



Jan Erik Körner (Autor)

Niedertemperatur-Abwärmenutzung mittels Organic-Rankine-Cycle im mobilen Einsatz



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6429>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



Kapitel 1

Einleitung

Seit mittlerweile 125 Jahren werden PKW von Verbrennungsmotoren angetrieben. Neben einer Perfektion der Technik standen im Laufe der Zeit verschiedenste Maxime bei der Weiterentwicklung neuer Motoren im Lastenheft. In den 70er Jahren waren für die Motorenentwickler Leistungs- und Komfortsteigerungen Triebfedern für Neuentwicklungen, zu Beginn der 90er Jahre war es die Reduzierung der Emissionen. Spätestens jedoch seit Verabschiedung der Agenda 21 und des Kyoto-Protokolls sind es die Treibhausgase und in Zukunft wird es die Verknappung der fossilen Energieträger sein [FBK⁺, HESS06]. Ein zusätzlicher Antrieb wird von der Bundesregierung durch die neue Kraftfahrzeugsteuer gegeben, welche 2009 in Kraft trat und neben Hubraum, Emissionsklasse und Treibstoffart jetzt auch den CO₂-Ausstoß berücksichtigt und besteuert [Reg11].

Auf die Forderung nach einer Effizienzsteigerung des Antriebes erfolgten Entwicklungen zur Optimierung von Verbrennung und Gemischbildung, als auch Maßnahmen zur Reduzierung der Reibung und Optimierung des Antriebsstranges [BS05]. Dem motorischen Wirkungsgrad sind jedoch konzeptbedingte Grenzen gegeben, so dass dessen Wirkungsgrad eine maximale Größe von ca. 40% erreichen kann [BS05]. Die restliche, dem Motor über den Kraftstoff zugeführte Energie, geht ungenutzt über Abgas und Kühlmittel in Form von Wärme an die Umgebung verloren [Lie09]. Maßnahmen der direkten Nutzung thermischer Energie zum Beheizen des Fahrzeuginnenraums, ja sogar des Beheizens einzelner Fluide und Komponenten im Antriebsstrang und eine hiermit verbundene Minimierung der Reibleistung stellen den Stand der Technik dar und werden lediglich noch bezüglich einer geschickten Wärmeverteilung optimiert [BAYJ09, TT07, Hep11]. Diese haben jedoch ausschließlich während der Warmlaufphase, bzw. bei geringen Außentemperaturen einen Nutzen. Eine Wandlung der motorischen Abwärme in höherwertige Energieformen offeriert ein deutlich höheres Potential, den Kraftstoffverbrauch dauerhaft zu reduzieren. Die folgenden Energieformen sind in heutigen Kraftfahrzeugen von Bedeutung:

- mechanische Energie (zur Entlastung des Antriebsmotors oder zur Wandlung in elektrische Energie mittels Generator)
- elektrische Energie (zum Antrieb bei Hybridfahrzeugen und zur Entlastung des Bordnetzes)
- Wärme (zum Beheizen der Fahrgastzelle und von Komponenten des Antriebsstranges)
- Wärme (in Form von Kälte zur Klimatisierung der Fahrgastzelle und zum Kühlen von Komponenten des Antriebsstranges)

Die energetischen Verluste des Verbrennungsmotors teilen sich zu etwa gleichen Teilen auf das Kühlwasser und auf das Abgas auf [BS05, Hey89]. Die Abbildungen 1.1 und 1.2 zeigen den Abgastemperaturverlauf entlang des Abgasstranges von Fahrzeugen mit identischen Karossen und unterschiedlichen Motorisierungen bei jeweils konstanten Geschwindigkeiten von 50, respektive 130 km/h. Die thermische Energie des Abgases ist sowohl beim Otto-, als auch beim Dieselmotor betragsmäßig etwa gleich groß, sie unterscheiden sich jedoch in den Temperaturen stark. Entlang des Abgasstranges nimmt die Temperatur zudem aufgrund von Konvektions- und von Strahlungsverlusten stark ab.

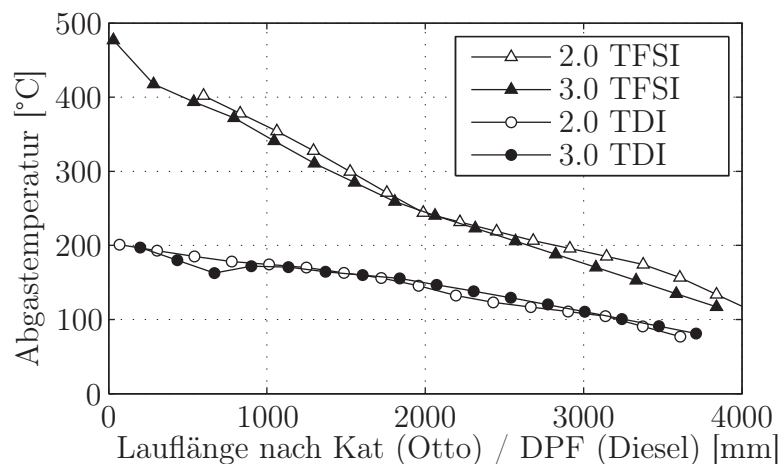


Abbildung 1.1 – Abgastemperaturen verschiedener Fahrzeuge / Motorisierungen bei 50 km/h Konstantfahrt entlang des Abgasstranges, gemessen bei 13°C Umgebungstemperatur

Betrachtet man im Vergleich zum Abgas das Kühlwasser, mit einer Betriebstemperatur von 90–105°C, so ist offensichtlich, dass die absolute Exergie des Abgases deutlich höher ist, als die des Kühlwassers und ein mittels Kühlwasserwärme angetriebener Energiewandlungsprozess gemäß Carnot, einen geringeren thermischen Wirkungsgrad haben muss. Die Wandlung der thermischen Energie des Abgases in höherwertige Energieformen scheint somit günstiger.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren der Wandlung von thermischer in höherwertige Energie diskutiert. Die wohl scharmanteste ist die direkte Wandlung in

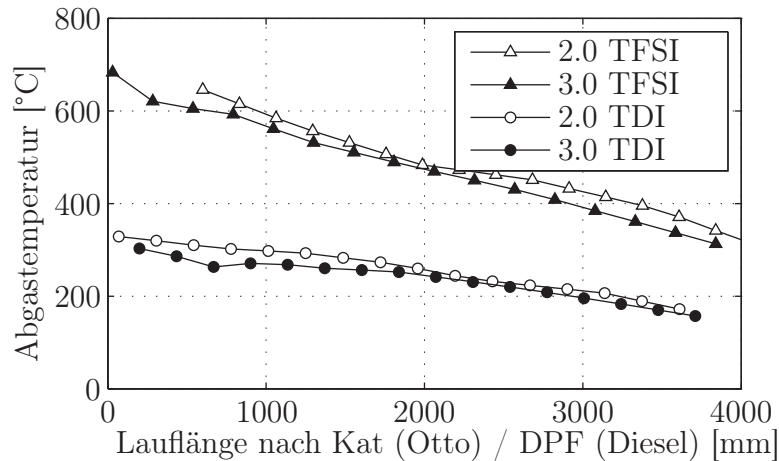


Abbildung 1.2 – Abgastemperaturen verschiedener Fahrzeuge / Motorisierungen bei 130 km/h Konstantfahrt entlang des Abgasstranges, gemessen bei 13°C Umgebungstemperatur

elektrische Energie mittels Seebeck-Effekt, da die Konvertierung von Wärme in elektrischen Strom ohne bewegliche Teile und allein aufgrund materialintrinsischer Eigenschaften erfolgt [DRHS09]. Es werden hierbei unterschiedlich dotierte in Reihe verschaltene Halbleiter zwischen zwei Keramikelementen angeordnet. Die eine Keramik wird direkt oder indirekt durch das Abgas beheizt, die andere mittels Wasser oder Luft gekühlt und an den Enden der Reihenschaltung kann elektrischer Strom abgegriffen werden.

Allen gemein ist, dass sich seitens der Halbleiter nur bei konstanten, und werkstoffabhängig optimalen Temperaturen auf Hoch- und Niedertemperaturseite maximale Wirkungsgrade ergeben. Des weiteren sind die Module je nach verwendetem Halbleiter nur eingeschränkt thermisch stabil und verlieren bei Überhitzung ihre thermoelektrischen Eigenschaften [EHH09]. Für komplett integrierte Systeme wurden bisher Wirkungsgrade von 3,9–11% am Nennauslegungspunkt ermittelt [EHH09, DRHS09, BLL⁺09, Wei09]. In einem Versuchsaufbau von [ML09] wurden Systemwirkungsgrade bei durchschnittlichen Fahrzyklen von maximal 3% erzielt. Bislang stehen einem wirtschaftlichen Einsatz im PKW die hohen Kosten der seltenen Erden und die komplexen Produktionsprozesse entgegen [Pat08, Boe08].

Eine weitere, aber weniger intensiv diskutierte Möglichkeit ist die Erzeugung von Kälte. Im automotiven Bereich wird hier insbesondere das Verfahren von Adsorptionskälteanlagen diskutiert. In [Gra08] wird die Integration eines Zweibettadsorbens in einen PKW dargestellt. Der erzielte coefficient of performance (COP) liegt hierbei im Bereich von 0,3–0,4. Als spezifische Leistung sind hier Werte von 2–3 dm³/kW Adsorbens angegeben. In [BKL09] werden, je nach Adsorbens, spezifische Kälteleistungen von 20–70 W/dm³ und ein COP von 0,15 angegeben. Diese geringen Leistungsdichten führen in

der Praxis für nutzbare Kühlleistungen zu Anlagenvolumina $>50\text{l}$, was in einem PKW aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich integrierbar ist.

Eine aus heutiger Sicht viel versprechende Möglichkeit zur Wandlung von Abwärme in höherwertige Energie ist mit Hilfe von thermodynamischen Kreisprozessen, wobei hier insbesondere der Organic-Rankine-Cycle (ORC) zum Tragen kommt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode herzuleiten, die es dem Entwickler ermöglicht, einen ORC für ein Kfz auszulegen und letztendlich zu realisieren. Die für einen thermodynamischen Kreisprozess erforderlichen Randbedingungen werden definiert, wobei hier insbesondere Augenmerk auf die besonderen Umstände im Kfz gelegt wird. Es wird ein Prozess vorgestellt der es ermöglicht, unter gegebenen Randbedingungen, die letzten Freiheitsgrade bezüglich der Prozessführung hinsichtlich eines maximalen Prozesswirkungsgrades auszuschöpfen. Es werden mehr als 30 für Kreisprozesse geläufige Medien auf Basis von Berechnungen verglichen und bewertet.

Für einen konkreten Anwendungsfall erfolgt die Umsetzung eines ausgewählten Prozesses, wobei hier insbesondere auf die Auslegung von Komponenten und des Gesamtsystems eingegangen wird. Der Prozess wird stationär am Prüfstand vermessen und sowohl energetisch, als auch exergetisch bilanziert. Neben der stationären Vermessung des Prozesses erfolgt eine dynamische Vermessung, mit der ein erster Ansatz einer Regelung vorgestellt wird. Es werden die Potentiale zur Rückgewinnung der Abgaswärme aufgezeigt, als auch die vorhandenen Schwachstellen und Verbesserungspotenziale des Kreisprozesses. Ein besonderer Augenmerk wird auf die Besonderheiten der Integration eines Dampfkraftprozesses in einem PKW gelegt, wobei der abgasseitige Druckverlust nicht betrachtet wird.



Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Hauptsätze der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt das Prinzip der Erhaltung der Energie. Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße, die Energie E , wobei diese sich aus der Summe aus innerer Energie U , kinetischer Energie E_{kin} , potentieller Energie E_{pot} , elektrischer Energie E_{el} , nuklearer Energie E_{nuk} , Gravitationsenergie E_{grav} und chemischer Energie E_{chem} berechnet. Die Energie eines Systems kann sich nur durch Energietransport über die Systemgrenze ändern. [BK06]

Für die Energie gilt ein Erhaltungssatz. Die allgemeine Form des 1. Hauptsatzes als Leistungsbilanz für ein offenes, thermodynamisches, instationäres System mit der Gesamtenergie E lautet gemäß [Kab06]:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum P + \sum_{\text{ein}} \dot{m}_e \left(h + \frac{w^2}{2} + g \cdot z \right)_e - \sum_{\text{aus}} \dot{m}_a \left(h + \frac{w^2}{2} + g \cdot z \right)_a \quad (2.1)$$

In Worten besagt diese Gleichung, dass sich die zeitliche Änderung der Energie E eines offenen Systems durch die Summe aller dem System zugeführten Wärmestrom- und Leistungsterme (mechanische und elektrische) und die mit den eintretenden (Index e) und austretenden (Index a) Massenströmen mitgeführte Energie ergibt. Ändert sich das Volumen des Bilanzraumes mit der Zeit, muss auch Volumenänderungsleistung berücksichtigt werden. Ein dem System zugehender Wärmestrom \dot{Q} bzw. zugehende Leistung P wird positiv gewertet, abgehende negativ [Kab06].

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik: Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße Entropie S . Die Entropie eines Systems ändert sich gemäß [BK06]:

- durch Wärmetransport über die Systemgrenze
- durch Stofftransport über die Systemgrenze

- durch irreversible Prozesse im Inneren des Systems (Entropieerzeugung), das sind insbesondere Wärmeübergang bei endlicher Temperaturdifferenz und Reibung.

Die Entropie ist daher keine Erhaltungsgröße. Die mit der Wärmeenergie dQ über die Systemgrenze transportierte Entropie dS_Q berechnet sich gemäß Gleichung 2.2. Hierbei ist T die thermodynamische Temperatur an der Stelle der Systemgrenze, an der dQ übergeht.

$$dS_Q = \frac{dQ}{T} \quad (2.2)$$

Die allgemeine Entropiebilanz für ein offenes instationäres System lautet gemäß [Luc07]:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{\text{ein}} (\dot{m}_e \cdot s_e) - \sum_{\text{aus}} (\dot{m}_a \cdot s_a) + \dot{S}_{\text{irr}} \quad (2.3)$$

Die durch irreversible Prozesse im Inneren des Systems erzeugte Entropie S_{irr} ist niemals negativ. Sie ist für reversible (ideale) Prozesse des Systems null. Mechanische und elektrische Energie sind am Entropietransport nicht beteiligt und erweisen sich als entropiefreie Energien.

2.2 Exergie und Anergie

Ableitend aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich der Begriff der Exergie E_{Ex} definieren. Sie ist der Anteil der Energie, welcher sich in jede andere Energieform, insbesondere Arbeit wandeln lässt, wenn das System in einen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung gebracht wird. Sie setzt sich zusammen aus uneingeschränkt wandelbaren Energien, wie z. B. mechanischen Energien, sowie allen Formen der Arbeit und aus bedingt wandelbaren Energien, wie z. B. der Wärme und der thermischen inneren Energie eines Stoffstromes. Die Exergie ist keine Erhaltungsgröße und stets abhängig von den Bezugsgrößen, zumeist der Umgebungstemperatur und der Temperatur des betrachteten Energiestromes [Luc07, BK06].

Der nicht wandelbare Teil der Energie wird als Anergie E_{An} bezeichnet. Die Summe aus Exergie und Anergie entspricht der Energie. Bei der Wandlung von Energie wird stets Exergie in Anergie gewandelt. Hat ein System keine Exergie, sondern nur noch Anergie, so ist es nicht mehr im Stande, Arbeit zu verrichten oder Wärme zu transportieren.

$$E = E_{\text{Ex}} + E_{\text{An}} \quad (2.4)$$

Unabhängig von der Umgebung in andere Energieformen wandelbare Größen sind die technische Arbeit, Nutzarbeit, potentielle Energie, kinetische Energie und elektrische Energie. Wärme ist nur bedingt wandelbar und besteht aus Exergie und Anergie.



Die Exergie eines Stoffstromes berechnet sich durch Anwendung des ersten und zweiten Hauptsatz gemäß [BK06] mit der Umgebung (Index U) als Referenz zu:

$$e_{\text{Ex}} = (h - h_{\text{U}}) - T_{\text{U}} \cdot (s - s_{\text{U}}) + \left(\frac{w^2}{2} - \frac{w_{\text{U}}^2}{2} \right) + g \cdot (z - z_{\text{U}}) \quad (2.5)$$

Hierbei ist die Exergie der Wärme anhand der mittleren Temperatur T_{m} , bei der der Wärmestrom übertragen wird definiert:

$$\dot{E}_{\text{Ex,Q}} = \left(1 - \frac{T_{\text{U}}}{T_{\text{m}}} \right) \cdot \dot{Q} \quad (2.6)$$

2.3 Thermodynamische Zustandsänderungen

Anhand von erstem und zweitem Hauptsatz lassen sich die Wechselwirkungen eines Systems mit seiner Umgebung berechnen. Bedingt durch diese Wechselwirkungen erfolgen Änderungen des Zustandes. In Tabelle 2.1 sind die aus den Hauptsätzen abgeleiteten Beziehungen für verschiedene Zustandsänderungen bezüglich spezifischer Wärme q_{12} , spezifischer technischer Arbeit $w_{t,12}$ und spezifischer Volumenänderungsarbeit w_{12} gelistet.

Tabelle 2.1 – Thermodynamische Zustandsänderung realer Gase und Dämpfe [Gie89]

Zustands- änderung Konstante	spez. Wärme q_{12}	spez. techn. Arbeit $w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp$	spez. Volumen- änderungsarbeit $w_{12} = - \int_1^2 p \, dv$
Isobare $p = \text{const.}$	$h_2 - h_1$	0	$p(v_1 - v_2)$
Isochore $v = \text{const.}$	$(h_2 - h_1) - v(p_2 - p_1)$	$v(p_2 - p_1)$	0
Isotherme $T = \text{const.}$	$T(s_2 - s_1)$	$(h_2 - h_1) - T(s_2 - s_1)$	$(h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$
Isentrope $s = \text{const.}$	0	$h_2 - h_1$	$(h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$