

Aufgabenstellung und Herausforderung bei der Betriebsführung von Systemen zur Abwärmenutzung mit Rankine- Prozessen

Autoren:

Jörg Collisi
Geschäftsführer

Christian Neißé
Bereichleiter ESYS

Amovis GmbH
Voltastraße 5
13355 Berlin

24.11.2011

Abstract

Die Energierückgewinnung aus der Abwärme stellt einen innovativen Schritt auf dem Weg zur Wirkungsgradoptimierung von Verbrennungskraftmaschinen dar. Bei den meisten Betrachtungen liegt dabei der Fokus auf einer optimalen anlagentechnischen Auslegung und der konstruktiven sowie verfahrenstechnischen Herausforderung. Nur selten wird beim Blick auf die potentielle Anlage die Frage nach Steuer- und Regelbarkeit oder gar der Betriebsführung gestellt. Dabei kann gerade diese Betrachtung Hinweise auf erforderliche Größenordnungen der Komponenten sowie notwendige Stell- und Messeinrichtungen zur Beherrschung des Gesamtprozesses geben.

Neben der Identifikation der Mess-, Stell- und Regelgrößen soll im Folgenden erläutert werden, welche speziellen regelungstechnischen Anforderungen beim Betrieb von Abwärmenutzungsanlagen (AWN) bestehen.



HAUS DER TECHNIK

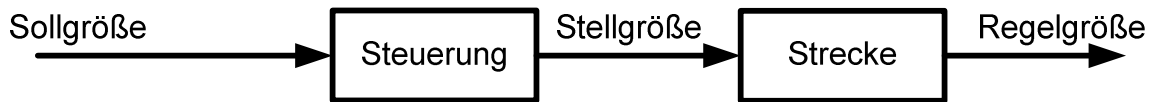
Außeninstitut der RWTH Aachen
Kooperationspartner der Universitäten Duisburg-Essen
Münster - Bonn - Braunschweig



Begriffsklärung

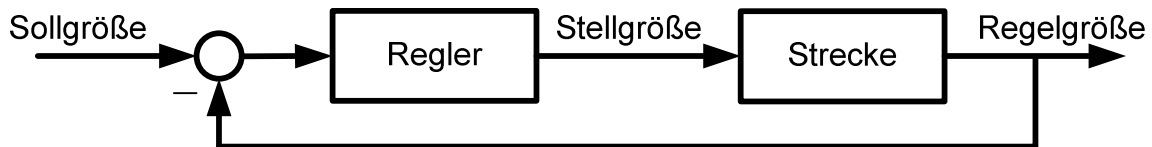
Um ein gemeinsames Fundament zu haben, sollen die verwendeten Termini kurz besprochen werden.

Steuerung:



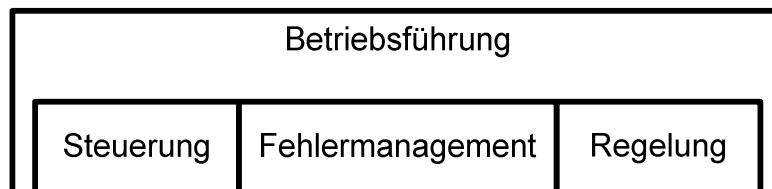
Eine Steuerung ist gekennzeichnet durch eine offene Wirkungskette. Sie ist nicht in der Lage auf Störgrößen zu reagieren.

Regelung:



Eine Regelung ist gekennzeichnet durch einen geschlossenen Regelkreis. Durch Rückführung der Regelgröße und Vergleich mit dem Sollwert ist ein Ausgleichen von Störeinflüssen möglich.

Betriebsführung:



Die Aufgabe der Betriebsführung ist es, die unterlagerten Funktionalitäten wie Steuerungen, Regelungen oder auch das Fehlermanagement unter einer Intelligenz zu vereinen. Sie überwacht den Systemzustand und stellt in dessen Abhängigkeit die Sollwerte für die Regel und Steuergrößen zur Verfügung.

Anforderungen bei mobilen und stationären Systemen

Um zu verstehen, welche Anforderungen an eine Automatisierung für ein AWP-System bestehen, sollte man sich zunächst überlegen, wie die zur Verfügung stehende Wärmequelle betrieben wird. Es lassen sich dabei grundsätzlich zwei Betriebsarten unterscheiden: stationärer und dynamischer Betrieb.

Ersteren findet man vornehmlich in ortsfesten Anlagen wie z.B. BHKWs sowie einigen mobilen Anwendungen z.B. Schiffsantrieben. Die Betriebsweise ist geprägt durch wenige oder langsame Lastwechsel sowie längere Beharrungszustände.

Letzterer ist vornehmlich in mobilen Anwendungen wie Straßenfahrzeugen oder teilweise auch Baumaschinen anzutreffen. Hier wechseln Lastpunkt in schneller Folge, so dass unter

Berücksichtigung gängiger Testfahrzyklen (NEFZ) für eine AWN-Anlage kein Beharrungszustand erreicht werden kann.

Diese Basisunterscheidung hat Auswirkungen auf alle drei Elemente der Steuerungssoftware sowie auf die Auswahl von Mess- und Stelltechnik (Stichwort: Fahrzeugtauglichkeit). Daneben spielen noch Faktoren wie mechanische Belastung, package- oder Gewichtsbeschränkungen sowie die Art der Energieeinspeisung eine Rolle.

Aufbau einer Basis-AWN-Anlage

Wenn man sich das Schema des Clausius-Rankine-Prozesses ansieht, fällt es auf den ersten Blick leicht, die notwendigen Baugruppen und Geräte zu benennen, um eine einfache AWN-Anlage aufzubauen. Mit dem Fokus der Prozessbeeinflussung kommen jedoch noch Mess- und Stellglieder sowie ein Steuergerät dazu.

Bereits in der Anfangsphase einer AWN-Anlagenplanung sollte man sich die Frage nach der Einkoppelbarkeit der rückgewonnenen Energie stellen. Dabei ist vorrangig das Ziel der Abwärmenutzung zu hinterfragen. Möchte ich Brennstoffersparnis erreichen oder aber Mehrleistung generieren.

Mechanische Einkopplung

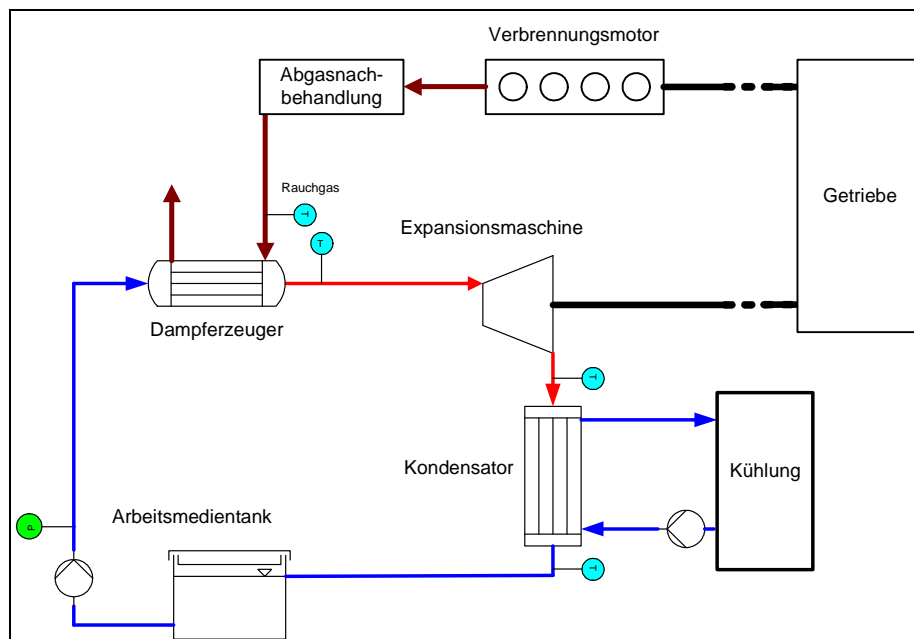


Bild 1

Insbesondere beim ersten Punkt ist eine mechanische Wiedereinkopplung (Bild 1) oft der sinnvollere Weg, da hier der Verbrennungsmotor direkt mit zusätzlichem Moment unterstützt werden kann und keine weiteren Wandlerverluste auftreten. Jedoch kann es notwendig sein diese „neue“ Momentenquelle in der Funktionsentwicklung des Motormanagements zu berücksichtigen (Momentenmanager) und beispielsweise den Verbrennungsmotor auf einen niedrigeren Lastpunkt zu regeln. Wird das zusätzliche Moment dem Motorsteuergerät nicht mitgeteilt, so ist in diesem Fall der Fahrer gefordert, über die Pedalstellung die notwendige Änderung vorzunehmen.

Aufgrund der immer vorhandenen Trägheiten und der Zeitvarianz im AWN-System steht dieses zusätzliche Moment nicht zuverlässig zur Verfügung, so dass gerade in punkto Fahrkomfort für den Fahrer ein nicht deterministisches Fahrzeugverhalten auftritt. Darüber

hinaus sind anlagentechnisch Vorkehrungen zu treffen, die eine Unterbrechung des Kraftschlusses ermöglichen, wenn gar kein zusätzliches Moment benötigt wird bzw. dieses sogar schädlich wäre. Dies tritt beispielsweise während einer Bergabfahrt unter Schubabschaltung des Verbrennungsmotors oder auch beim Bremsen vor einem Hindernis oder einer Kreuzung auf.

Abhilfe können hier Lasttrennstellglieder sowohl auf der Arbeitskreisseite (Ventile) als auch mechanische Kupplungen zwischen Expander und Getriebe schaffen. Mit Hilfe dieser Stelleinrichtungen ist die Unterbrechung der Momenteinkopplung möglich.

Weiterhin ist zu beachten, dass bei starrer Kopplung der Arbeitspunkt der Expansionsmaschine stets von der Verbrennungsmotordrehzahl abhängt.

Elektrische Einkopplung

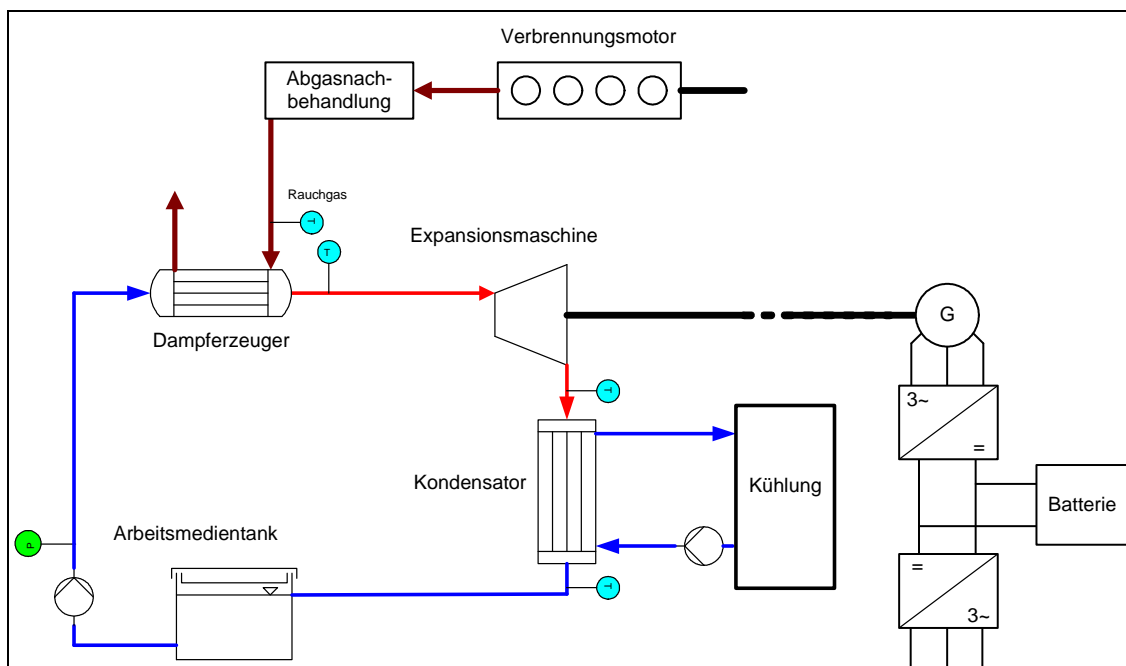


Bild 2

Im Falle einer gewollten Mehrleistung oder auch der Bereitstellung einer speicherfähigen höheren Energieform bietet die Elektrotechnik verschiedene Möglichkeiten der Energiegewinnung (Bild 2). Im ersten Schritt ist eine starre Netzverbindung denkbar, so dass die Drehzahl des gewählten Generators im Wesentlichen von der Netzfrequenz vorgegeben wird. Damit steht der Arbeitspunkt der Expansionsmaschine in punkto Drehzahl fest. Bei der Auswahl des Generators ist zusätzlich darauf zu achten, dass er wenigstens einen Zwei-Quadrantenbetrieb erlaubt. Falls die Expansionsmaschine nicht selbstanlaufend ist, könnte so mit einem kurzen motorischen Betrieb der E-Maschine der Anlauf realisiert werden.

Einen Freiheitsgrad gewinnt man, indem anstelle einer starren Netzkopplung ein passender Frequenzumrichter mit NetZRückspeiseeinheit verwendet wird. Damit kann die Drehzahl des Expanders von der Netzfrequenz entkoppelt werden und steht als zusätzlich Stellgröße zur Arbeitspunktbestimmung der Expansionsmaschine zur Verfügung. Beispielsweise kann damit der optimale Dampfdruck vor Expander eingestellt werden. Ein weiterer großer Vorteil dieser Technik ist die elektrische Zwischenspeicherung im Gleichspannungszwischenkreis (bspw. mittels Batterien). Damit stellt allein das Abwärmenutzungssystem die Möglichkeit einer

Unterbrechungsfreien Stromversorgung zur Verfügung und wäre sogar in der Lage ein Inselnetz zu betreiben.

Mess- und Stellglieder

Um einen stabilen, sicheren und wirkungsgradoptimierten Betrieb einer AWN-Anlage zu ermöglichen, bedarf es eines Automatisierungssystems bzw. Steuergerätes, welches stets den Anlagenzustand überwacht und regulierend eingreift.

Messtechnisch müssen die physikalischen Größen Druck und Temperatur mittels geeigneter Sensoren erfasst werden. Außerdem kann es aus Sicherheits- und Diagnosegründen sinnvoll sein Füllstände (Arbeitmedientank, Öltank) oder auch den Massenstrom (Arbeitsmedium, Abgas) zu messen.

Aus regelungstechnischer Sicht sind vor allem die Größen Dampfdruck und -temperatur zu erfassen, da diese den Arbeitspunkt des Systems festlegen und permanent ihren Sollwerten nachgeführt werden müssen. Hilfsgrößen wie Abgastemperatur, Kondensatoraustrittstemperatur oder auch Öldruck am Expander zeigen bereits, dass die zu wählende Steuerungselektronik über ausreichend Messkanäle verfügen muss.

Ähnlich verhält es sich mit den notwendigen Stellgliedern.

Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Bereitstellung des Arbeitsmedienmassestromes. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze, die wiederum verschiedene Arten von Stellgliedern und Ansteuerelektronik verlangen. Als Beispiel sind hier drehzahlvariable Pumpen, Absteuerventile oder auch Durchflussregelventile zu nennen. Die Ansteuerung kann mittels Analogausgang, digitalem Schalter oder auch einem Feldbussystem realisiert werden.

Je nach Komplexität der Anlage kommen noch Mess- und Stellelemente für den Ölkreis, einen zweiten Dampferzeuger (z.B. AGR) oder ggf. die Trennung von Schmieröl und Verdampfungsmedium hinzu.

Regelungen

Die wesentliche Regelgröße im AWN-System ist die des Dampfzustandes vor der Expansionsmaschine, welcher als Tupel von Druck und Temperatur beschrieben werden kann.

Bei einer Systemanalyse lassen sich die Einflussgrößen dieses Zustandes ermitteln.

Im Wesentlichen wird das Verhalten durch das Bauteil Dampferzeuger bestimmt, aber auch die Drehzahl und damit das Schluckvolumen der Expansionsmaschine haben Einfluss darauf. Steht gerade diese Drehzahl nicht als Stellgröße zur Verfügung, so wird das Drehzahlverhalten über die mechanische oder elektrische Last festgelegt. Bild 3 zeigt die wesentlichen Einflüsse bei der Bestimmung der Dampftemperatur (grün – Stellgröße, orange – Regelgröße, violett - Störgröße).

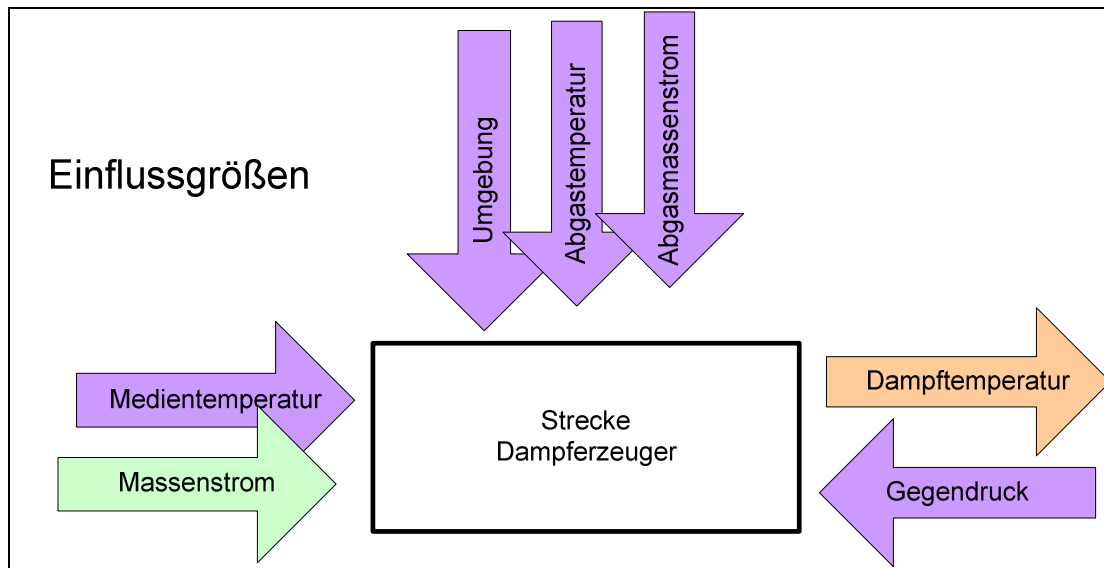
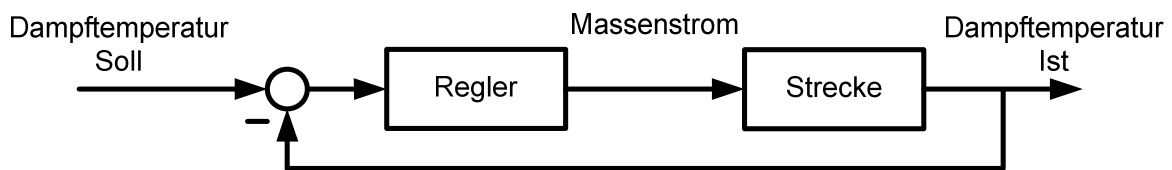


Bild 3

Vorausgesetzt, dass der Arbeitsmedienmassenstrom eingestellt werden kann, muss man sich entscheiden, ob Druck oder Temperatur vor Expander eingeregelt werden soll. Die jeweils andere Größe stellt sich somit frei ein. Mit Hinblick auf Sicherheitserwägungen ist die Temperaturregelung dabei die bessere Wahl, da Schutzeinrichtungen gegen Übertemperatur aufwändig zu realisieren sind, dagegen Überdruckventile oder ähnliche Geräte wirksam gegen gefährliche Druckwerte eingesetzt werden können.



Die Regelung sollte so ausgelegt werden, dass die Temperatur stets innerhalb der zulässigen Werte bleibt, welche nach oben durch Medien- und Bauteilbeständigkeit und nach unten durch die Siedelinie (druckvariabel) begrenzt werden. Ein Betrieb im Nassdampfgebiet kann je nach Expanderbauform zulässig sein, sollte jedoch mit Hinblick auf die Lebenserwartung der Expansionsmaschine vermieden werden.

Im Allgemeinen werden die schnellen Transienten in dynamischen Fahrprofilen noch durch thermische Speichereffekte im Abgasstrang gedämpft. Insbesondere die schnellen Wechsel im Abgasmassenstrom führen jedoch zu einer ständigen Veränderung der verfügbaren Abgasenthalpie. Ein einfacher PID-Regler ist mit dieser Aufgabe schnell überfordert. Die verhältnismäßig großen Zeitkonstanten bzw. die Totzeitanteile der Strecke neigen mit einem I-behafteten Regler schnell zum Schwingen der Regelgröße. Diese können bereits, je nach Applikation durch Absturz in den flüssigen Medienzustand oder Überhitzung über die Zerstörungstemperatur, anlagenbedrohlich werden. Schließlich führen diese Schwingungen je nach Systemgröße auch zu spürbaren Fahrkomforteinbußen, da das eingekoppelte zusätzliche Moment ebenfalls schwingt.

Abhilfe schaffen hier nichtlineare Regelungskonzepte beispielsweise mittels gain-scheduling oder auch Störgrößenaufschaltungen.

Das System „Temperaturregelung nach Dampferzeuger“ kann als die Störgrößenregelung einer zeitvarianten nichtlinearen Strecke charakterisiert werden. Als Störgrößen treten vornehmlich die Größen Abgasmassenstrom, Abgastemperatur, und Expanderdrehzahl auf. Als Stellgröße dient der Arbeitsmedienmassenstrom (Bild 3). Dieser kann beispielsweise über eine unterlagerte Regelung (Kaskadenregelung) bereitgestellt werden. Andernfalls wirkt die Temperaturregelung direkt auf das verfügbare Stellglied (Pumpendrehzahl, Ventilstellung).

Betriebsführung

Stationär arbeitende Anlagen

Der Betrieb einer stationären Anlage ist dahingehend einfach, dass wenig bis keine schnellen Änderungen im Abwärmeangebot bestehen und damit nur wenige definierte Arbeitspunkte angefahren werden. Somit ist der Dampfzustandsregler so auszulegen, dass er an diesen Arbeitspunkten stabil arbeitet. Dies kann beispielsweise durch gain-scheduling oder geeignete Vorsteuermaßnahmen unterstützt werden. Der Sollwert sollte dabei wirkungsgradoptimal gewählt werden.

Die folgenden Aussagen beziehen sich daher verstärkt auf die erhöhten Anforderungen in dynamisch beanspruchten Systemen.

Instationär arbeitende Anlagen

Da der instationäre Fall die größere Herausforderung darstellt, sollen relevante Betriebszustände an dieser Stelle beschrieben werden.

Anfahren:

Nach einem Kaltstart ist sowohl für Fahrzeug als auch für das AWN-System ein zügiges Erreichen der Betriebstemperatur das erste Ziel. Die geeignete Aufwärmstrategie hängt direkt von der systemtechnischen Verschaltung bzw. folgender bauliche Faktoren ab:

- Ist die Expansionsmaschine wasserschlagfest?
- Liegt eine feste Kopplung des Expansionsmaschinenabtriebs mit dem Verbrennungsmotor vor
- Schmierkonzept
- Empfindlichkeit aller Bauteile gegen starke Temperaturgradienten
- Art der Arbeitsmedienbereitstellung (geregelter Pumpe oder Absteuerung)

Vom Expandertyp abhängig muss weiterhin in selbstanlaufende bzw. nicht selbstanlaufende Expander unterschieden werden. Bei elektrischer Energieeinkopplung ist dann entsprechend auch ein Anlasserbetrieb vorzusehen. Bei mechanischer Einkopplung kann eine Kupplung sinnvoll sein, wenn der Expander beispielsweise nicht für längere Zeit geschleppt werden darf. Das Anfahren bzw. Anreißen geschieht dann über das Schließen der Kupplung. Der Verbrennungsmotor „zieht“ die Expansionsmaschine dann auf die synchrone Drehzahl. Dies kann durch gleichzeitige Beaufschlagung mit Frischdampf unterstützt werden.

Geregelter dynamischer Betrieb:

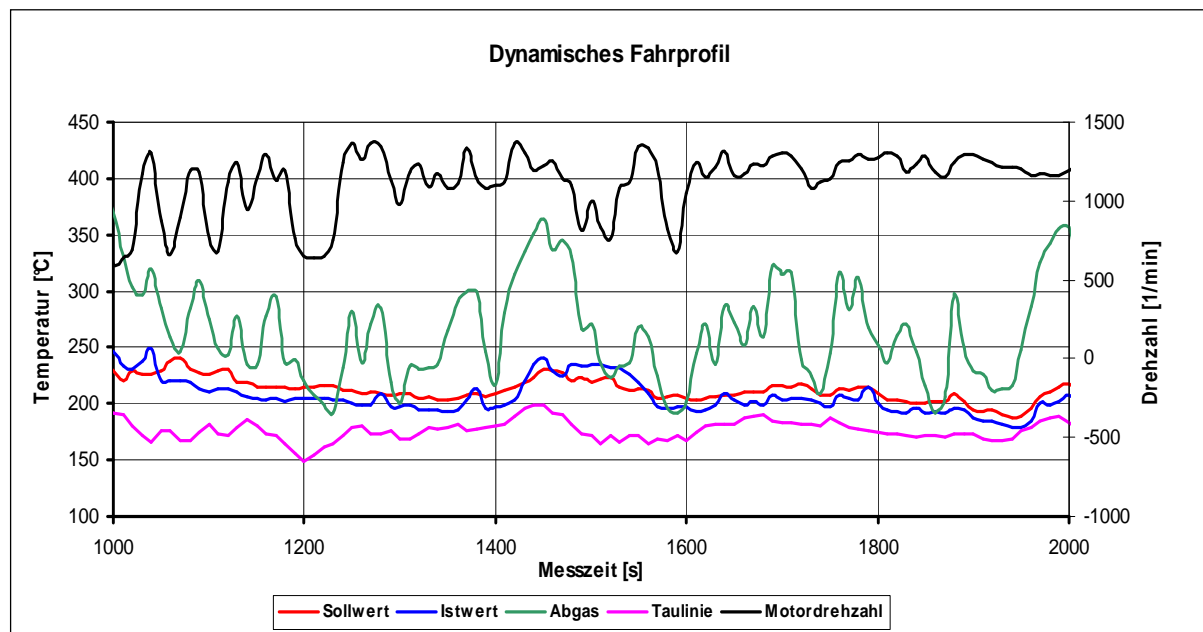


Bild 4

Die Sollwertvorgabe kann im ersten Schritt per Konstantwert geschehen, so dass der Regler auf die Störgrößenregelung (veränderliche Abgaswerte) optimiert werden muss. Um auch längere Überlandfahrten möglichst effizient zu gestalten, ist jedoch auch ein variabler Sollwert, der in Abhängigkeit vom Motorbetriebspunkt und vom AWN-Anlagenwirkungsgrad gewählt wird, erforderlich. Dabei ist die Betrachtung des Gesamtanlagenwirkungsgrades (Wärmeübertragerwirkungsgrad, Expanderwirkungsgrad, Kreisprozesswirkungsgrad) besonders wichtig. Bild 4 zeigt einen 15-Minuten-Abschnitt aus einem dynamischen Lkw-Fahrprofil. Das starke transiente Verhalten des Fahrzeugs kann aus den Größen Abgastemperatur und Motordrehzahl erahnt werden. Trotz diesen hohen Anforderungen gelingt es der Regelung ihrem Sollwert in engen Grenzen zu folgen.

Wer das Wirkungsgradkennfeld seiner Anlage kennt, kann direkt die optimale Solltemperatur bestimmen.

Lastabwurf:

Dieser Betriebszustand tritt insbesondere bei mechanisch gekoppelter Expansionsmaschine ein. Falls seitens Fahrzeugführer kein Moment angefordert wird, geht der Verbrennungsmotor in den Modus der Schubabschaltung bzw. Leerlaufregelung. In diesem Fall darf auch die AWN-Anlage kein Moment einkoppeln. Demnach ist eine Unterbrechung des Kraftschlusses notwendig, die entweder mechanisch durch eine Kupplung oder durch ein Abkoppelventil im Arbeitskreis vor dem Expander erfolgen kann.

Bei elektrischer Einkopplung tritt dieser Fall nur auf, falls die elektrische Senke (Batterie, Netz) ausfällt. Dann muss ein Durchgehen der Expansionsmaschine durch Abkoppelventil oder mechanische Bremse verhindert werden.

Falls vom Systementwurf her möglich, kann es sinnvoll sein, den Dampfzustand zu konservieren, d.h. Druck und Temperatur möglichst lange zu halten, um bei Wiederanlauf sofort Moment abgeben zu können.

Wiederanlauf:

Wird nach einem Lastabwurf wieder Moment angefordert, so ist je nach Vorgeschichte die Anlage sofort bereit wieder Moment abzugeben (Dampfzustand konserviert) oder muss neu aufgewärmt werden.

Abstellen:

Um Sicherheitskriterien zu erfüllen, kann es notwendig sein, den hochenergetischen Dampfzustand zügig und kontrolliert abzubauen, wenn das Fahrzeug abgestellt wird. Bei elektrischer Einkopplung ist hier ein gezieltes Nachladen der Fahrzeugbatterie denkbar. Auch ein Nachlauf der Kühlung kombiniert mit einem gezielten Druckabbau über ein geeignetes Ventil ist eine Möglichkeit.

Falls zulässig, kann auch die allmähliche Auskühlung des Systems ausreichend sein. Je nach Systemgröße und Umweltbedingungen kann dies jedoch mehrere Stunden dauern.

Wechselwirkung mit anderen Steuerungssystemen

In dem Wissen, dass eine Abwärmenutzungsanlage nie allein betrieben wird, sondern zumindest mit einem abwärmegenerierenden System zusammenarbeitet, stellt sich die Frage nach möglichen Rückwirkungen auf selbiges.

Als Beispiel kann hier ein moderner Pkw betrachtet werden. Die AWN-Anlage beeinflusst den Motor auf verschiedenen Wegen:

- Einfluss auf Motor durch
 - Momenteneinkopplung bei mechanischer Einkopplung
 - Beeinflussung AGR
 - Beeinflussung Kühlkreis

Weiterhin ist ein Einfluss auf die Fahrdynamik wie folgt denkbar:

- Einfluss auf Fahrdynamikregelung (ESP-Steuergerät) durch
 - Momenteneinkopplung (ASR, MSR)

Bei der Integration in ein Fahrzeug oder eine Industrieanlage sollte immer eine Einbindung in das Gesamtbetriebskonzept bzw. in den Steuergeräteverbund erfolgen. Als weiterer positiver Nebeneffekt können so auch relevante Messwerte von anderen Steuergeräten verwendet werden und es entfällt eine messtechnische Redundanz.

Sicherheit

Ziel des automatisierten Betriebes ist nicht nur der optimale, sondern auch der stets sichere Betrieb der AWN-Anlage. Bereits in den vorangegangenen Abschnitten wurde vereinzelt auf Sicherheitsaspekte hingewiesen. Zusammenfassend sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Schutz der Bauteile (Druck/Temperatur)
- Schutz des Arbeitsmediums (Druck/Temperatur)
- Schutz vor negativen Rückwirkungen auf Fahrkomfort und- sicherheit

- Ausfallsicherheit des Fahrzeugs bei Ausfall AWN-Anlage (Freischneiden des AWN-Systems)
- Erreichen eines sicheren Systemzustandes bei Sensor/Aktorausfall am AWN-System

Basis für die fehlertolerante Funktionsentwicklung ist eine vorab durchgeführte System-FMEA. Ziel dabei ist es, für jeden denkbaren Fehlerfall geeignete Maßnahmen abzuleiten, um das System sicher betreiben zu können. Sollte die Automatisierung aufgrund unzureichender Stellmöglichkeiten nicht in der Lage sein einen sicheren Betrieb oder sicheres Abstellen zu gewährleisten, so muss über anlagentechnische Erweiterungen, beispielsweise Überdruckventile o.ä. nachgedacht werden.

Fazit

Die Automatisierung einer Abwärmenutzungsanlage ist eine je nach Systemkomplexität aufwändige Aufgabe. Es ist ratsam bereits in der frühen Konzeptphase bzw. im Systementwurf den zuständigen Automatisierungsfachmann mit an Bord zu holen. Dies erspart später aufwändige Systemänderungen durch unzureichende Berücksichtigung insbesondere dynamischer Einflüsse sowie Fehlerverhalten des Systems.

Die Hauptaufgabe in der Automatisierung ist die permanente Kontrolle/Regelung des Dampfzustandes im Arbeitskreis. Je nach Anwendung müssen entsprechend komplizierte und wohlapplizierte Regel- und Steuerungsalgorithmen implementiert werden.

Bei der Amovis GmbH sind solche Automatisierungs-Systeme im Einsatz, und werden an die individuellen Bedürfnisse der verschiedenen AWN-Systeme appliziert und weiterentwickelt.

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an:

