

DKV-Forschungsbericht Nr. 18

Bernd Schultz

Rankine-Prozesse zur Abwärmenutzung bei
Verbrennungsmotoren

(auch als CD erhältlich!)

1986

978-3-922429-17-3



Kurzfassung

Rankine-Prozesse dienen der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie. Ein wesentliches Kriterium für die Güte dieses Prozesses ist die Wahl eines geeigneten Arbeitsmittels. Bei hohen Temperaturen und großen Leistungen bietet das Arbeitsmittel Wasser die günstigsten Voraussetzungen und kommt demzufolge in allen Dampfkraftwerken zum Einsatz. Zur Nutzung von Abwärmequellen mittels eines Rankine-Prozesses können organische Arbeitsmittel aber durchaus besser geeignet sein. In diesem Fall spricht man auch von einer ORC-Anlage (Organic-Rankine-Cycle). Als Wärmequelle für alle vorliegenden Untersuchungen dient dabei die thermische Energie im Abgas von Verbrennungsmotoren.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird über die Auswahl von geeigneten Arbeitsmitteln berichtet. In Form einer umfangreichen Literaturrecherche erfolgte eine erste Vorauswahl, wobei ca. 200 Arbeitsmittel ausgesucht wurden. Mit Hilfe eines Anforderungsprofils und einem dazu aufgestellten Kriterienkatalog konnte die Anzahl der in Frage kommenden Arbeitsmittel auf zwanzig reduziert werden. Zahlreiche Prozeßberechnungen ermöglichen die Beurteilung des Einflusses der verschiedenen Prozeßparameter und eine weitere Reduzierung der für die vorliegende Anwendung in Frage kommenden Arbeitsmittel. Dabei zeigte sich, daß grundsätzlich nur Arbeitsmittel der Stoffgruppen Benzolderivate und Mischungen von Wasser mit organischen Arbeitsmitteln in Frage kommen. Bei den Benzolderivaten eigenensich dabei besonders die hochfluorierten Stoffe und als Mischungspartner von Wasser Pyridin, Methyl-Pyridin und Trifluorethanol. Da einige interessante Stoffe momentan noch nicht in ausreichender Menge verfügbar sind, wurden für die Messungen in einer Versuchsanlage die Stoffe Wasser, Wasser/Pyridin, Hexafluorbenzol und Fluorinol 85 ausgewählt.

Nach der Auswahl von geeigneten Arbeitmitteln wurden im zweiten Teil dieser Arbeit umfangreiche Messungen an einer realen Versuchsanlage durchgeführt. Bei der Lage der Meßpunkte wurde das gesamte interessierende Zustandsgebiet berücksichtigt. Mit Hilfe dieser Messungen konnten die praktische Handhabung, die Wärmeübertragungseigenschaften und der Einfluß der Prozeßparameter auf den Anlagennutzungsgrad für die vier oben genannten Arbeitsmittel bestimmt werden. Zusätzliche Temperaturmessungen am Verdampfer zeigten, daß die in dieser Arbeit verwendeten Wärmeübertragungsgleichungen nicht nur für Wasser geeignet und anwendbar sind, sondern auch für die hier eingesetzten organischen Arbeitsmittel.

Das wichtigste Ergebnis der Untersuchung des Einflusses der verschiedenen äußeren Randbedingungen ist die maximal mögliche Ausnutzung der Wärmequelle Abgas im Verdampfer, die sich in dem sogenannten Einbindungswirkungsgrad wiederspiegelt. Die minimal zulässige Abgastemperatur ist eine der Grenzen, die den möglichen Betriebsbereich einer ORC-Anlage

bestimmt. Diesem Umstand ist bei der Auslegung des Verdampfers, insbesondere für ORC-Anlagen mit einem großen Leistungsbereich, Rechnung zu tragen. Außerdem konnte aufgezeigt werden, daß eine wirtschaftlich optimale Auslegung schon mit niedrigen Verdampfungsdrücken zu erreichen ist, und daß auch eine optimale Überhitzung des Arbeitsmitteldampfes nicht identisch ist mit der maximal möglichen Überhitzung.

Im dritten Teil der Arbeit wurde mit Hilfe von Rechenprogrammen der tatsächliche Nutzen eines Rankine-Prozesses für die verschiedenen Verbrennungsmotoren bestimmt. Für die Motoren in Personenkraftwagen sind die Voraussetzungen für die wirtschaftliche Anwendung, aufgrund der sehr wechselhaften Betriebsweise und dem unstetigen Wärmeanfall, wahrscheinlich niemals gegeben. Für Motoren in Lastkraftwagen liegen die erzielbaren Kraftstoffeinsparungen im Bereich zwischen 6 und 8 % der eingesetzten Kraftstoffmenge und die berechneten Amortisationszeiträume zwischen 8 und 12 Jahre, also immer deutlich oberhalb des Nutzungszeitraums der Motoren. Damit ist ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Anlagen momentan nicht sehr wahrscheinlich. Nachteilig wirkt sich bei Lastkraftwagen die Notwendigkeit aus, die im Kondensator frei werdende Wärme an die Luft abgeben zu müssen. Verbunden mit einem nur begrenzten Platzangebot für den Kondensator sind sehr hohe Kondensationstemperaturen notwendig und außerdem muß der Energiebedarf für den Antrieb des Ventilators oder zur Überwindung des zusätzlichen Druckverlustes berücksichtigt werden. Dieser beträgt, je nach Auslegung, zwischen 5 und 15 % der eigentlichen Turbinenleistung. Für ORC-Anlagen bei Schiffs-Motoren und Stationär-Motoren zeigte sich, daß diese Anlagen sich innerhalb des Nutzungszeitraums der Motoren amortisieren, daß heißt also, heutzutage schon wirtschaftlich eingesetzt werden könnten. Dies gilt insbesondere für Motoren mit großen Leistungen und langen Laufzeiten pro Jahr. Für den Einsatz bei Schiffsmotoren ergeben sich Amortisationszeiträume von 2 bis 4 Jahren und bei Stationärmotoren teilweise sogar Werte unter einem Jahr.

Die Frage nach dem am besten geeigneten Arbeitsmittel konnte nicht allgemein und für alle Anwendungen gleichlautend beantwortet werden. Jedes der hier vorgestellten Arbeitsmittel ist für einen gewissen Teilbereich besonders gut geeignet, wobei, neben der Temperatur und dem Wärmestrom der thermischen Energie im Abgas, die eventuell vertretbare Toxizität und die maximal zulässige Dampfnässe am Austritt der Expansionsmaschine die wichtigsten Entscheidungskriterien darstellen. Faßt man die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen, so kann man sagen, daß je nach zulässiger Dampfnässe, das Arbeitsmittel Wasser bei Abgastemperaturen über 350-450°C immer noch die beste Lösung darstellt. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Toxizität bei der Wahl des Arbeitsmittels eine wesentliche Rolle spielt. Bei den niedrigen Abgastemperaturen zwischen 200 und 350°C, wie sie bei Schiffs- und Stationärmotoren vorliegen, ist Wasser als Arbeitsmittel völlig ungeeignet. Von den untersuchten organischen Arbeitsmitteln ist Hexafluorbenzol für alle Anwendungen am besten geeignet. Die Gründe dafür sind die sehr geringe Toxizität und die günstigen Voraussetzungen für den Einsatz einer einfachen Expansionsmaschine. Aufgrund des kleineren Flächenbedarfs für die Wärmeaustauscher ergeben sich für Flurinol 85 etwas günstigere Amortisationszeiträume, doch der Abstand zu Hexafluorbenzol ist so gering, daß man dann dem Stoff den Vorzug geben sollte, der die größere Einsparung bietet und weniger giftig ist.