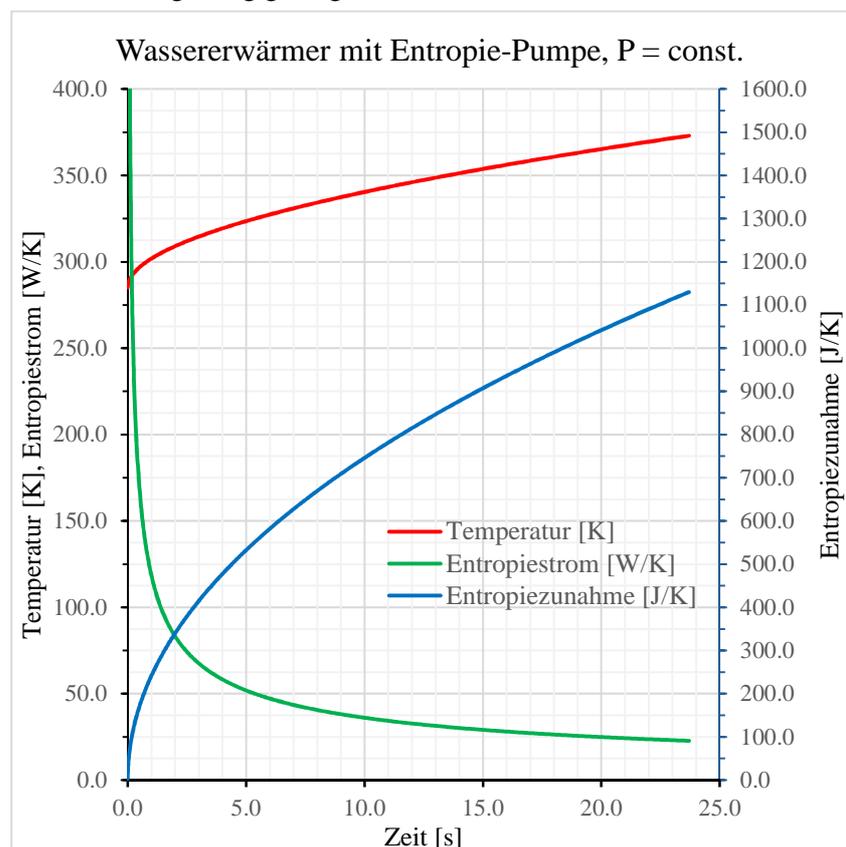


stellen uns ein konkretes Gerät vor mit einem Inhalt von $m = 1 \text{ kg}$ (ca. 1 Liter) Wasser und einer Prozessleistung von $P = 2'000 \text{ W}$, welche über den Energieträger elektrische Ladung bei einem Potential von $U = 230 \text{ V}$, also mit einer elektrischen Stromstärke von $I = 8.7 \text{ A}$, zugeführt wird. Intern

im System „Wasserkocher“ wird „nur“ Entropie erzeugt und also der mit der elektrischen Ladung zugeführte Energiestrom auf die Entropie umgeladen. Wir vernachlässigen in Wirklichkeit vorkommende Dissipation durch „Wärme“-/Entropieleitung und vereinfachen weiter so, dass die spezifische Energiekapazität ($c = 4'200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) und ebenfalls die Prozessleistung konstant seien. Der zugeführte Energiestrom erhöht demnach die innere Energie und mit der im System produzierten Entropie steigt die Temperatur von einem Ausgangstemperaturniveau ($T_1 = 285 \text{ K}$) auf ein gewünschtes Endtemperaturniveau T_2 . Der Prozess dauert ca. $t = 185 \text{ s}$, wenn bis zu $T_2 = 373 \text{ K}$ (Siedepunkt, jedoch ohne Dampferzeugung) aufgeheizt wird. Insgesamt wird so dem System die Energie von $\Delta W = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = 370'000 \text{ J}$ zugeführt. Die Entropie trägt mit steigender Temperatur mehr Energie und dem entsprechend sinkt die Entropieproduktionsrate mit steigender Temperatur, da ja unser Prozess bei konstanter Prozessleistung, also konstant zufließendem Energiestrom, abläuft. Anders beschrieben wird die Entropie bei stetig steigendem Temperaturniveau produziert und somit nimmt die Entropieproduktionsrate umgekehrt proportional zur steigenden Temperatur ab ($\sim 1/T$). Integriert man diese hyperbolische Funktion über die Temperaturerhöhung von T_1 nach T_2 , so ergibt sich ein Ausdruck von $\ln(T_2/T_1)$ und für die erzeugte Entropie demnach $\Delta S = c \cdot m \cdot \ln(T_2/T_1) = 1130 \text{ J/K}$. Man kann den Quotienten $\Delta W/\Delta S$, also das Verhältnis der dem System zugeführten Energie zu der diese tragenden Entropie auch als mittleres Temperatur-Niveau bezeichnen, also als mittleres Entropie-Potential des Prozesses $T_{med} = \Delta W/\Delta S = (T_2 - T_1)/\ln(T_2/T_1)$. Dieser Ausdruck sieht zwar kompliziert aus, kommt jedoch bei relativ kleinen Differenzen zwischen T_2 und T_1 deren arithmetisches Mittel $(T_1 + T_2)/2$ nahe und ist somit gut verständlich.

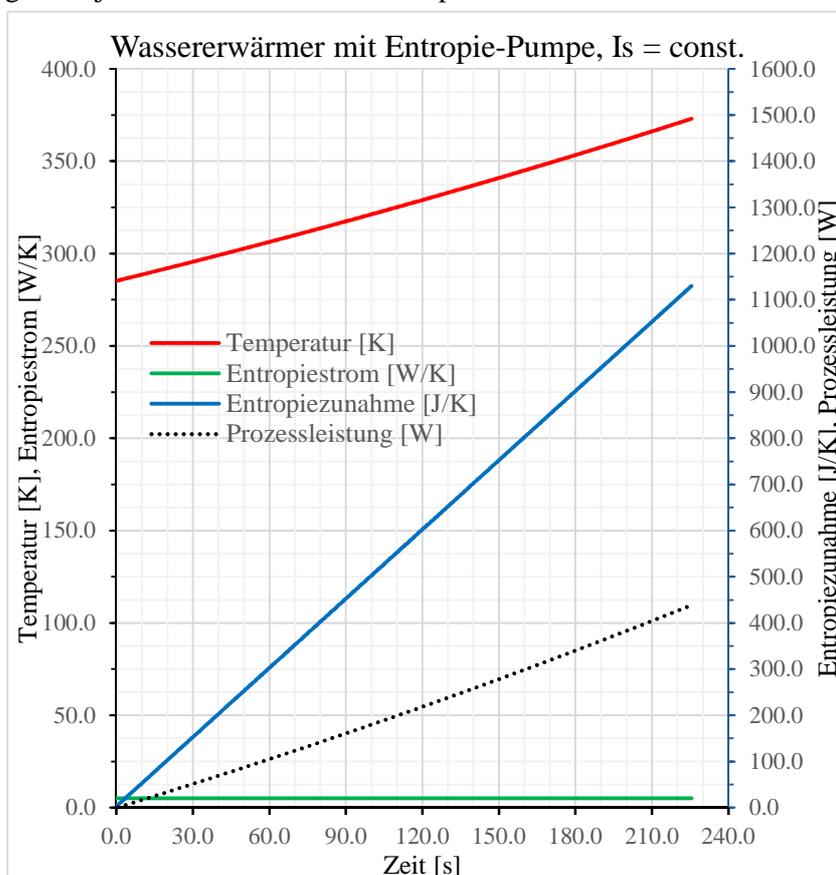
Nun, wir wissen ja auch aus unseren einleitenden Betrachtungen, dass die bei den natürlichen oder unseren technischen Prozessen produzierte Entropie schlussendlich auf dem Niveau der Umgebungs- oder der Atmosphärentemperatur mit dem Strahlungs-Energiestrom von der Erde ans unendliche All abgegeben wird, entsprechend dem Strahlungs-Energiestrom-Fließgleichgewicht unserer Erde. Wir können also mit nachhaltig verfügbar gemachter Prozessleistung ohne Einschränkung Entropie aus der Umgebung fördern oder pumpen (Entropie-Pumpe, bzw. Wärmepumpe), da diese nach den Nutzungsprozessen ohnehin wieder in die Umgebung gelangt.

Wir sehen demnach, dass bei allen Prozessen, wo es um die Bereitstellung von Entropie geht, wie Warmwasser, Raumheizung etc. die Entropie-Pumpe (Wärmepumpe) die technisch bessere Lösung ist, als die reine Entropieerzeugung. Im Idealfall wird die Entropie ohne Dissipation, also ohne Entropiezunahme (isentrop) vom Temperaturniveau der Umgebung (T_1) auf das gewünschte Temperaturniveau der Nutzung (T_2) gefördert (dies ist der Carnot-Prozess in umgekehrter Richtung als anfangs beschrieben). Wir wollen nun diesen Idealprozess zur Verfügbarmachung von Entropie („Wärme“) auf der



gewünschten Temperatur am Beispiel unseres „Wasserkochers“ mit Inhalt $m = 1 \text{ kg}$ betrachten. Es ist vielleicht nicht gerade naheliegend ein solches Gerät zu konstruieren und es wäre auch weniger praktikabel als das Bekannte, aber so wird doch sichtbar, dass vermeintlich gute Prozesse weit weg sind vom Idealprozess mit $\eta_s = 100\%$. Für unseren Vergleich setzen wir die Umgebungstemperatur oder Quellentemperatur auf dasselbe Niveau T_1 wie die Ausgangstemperatur des Wassererwärmungsprozesses, nämlich auf $T_1 = 285 \text{ K}$. Wenn wir nun einfach dieselbe, konstante Prozessleistung ($P = 2'000 \text{ W}$) wie beim Wasserkocher zum Pumpen von Entropie aus der Umgebung in den Wassererwärmer anwenden, so wird zu Beginn, wenn der Temperaturhub noch gering ist, ein sehr hoher Entropiestrom gefördert. Der ganze Prozess würde nur noch knapp $t = 24 \text{ s}$ dauern und der Prozessenergiebedarf betrüge noch $W_p = 47'500 \text{ J}$. Das vorstehende Diagramm veranschaulicht diesen Erwärmungsprozess mit konstanter Pumpleistung bis hin zur Solltemperatur von $T_2 = 373 \text{ K}$. So etwas ist sicher praktisch nicht realisierbar, da der Entropie-/Wärmetauscher für den anfänglich sehr hohen Entropiestrom extrem gross und unhandlich würde. Wir sehen also, dass bei variabler Pumphöhe ein geregelter Prozessantrieb mit veränderbarer Prozessleistung erforderlich ist und betrachten nun einen Prozess mit genau demselben Ergebnis, jedoch mit konstantem Entropiestrom.

Der Entropiestrom beträgt $I_s = 5 \text{ W/K}$ und trägt dem entsprechend einen konstanten Energiestrom von $1'425 \text{ W}$ aus der Umgebung in unser System des Wassererwärmers. Die Entropie im System nimmt also linear über der Zeit zu. Die Temperatur T steigt leicht überproportional, da die zunehmende Entropie mehr Energie trägt. Der Verlauf der Prozessleistung über der Zeit entspricht bei unserem idealen Entropie-Pump-Prozess genau der steigenden Pumphöhe (Potentialdifferenz $T - T_1$). Wie vorstehend hergeleitet, beträgt das mittlere Potential $T_{med} = (T_2 - T_1) / \ln(T_2 / T_1) = 327 \text{ K}$. Dem entsprechend ergibt sich für das Pumpen der gesamten Entropiezufuhr von $\Delta S = 1'130 \text{ J/K}$ über die



mittlere Potentialdifferenz $T_{med} - T_1$ ein Prozessenergiebedarf (mittlere Pumpenergie) von $W_p = \Delta S \cdot (T_{med} - T_1) = 47'500 \text{ J}$, bzw. eine mittlere Pumpleistung von $P_{med} = I_s \cdot (T_{med} - T_1) = 210 \text{ W}$. Der Vorgang dauert hier, mit den gewählten Parametern, $t = 226 \text{ s}$.

In einem reinen Gedankenspiel könnte man unseren Prozess, mit dem System in das Entropie gepumpt wird, auch als Energiespeicher verwenden. Bei unseren idealen, reversiblen Bedingungen, könnte dem System später wieder ein Entropiestrom entnommen und über das Temperaturgefälle zur Umgebung mit einem Entropie-Motor wiederum Prozessleistung, im Umfang von $\Delta W_p = \Delta S \cdot (T_{med} - T_1) = 47'500 \text{ J}$, verfügbar gemacht werden. Diese Entnahme über den Entropie-Motor könnte theoretisch auch mit anderen Strömen als beim Pumpen erfolgen, wenn das System dementsprechend dimensioniert würde.

Warmwasserspeicher mit Entropie-Pumpe (Wärmepumpe) zur Speicherladung sind etabliert und seit Jahrzehnten bekannt für die Bereitstellung von Warmwasser in Gebäuden etc. Es gibt aber bei diesen

Systemen immer noch Verbesserungspotential, insbesondere bei der Regelung des Prozessantriebs, abhängig von der Entropie-Pumphöhe, wie wir dies vorstehend beschrieben haben. In aller Regel wird für solche Prozesse die Umgebungs- oder Aussenluft als Entropie-/Wärmequelle genutzt.

Wenn wir uns nun unseren Wassererwärmer mit dieser Entropiequelle vorstellen, so könnte dies etwa wie nebenstehende aussehen.

Es würde z.B. ein Luftstrom von 293 K (20°C) auf 278 K (5°C) abgekühlt ($\Delta T = 15\text{ K}$) um den erforderlichen Entropiestrom $I_s = 5\text{ W/K}$ unseres idealen Entropie-Pump-Prozesses über einen Entropie-/Wärmetauscher von der Luft an unser System auf dem Niveau von $T_1 = 285\text{ K}$ leitungsartig zu übergeben.

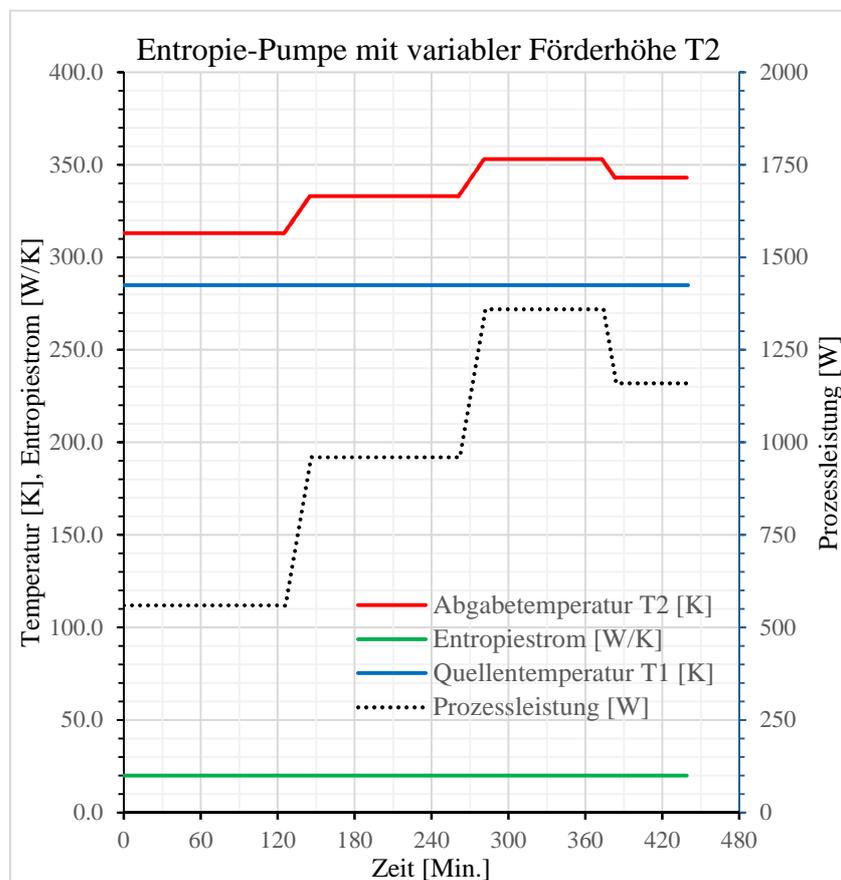
Bis hin zum Entropie-/Wärmetauscher würden die Entropie und die Energie konvektiv mit strömender Luft getragen. Demnach wäre bei der Annahme von konstanten spezifischen Kennwerten der Luft ($c = 1'000\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\rho = 1.2\text{ kg/m}^3$) ein Luft-Volumenstrom von $\dot{V} = 0.079\text{ m}^3/\text{s}$ erforderlich, was bei einer halbseitigen Öffnungsfläche der Lüftungsschlitze von 200 cm^2 einen dortige Strömungsgeschwindigkeit der Luft von etwa 4 m/s zur Folge hätte.

Wir sehen an unserem Wassererwärmer nun auch dass, wenn man sich von der reinen Theorie weg zur praktischen, ingenieösen Umsetzung hinbewegt, sofort technische Hürden erkennt. Bereits der erforderliche Entropie-/Wärmetauscher wäre ein Kompromiss und wegen des realen Temperaturgefälles mit Entropieproduktion verbunden; auch wäre für die Förderung des Luft-Volumenstromes zusätzliche Hilfsenergie, also weitere Prozessleistung erforderlich etc., was allerdings kein Hinderungsgrund, sondern eben eine ingenieöse Herausforderung zur Verbesserung des isentropen Wirkungsgrades sein sollte.



Wir betrachten nun noch einen quasistationären Entropie-Pump-Prozess, wie er beispielsweise für das Beheizen von Gebäuden oder allgemein für Prozesse und Maschinen mit kontinuierlichem Bedarf an Entropie („Wärme“) auf veränderlichem

Abgabenniveau benötigt wird. Wir stellen uns, wie aus nebenstehendem Diagramm ersichtlich, eine Entropie-Pumpe (Wärmepumpe) vor, welche einen konstanten Entropiestrom ($I_s = 20\text{ W/K}$) aus einer Quelle mit konstanter Temperatur $T_1 = 285\text{ K}$ über eine Potentialdifferenz von minimal $\Delta T = 28\text{ K}$ bis zu maximal $\Delta T = 68\text{ K}$ fördert, also auf eine Temperatur $T_2 = 313\text{ K}$ (40°C) bis $T_2 = 353\text{ K}$ (80°C). Entsprechend dieser Temperatur-Niveaudifferenz variiert der Prozessleistungs-Bedarf (P), bzw. die Pumpleistung. Mit dem Entropiestrom wird aus der Quelle ein konstanter Energiestrom von $I_{w1} = 5'700\text{ W}$ mitgetragen und auf dem



Abgabe-Temperaturniveau T_2 mit dem Entropiestrom ein entsprechend höherer Energiestrom von $I_{w2} = 6'300 \text{ W}$ bis $I_{w2} = 7'100 \text{ W}$ abgegeben ($I_{w2} = I_s \cdot T_2$, Energiebilanz: $I_{w2} = I_{w1} + P$).

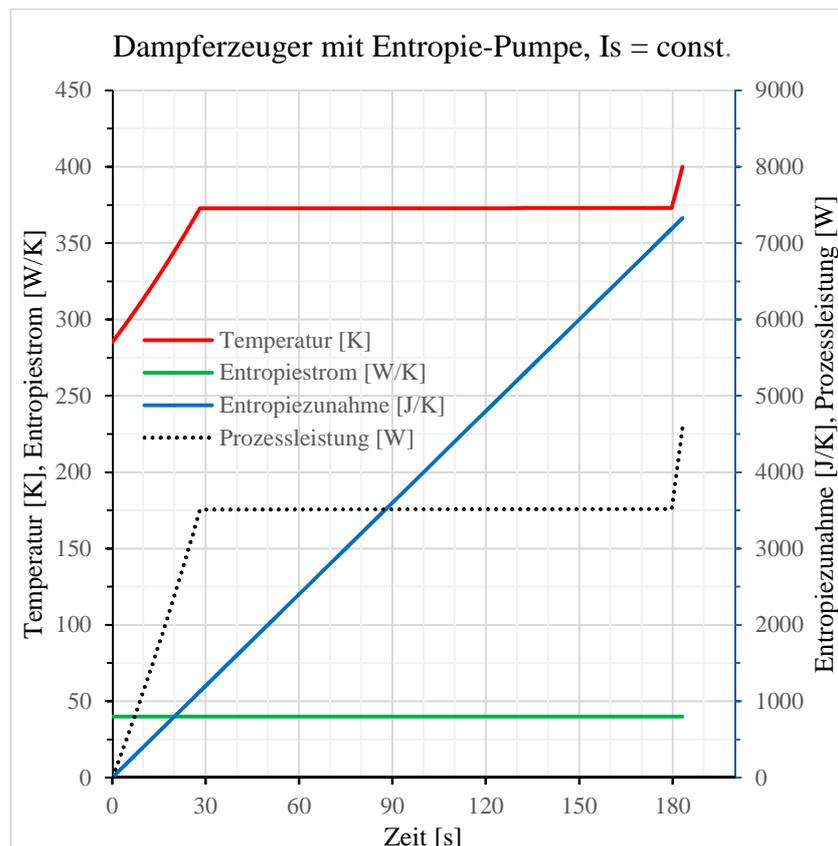
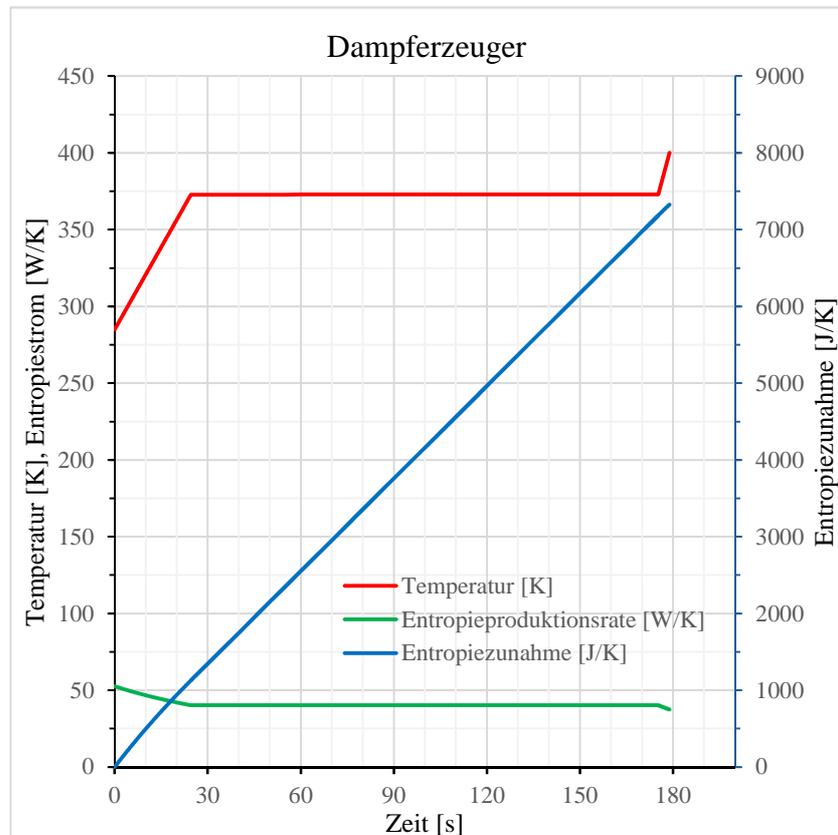
Wenn wir noch weiter gehen und Wasser bis und mit zum Siedepunkt und darüber hinaus erwärmen, so ist für die Verdampfung, also für den Phasenübergang flüssig -> gasförmig eine beträchtliche

zusätzliche Entropiezufuhr erforderlich ($6'050 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$).

Wasserdampf wird z.B. zur Sterilisation verwendet und die dazu erforderliche Entropie kann erzeugt oder theoretisch eben auch gepumpt werden. Wir betrachten dazu die Abläufe an isobaren Beispielprozessen bei Normaldruck, wobei wir Wasser mit $m = 1 \text{ kg}$ ab einer Ausgangstemperatur $T_1 = 285 \text{ K}$ zuerst erwärmen, dann verdampfen und noch bis auf $T_2 = 400 \text{ K}$ (127 °C) überhitzen. Dazu

nebenstehend oben das Diagramm für einen Dampferzeuger, mit einer Prozessleistung (z.B. elektrische Leistung) von $P = 15'000 \text{ W}$, welche vollständig zur Entropie-Produktion verwendet wird. Wie wir

bereits von unserem Wassererwärmer wissen, ist die Entropie-Produktionsrate bei der konstanten Prozessleistung temperaturabhängig und demnach während der Phase des Verdampfungsvorgangs (T_v) konstant. Der ganze Prozess dauert bei diesen Bedingungen knapp 3 Minuten und es wird eine Prozessenergie von $W_p = 2'680'000 \text{ J}$ vom elektrischen Ladungsstrom auf die Entropie umgeladen. Aus dem Wasservolumen von ca. 0.001 m^3 ist so ein Dampfvolmen von ca. 1.7 m^3 entstanden. Das nebenstehend untere Diagramm zeigt die wesentlichen Prozessvariablen für das



genau gleiche Ergebnis, jedoch mit einer Entropie-Pumpe (Wärmepumpe), welche einen konstanten Entropiestrom ($I_s = 40 \text{ W/K}$) aus der Quelle bei $T_1 = 285 \text{ K}$ fördert und so einen konstanten Energiestrom von $I_{w1} = 11'400 \text{ W}$ mit ins System trägt. Der Prozessleistungsbedarf steigt mit der anfänglich steigenden Pumphöhe und bleibt dann während dem Verdampfungsvorgang bei dort gleichbleibender Potentialdifferenz von $\Delta T = 88 \text{ K}$ zwischenzeitlich konstant, bei $P = 3'520 \text{ W}$. Der Prozessenergiebedarf beträgt für den gesamten Entropie-Pump-Prozess, bis hin zum Dampf mit 127°C , $W_p = 595'000 \text{ J}$.

In manchen Fällen wäre es zudem so, dass die Entropie („Wärme“) nach der Nutzung über eine geeignete Ergänzung des Systems/Prozesses zum Teil direkt oder über Entropie-/Wärmetauscher als Entropie-Quelle auf höherem Potential als dem Umgebungs-Temperaturniveau der Entropie-Pumpe (Wärmepumpe) wieder zugeführt werden könnte. Dies wäre insbesondere bei kontinuierlichen Prozessen gut möglich und würde so den Prozessleistungsbedarf weiter verringern.

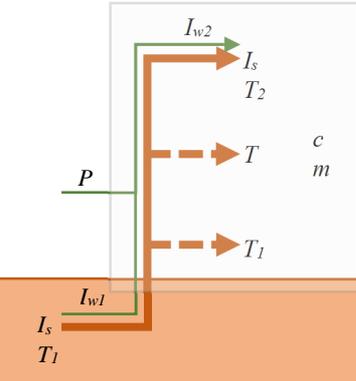
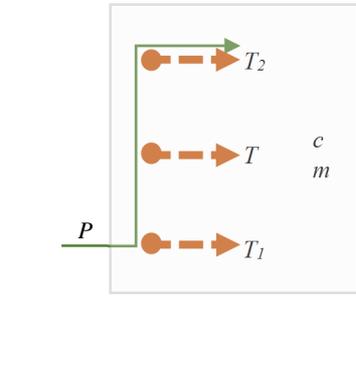
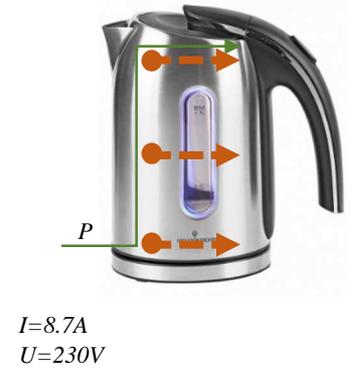
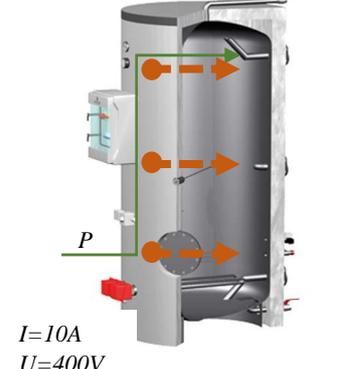
Es gibt jedoch Fälle, wo die Entropie mit sehr geringer Intensität das System leitungsartig über eine grosse Oberfläche verlässt und somit nicht mehr auf höherem, als dem Umgebungspotential zurückgeführt werden kann. Zum Beispiel bei einer Gebäudehülle während der Heizperiode, wo mittlere Entropieströme der Grössenordnung von $I_s = 0.01 \text{ W/K m}^2$ anfallen, bei typischem Potential von etwa $T = 290 \text{ K}$. In diesen Fällen gibt es nur die Devise die Entropieleitung so tief wie sinnvoll möglich zu halten, mit Entropie-/Wärmedämmung im Idealfall realisiert als doppelwandige, evakuierte, innenverspiegelte Hülle („Thermosflasche“) und diese Devise gilt selbstredend auch für alle Umhüllungen von Geräten und Räumen in die ungewollt Entropie über die Oberfläche hineinfliesen kann (Kühlräume, Kühlschränke etc.).

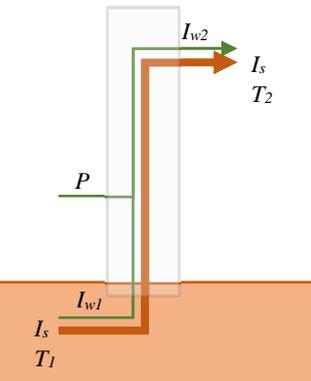
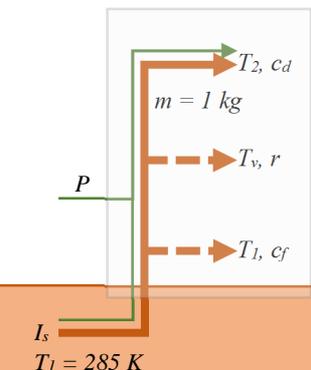
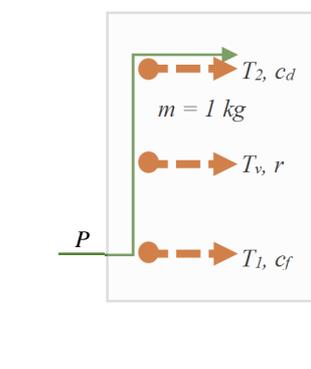
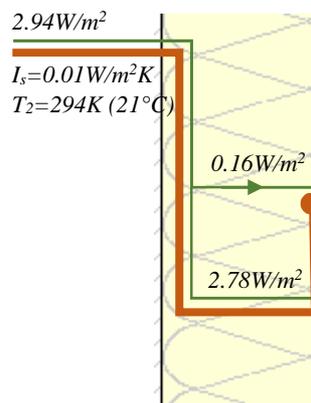
Hingegen gibt es gerade bei Gebäuden, aber auch bei industriellen Prozessen, vielfach die Möglichkeit einen Teil der Entropie nach dem eigentlichen, nutzbringenden Prozess, konvektiv, also getragen von Materie, wie Abluft, Brüden oder Abwasser etc. konzentriert auf höherem Niveau zu fassen und über Entropie-/Wärmetauscher zurückzuholen. Um wieder näher an unseren Wasserkocher zu kommen sei hier nur erwähnt, dass in gewerblichen Küchen, aber auch in einfachen Haushaltsküchen so genannte „Dampfzüge“ oder luftreinigende Umluftanlagen theoretisch gut geeignet wären, ergänzt mit einem Entropie-/Wärmetauscher und daran angeschlossener Entropie-Pumpe (Wärmepumpe), als Entropiequelle für einen Teil des hohen Entropiebedarfs in diesen Küchen zu dienen.

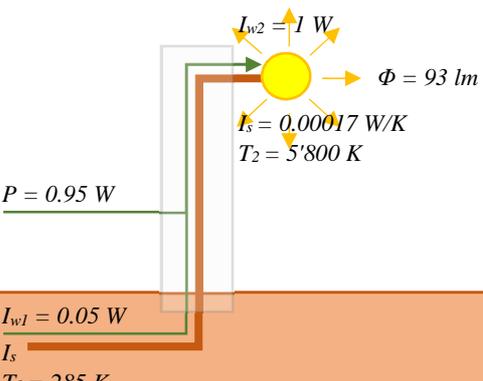
Übrigens gibt es in dieser Sache, der Nutzung von durch Abluft und Abwasser getragene Entropieströme, seit einiger Zeit Entwicklungen im Bereich Bäder und Duschanlagen etc., wo es wegen dem relativ tiefen Nutztemperaturniveau bei diesen Warmwasser-Hygiene-Anwendungen und dessen hoher Bedeutung beim Prozessenergiebedarf ein offensichtliches Interesse gibt. So wurden bereits kleine Kompaktinstallationen für Badezimmer entwickelt, welche die dortigen Abwasser- und Abluftströme nutzen und die damit getragenen Entropieströme mittels Entropie-Pumpe wieder auf Nutzungsniveau in einen ebenfalls in der Installation integrierten Warmwasserspeicher fördern.

Was bei unseren Wirkungsgrad-Betrachtungen betreffend die Nutzung, bzw. den Betrieb von Geräten und Prozessen nicht direkt einfliesst sind Herstellungsaufwendungen für die Produktion dieser Geräte und Einrichtungen (graue Energie, Umweltbelastungspunkte etc.). Diese Aspekte sind z.B. bei der Bestimmung der optimalen Entropie-/Wärmedämmung zu berücksichtigen. Was jedoch offensichtlich ist, ist die Tatsache, dass die Nutzungsdauer, bzw. der Lebenszyklus von Geräten und Prozesseinrichtungen ein hauptsächlicher Faktor bei solchen Beurteilungen darstellt und dass eine nachhaltige Wirtschaftsweise auf qualitativ hochstehende Produkte mit langer Lebensdauer ausgerichtet sein muss. Auch sollte die Stofftrennung und –wiederverwendung am Schluss einfach möglich sein.

Und das Ziel sollte ja sein, alle Produktionsprozessketten nach Massgabe des Isentropen Wirkungsgrades zu beurteilen und solche mit tief limitiertem Wirkungsgrad nahe bei 0 oder sogar < 0 rasch aufzugeben.

<p>Prozess: Entropie-Pumpen in Speicher</p> 	<p>Prozessleistung:</p> $P = I_s \cdot (T - T_1)$ <p>Prozessenergie (Vollladung):</p> $W_p = \Delta S \cdot (T_{med} - T_1)$ $W_p = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1 - T_1 \cdot \ln(T_2/T_1))$ <p>Mittleres Prozess-Potential:</p> $T_{med} = (T_2 - T_1) / \ln(T_2/T_1)$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{ideal}}$ $\eta_s = 100\%$
<p>Prozess: Entropie-Erzeugen im Speicher</p> 	<p>Prozessleistung:</p> $P = \text{konstant}$ <p>Prozessenergie (Vollladung):</p> $W_p = \Delta S \cdot T_{med}$ $W_p = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$ <p><i>Je höher das mittlere Potential (T_{med}), desto näher kommt das Entropie-Erzeugen dem idealen Entropie-Pumpen.</i></p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{erzeugen}}$ $\eta_s = 1 - \frac{T_1 \cdot \ln(\frac{T_2}{T_1})}{T_2 - T_1}$ $\eta_s = 1 - \frac{T_1}{T_{med}}$
<p>Prozess: Wasserkocher elektrisch</p>  <p>$T_2 = 373K$ (100°C)</p> <p>$T_1 = 285K$ (12°C)</p> <p>$c = 4'200 J/kg \cdot K$ $m = 1kg$</p> <p>$I = 8.7A$ $U = 230V$</p>	<p>Prozessleistung:</p> $P = 2'000 W$ <p>Prozessenergie:</p> $W_p = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$ $W_p = 370'000 J$ <p>Mittleres Prozess-Potential:</p> $T_{med} = 327 K$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{real}}$ $\eta_s = 1 - \frac{T_1}{T_{med}}$ $\eta_s = 13\%$
<p>Prozess: Wassererwärmer elektrisch</p>  <p>$T_2 = 335K$ (62°C)</p> <p>$T_1 = 285K$ (12°C)</p> <p>$c = 4'200 J/kg \cdot K$ $m = 300kg$</p> <p>$I = 10A$ $U = 400V$</p>	<p>Prozessleistung:</p> $P = 4'000 W$ <p>Prozessenergie:</p> $W_p = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$ $W_p = 63'000'000 J$ <p>Mittleres Prozess-Potential:</p> $T_{med} = 309 K$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{real}}$ $\eta_s = 1 - \frac{T_1}{T_{med}}$ $\eta_s = 7.8\%$

<p>Prozess: Entropie-Pumpe quasistationär</p> 	<p>Prozessleistung:</p> $P = I_s \cdot (T_2 - T_1)$ <p>Energieströme:</p> $I_{w1} = I_s \cdot T_1$ $I_{w2} = I_s \cdot T_2 \quad (I_{w2} = I_{w1} + P)$ <p>Idealprozess zur Förderung von Entropie über die Potentialdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$</p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = 100\%$
<p>Prozess: Entropie-Pumpen bis Dampf</p>  <p> $T_2 = 400 \text{ K (127°C)}$ $c_d = 2'000 \text{ J/kg·K}$ $m = 1 \text{ kg}$ $T_v = 373 \text{ K (100°C)}$ $r = 2'260 \text{ kJ/kg}$ $T_1 = 285 \text{ K (12°C)}$ $c_f = 4'200 \text{ J/kg·K}$ </p> <p> $I_s = 285 \text{ K}$ </p>	<p>Prozessleistung:</p> $P = I_s \cdot (T - T_1)$ <p>Prozessenergie:</p> $W_{p1} = c_f \cdot m \cdot (T_v - T_1 - T_1 \cdot \ln(T_v/T_1))$ $W_{pv} = r \cdot m \cdot (1 - T_1/T_v)$ $W_{p2} = c_d \cdot m \cdot (T_2 - T_v - T_1 \cdot \ln(T_2/T_v))$ <p> $W_p = W_{p1} + W_{pv} + W_{p2}$ $W_p = 595'000 \text{ J}$ </p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{ideal}}$ $\eta_s = 100\%$
<p>Prozess: Dampferzeuger elektrisch</p>  <p> $T_2 = 400 \text{ K (127°C)}$ $c_d = 2'000 \text{ J/kg·K}$ $m = 1 \text{ kg}$ $T_v = 373 \text{ K (100°C)}$ $r = 2'260 \text{ kJ/kg}$ $T_1 = 285 \text{ K (12°C)}$ $c_f = 4'200 \text{ J/kg·K}$ </p>	<p>Prozessleistung:</p> <p>$P = \text{konstant}$</p> <p>Prozessenergie:</p> $W_p = m \cdot (c_f \cdot (T_v - T_1) + r + c_d \cdot (T_2 - T_v))$ $W_p = 2'680'000 \text{ J}$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{Wp_{ideal}}{Wp_{real}}$ $\eta_s = \frac{595 \text{ kJ}}{2'680 \text{ kJ}}$ $\eta_s = 22\%$
<p>Prozess: Entropie-/Wärmedämmung</p>  <p> 2.94 W/m^2 $I_s = 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T_2 = 294 \text{ K (21°C)}$ 0.16 W/m^2 2.78 W/m^2 2.94 W/m^2 $0.0106 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T_1 = 278 \text{ K (5°C)}$ </p>	<p>Prozessleistung (ideal):</p> $P = 0.16 \text{ W/m}^2 \text{ (wie nutzen?)}$ <p>Potentialdifferenz und Entropie-Strom sind klein, also technisch kaum nutzbar und deswegen sollte der Entropiestrom minimiert werden.</p> <p>Entropieproduktionsrate (real):</p> $\Pi = P / T_1 = 0.16 \text{ W/m}^2 / 278 \text{ K}$ $\Pi = 0.0006 \text{ W/m}^2\text{K}$	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{real}}{P_{ideal}}$ $\eta_s = \frac{0 \text{ W/m}^2}{0.16 \text{ W/m}^2}$ $\eta_s = 0\%$

<p>Prozess: „Entropie-Erleuchtung“</p>  <p>$I_{w2} = 1 \text{ W}$ $\Phi = 93 \text{ lm}$ $I_s = 0,00017 \text{ W/K}$ $T_2 = 5'800 \text{ K}$ $P = 0,95 \text{ W}$ $I_{w1} = 0,05 \text{ W}$ I_s $T_1 = 285 \text{ K}$</p>	<p>Prozessleistung:</p> <p>$P = 10,2 \text{ mW/lm}$</p> <p>Lichtausbeute:</p> <p>$\varrho = 98 \text{ lm/W}$</p> <p>Der maximal mögliche Wert beträgt 683 lm/W (nämlich für monochromatische Strahlung der Wellenlänge 555 nm).</p>	<p>Wirkungsgrad:</p> $\eta_s = \frac{P_{ideal}}{P_{real}}$ $\eta_s = \frac{1,46 \text{ mW/lm}}{10,2 \text{ mW/lm}}$ <p>$\eta_s = 14\%$</p>
--	---	---

Zum Abschluss wollen wir, rein theoretisch und als nicht ganz ernst gemeinte Abrundung unserer Betrachtungen, Entropie von unserem irdischen Niveau wieder auf das Potential der Sonne hinaufpumpen und so eine künstliche Sonne erzeugen. Wir pumpen also einen Entropiestrom vom Ausgangsniveau $T_1 = 285 \text{ K}$ auf $T_2 = 5'800 \text{ K}$ und lassen auf diesem, der Photosphäre unserer Sonne entsprechenden, Temperatur-Potential einen idealen schwarzen Strahler leuchten.

Gemäss Wikipedia [Photometrisches Strahlungsäquivalent für Plancksche Strahler verschiedener Temperatur] erreicht ein solcher Strahler eine Lichtausbeute von $\varrho = 93 \text{ lm/W}$. Da ein solcher schwarzer (Planckscher) Strahler mit seinem relativ breiten, kontinuierlichen Spektrum Wellenlängen enthält die für unser Auge nicht sichtbar sind, erreicht die „Entropie-Erleuchtung“ nur einen Wirkungsgrad von $\eta_s = 14\%$.

Die vom Tagesehen unseres Auges abgeleitete Bewertungskurve für die Lichtstrom-Bestimmung hat ein Maximum bei einer Wellenlänge von $\lambda = 555 \text{ nm}$, weswegen nur ein Leuchtmittel mit monochromatischer Strahlung genau dieser Wellenlänge die theoretisch maximale Lichtausbeute von $\varrho = 683 \text{ lm/W}$ erreichen könnte.

Wir kennen solch monochromatisches, unangenehmes Licht gut von den früher oft angewendeten Natriumdampflampen der Strassenbeleuchtung, welche bei einer Wellenlänge von $\lambda = 590 \text{ nm}$ das intensiv gelbe Licht abgeben. Die Natriumdampflampen gehören seit längerer Zeit zu den effizientesten Leuchtmitteln ($\varrho = 150\text{-}200 \text{ lm/W}$).

Heutige, marktgängige LED-Leuchtmittel erreichen Lichtausbeuten im Bereich $\varrho = 80\text{-}150 \text{ lm/W}$.

Quellenangaben:

^[1] KPK: Karlsruher Physikkurs (kurz: KPK) ist ein von Physikdidaktikern (insbesondere Gottfried Falk, Wolfgang Ruppel, Friedrich Herrmann) am Institut für Didaktik der Physik der Universität Karlsruhe ausgearbeiteter Vorschlag zur Neustrukturierung des Physikunterrichts in Schule und Hochschule. Darüber hinaus hat auch der Physiko-Chemiker Georg Job wichtige Beiträge zu diesem Kurs geliefert.

^[2] SystemPhysik, insbesondere von Prof. Werner Maurer ZHAW: Die Physik der dynamischen Systeme (Kurzbezeichnung SystemPhysik) baut auf dem Karlsruher Physikkurs auf, benutzt die systemdynamische Modellierungstechnik und orientiert sich an der mathematischen Sprache der Kontinuumsphysik. Bilanz, Rolle der Energie und konstitutive Beziehungen bilden das Fundament dieses mehr methodisch denn historisch orientierten Ansatzes.

Dazu gibt es viele Videoaufzeichnungen mit anschaulichen, animierten Grafiken.