

Regelungstechnisches Konzept für ein Hybridsystem bestehend aus Photovoltaikanlage und Dampfmaschine mit Kraftwärmekopplung

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Klaus Brinkmann



Lehrgebiet Elektrische Energietechnik
 Feithstraße 140, Philipp-Reis-Gebäude, D-58084 Hagen, fax: +49/2331/987 357,
 e-mail: klaus.brinkmann@fernuni-hagen.de

Einleitung:

In klimatischen Zonen mit ausgeprägten Sommer-Winter-Verhältnissen wie in Mitteleuropa, ist eine autarke Energieversorgung unter Einbeziehung einer Photovoltaikanlage auf eine zusätzliche Versorgungseinheit für strahlungsarme Zeiten angewiesen. Hierfür bietet sich insbesondere eine Kraftwärmekopplung an, die hauptsächlich während der Heizperioden zum Einsatz kommt. Es läßt sich zeigen, daß es möglich ist, mit einem Hybridsystem bestehend aus Kraftwärmekopplung mit *Dampfmaschine* und einer *Photovoltaikanlage*, private Haushalte oder innerbetriebliche Verbraucher ganzjährig mit Energie zu versorgen /1/, /5/.

Energieversorgung für Sommer und Winter

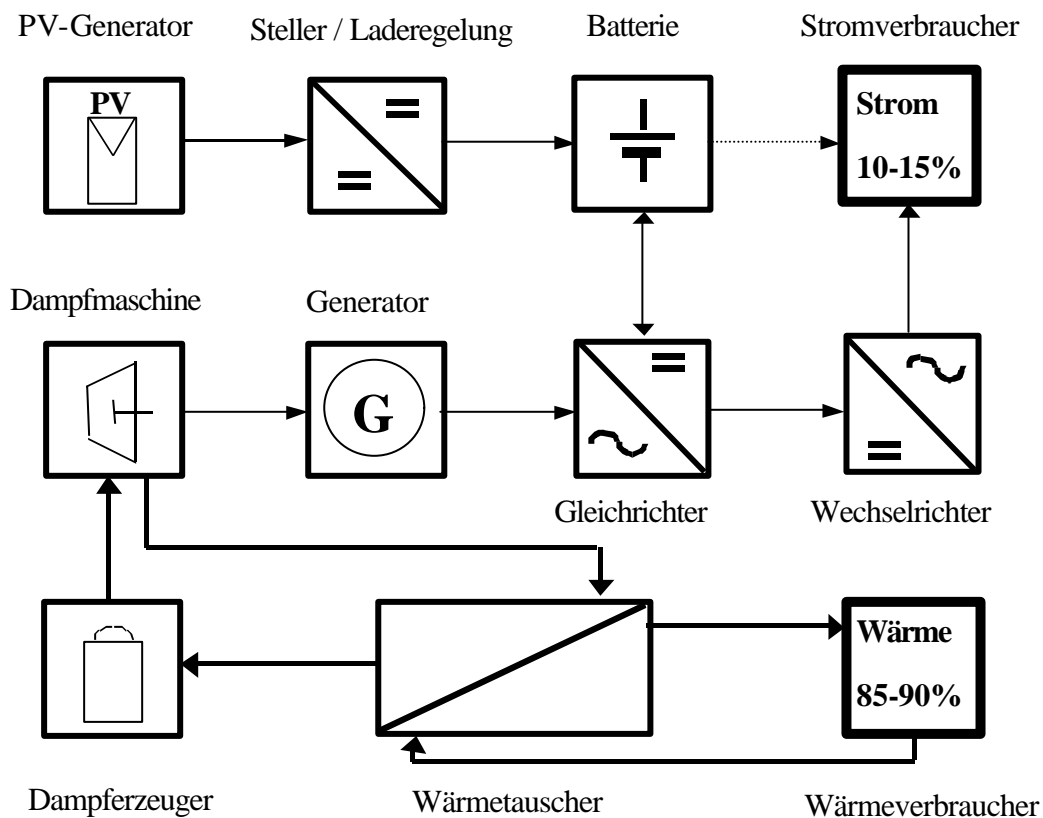


Abb. 1: Vereinfachtes Verfahrensschema des Hybridsystems

Vorteilhaft ist hier die Freiheit, aufgrund der externen Verbrennung im Dampferzeuger als Brennstoff Biomasse /3/ einzusetzen, um einen geschlossenen CO₂-Kreislauf zu ermöglichen.

Dieses System wurde eingehend untersucht und mit Hilfe physikalischer Modellbildungen einer mathematischen Formulierung zugänglich gemacht /2/. Diese Erkenntnisse sind zur Erstellung einer Computersimulation genutzt worden /4/.

Da ein derartiges System vornehmlich auf simultan wirkende stochastische Einflußgrößen wie Einstrahlung, Stromverbrauch und Wärmeverbrauch reagieren muß, kommt dem Regelungssystem dieses Hybridsystems eine herausragende Bedeutung zu.

Für die experimentelle Überprüfung und Erfassung der Gesetzmäßigkeiten sowie die Entwicklung eines **Steuer- und Regelungssystems** ist im Lehrgebiet für elektrische Energietechnik der FernUniversität Hagen ein Versuchsstand mit einer Dampfmaschine (ca. 2,5 kW) aufgebaut worden.

Experimenteller Aufbau:

Entsprechend des Verfahrensschemas in Abb. 2 ist ein Versuchsaufbau realisiert worden, wie ihn Abb. 3 zeigt. Um unabhängig von der augenblicklichen Wetterlage zu sein, wurde die *Photovoltaikanlage* mit Hilfe eines Solargenerator-Simulators implementiert, mit einer maximalen Ausgangsleistung von 2,5 kW. Zudem sind dadurch zeitgeraffte Testdurchläufe möglich.

Hybridsystem "Photovoltaic + Combined Heat and Power with Steam Engine"

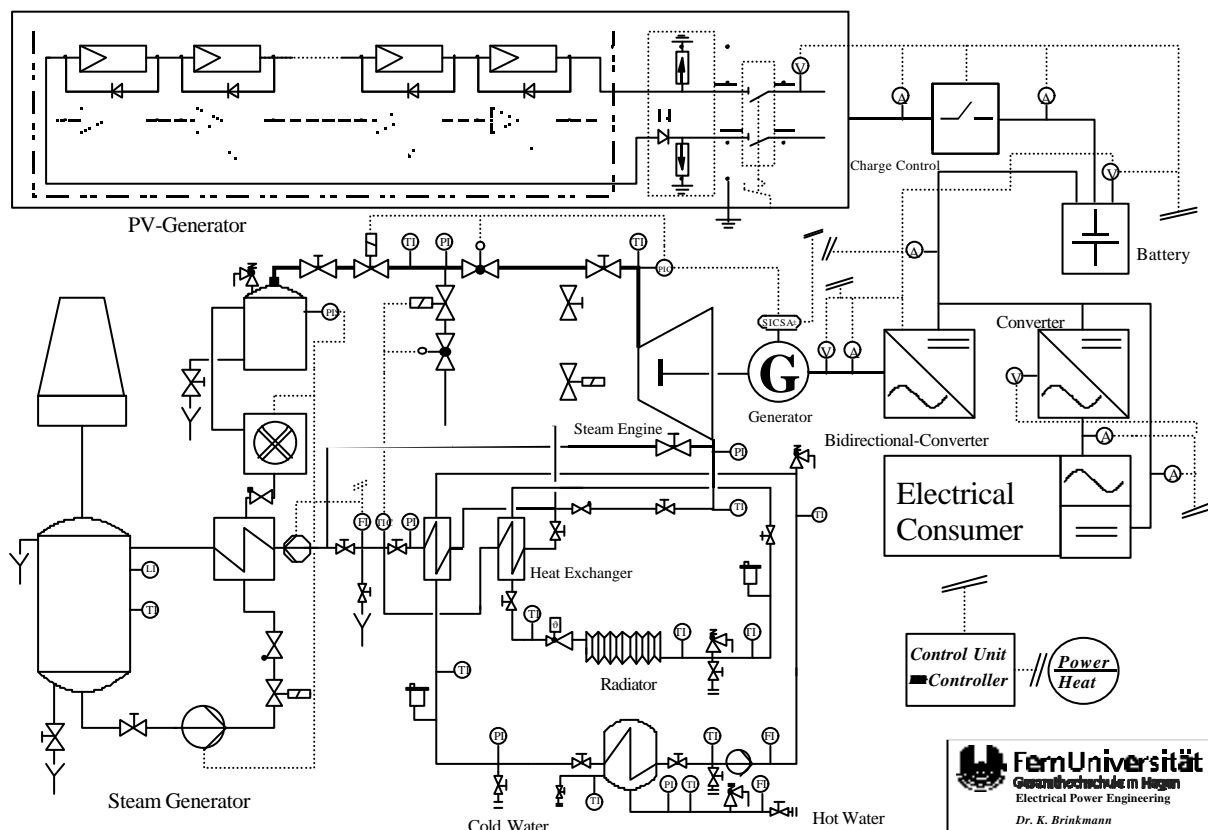


Abb. 2: Verfahrensschema des Hybridsystems PV+Dampfmaschine mit KWK

Für die Speicherung der elektrischen Energie sind 4 Panzerplatten-*Batterien* mit einer Kapazität von je 120 Ah in Reihe geschaltet, so daß die Anschlußspannung 48 V beträgt.

Der *Dampferzeuger* wird mit elektrischem Strom betrieben und liefert bis zu 24 kg/h Satttdampf von 6 bar bei 159 °C. Der elektrische Anschlußwert beträgt 18 kW. Die Dampferzeugung mit Strom ist hier die einfachste und sicherste Lösung für einen Laborbetrieb, zumal die aufgebrachte Leistung meßtechnisch gut erfaßbar ist.

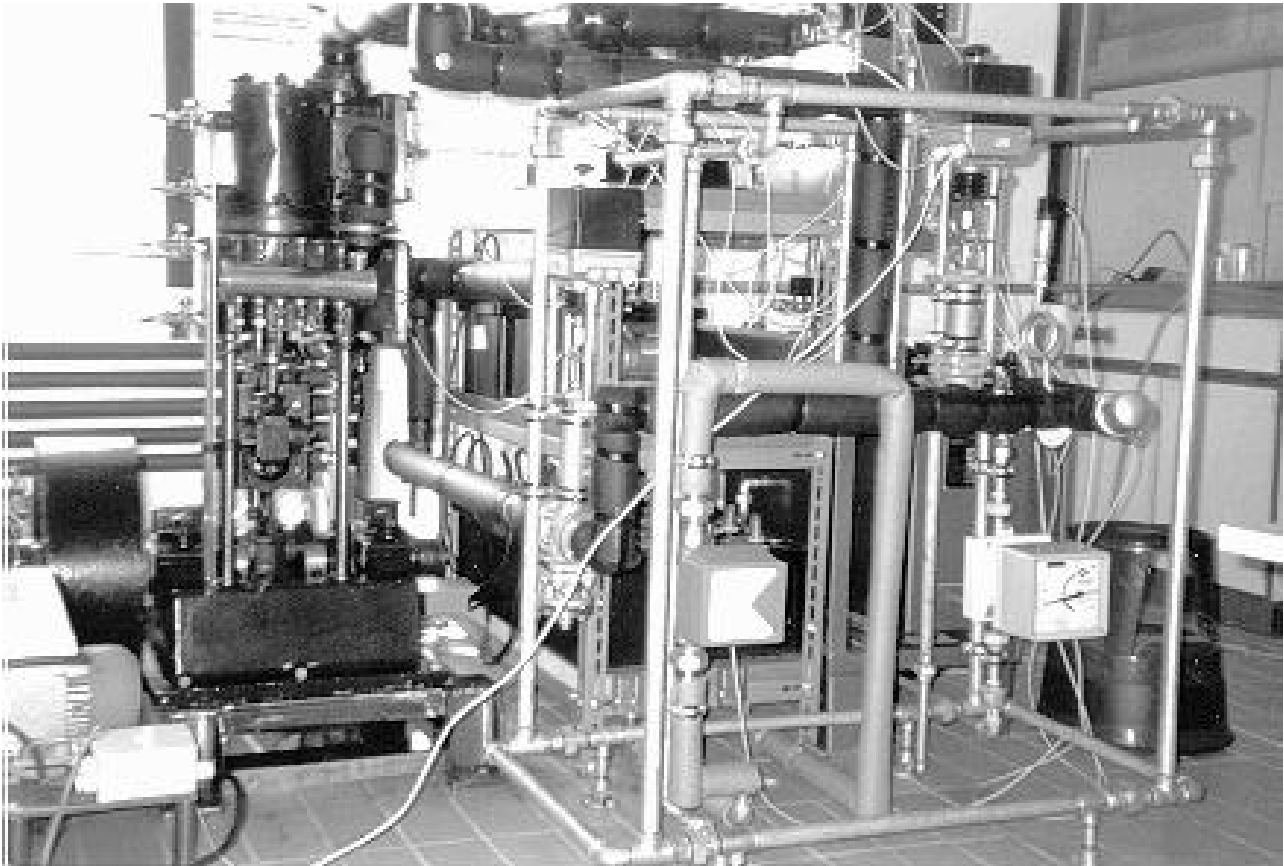


Abb. 3: Versuchsaufbau

Einen erheblichen Aufwand stellte das aufgebaute *Rohrleitungssystem* dar. Abgesehen von den Rohren für die Wärmetauscher wurden verzinkte 1/2", 3/4" und 1" handelsübliche Wasserrohre verwendet.

Die 1/2" - *Frischdampfzuleitung* beginnt am Absperrventil des Dampferzeugers, dem dann zunächst ein Magnetventil folgt. Sie teilt sich dann, wie Abb. 4 zeigt, in zwei Hauptwege auf, in einen zur Dampfmaschine und einen über ein weiteres Magnetventil direkt zu den Wärmetauschern als *Bypass*.

Beide Wege sind mit *Regelventilen* versehen, um den Dampfstrom gezielt eindrosseln zu können. So kann zum einen die Drehzahl der Dampfmaschine und zum andern der Wärme fluß geregelt werden. Die mit einem Stellantrieb versehenen Regelventile haben eine gleichprozentige Kennlinie.

Die *Wärmetauscher* sind selbstgebaut und bestehen aus konzentrisch geführten Kupferrohren \varnothing 15 mm und \varnothing 22 mm. Ein Röhrenwärmetauscherelement ist etwa 1,20 m lang.

Das in den Wärmetauschern auf der Dampfseite anfallende Kondensat wird mit Hilfe einer 1/2"-Leitung und über eine wahlweise einschaltbare *Kondensat-Pumpe* der Speisewasser-Vorwärmung zugeführt.

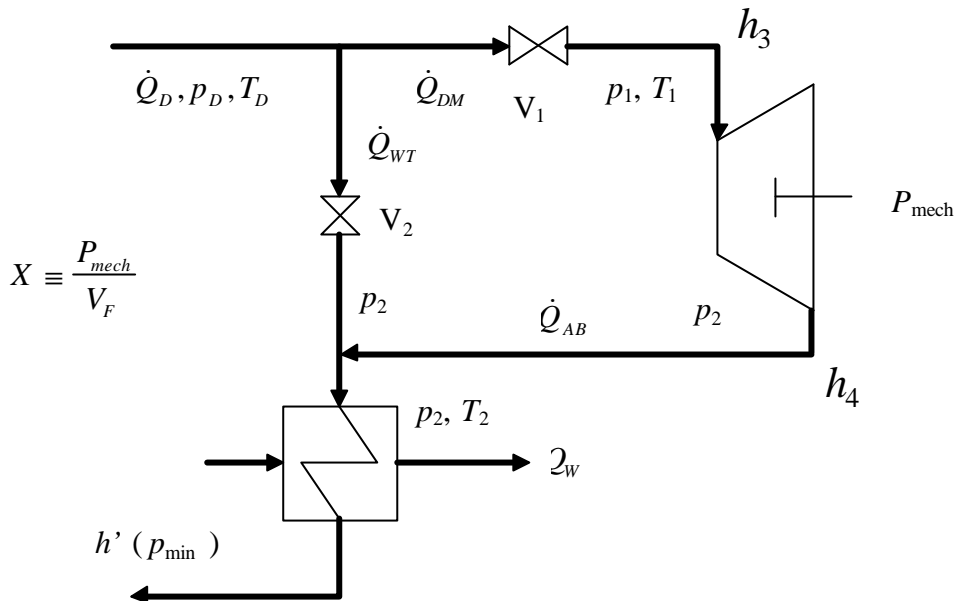


Abb. 4: Bypassregelung

Die Dampfmaschine treibt über einen Keilriemen einen *Asynchrongenerator* an. Für diese Tandemmaschine besteht die Notwendigkeit einer Anlaufhilfe, die nach Möglichkeit automatisch erfolgen sollte. Kernstück dabei ist ein *Bidirektionaler-Wechselrichter* (3-Phasen). Dieser wandelt zum einen die 48 Volt-Gleichspannung der Batterien in Wechselspannung für den Motorbetrieb, und zum anderen den im Generatorbetrieb erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom. Das Übersetzungsverhältnis für den Keilriemenantrieb des 1,3 kW-Generators beträgt 3 : 1. Die *Meßtechnik* der Anlage ist entsprechend des Verfahrensschemas auf der Basis von 4-20 mA-Signalen ausgeführt.

Regelungskonzept:

Die Hauptregelstrecken des Hybridsystems bilden die Drehzahlregelung der Dampfmaschine und die Regelung der Wärmezufuhr zum Kondensator, sowie die Laderegelung der Batterie. Um erfolgreich eine Regelstrecke implementieren zu können, ist es wichtig, das Verhalten des betroffenen Teilsystems in bezug auf sein Verhalten bei Änderung der verantwortlichen Parameter zu kennen. Für die Einflußnahme auf die KWK sind im wesentlichen die beiden Regelventile zur Drosselung des Dampfstroms zur Maschine und im Bypass zum Kondensator die entscheidenden Elemente. Durch Veränderung des Ventilhubes wird der Dampfzustand und der Durchfluß verändert, was zu entsprechenden Reaktionen im System führt. Es gilt also zu zeigen, wie diese Reaktionen aussehen und wie stark die sich ergebenden Änderungen sind. Zunächst wurde das *Drehzahlverhalten* in Abhängigkeit von der Drosselung und der mechanischen Leistung untersucht. Die Abb. 5 zeigt das Verhalten der Drehzahl bei variablem Kondensatordruck und die erforderliche Drosselung, um die normierte Leistung X_{100} zu halten.

Bei einem Satttdampf von 6 bar gilt $X_{100} = 3227,5 \text{ kJ/m}^3\text{min}$. ($X_{100} \equiv$ Füllvolumen-Normierte Leistung bei 6 bar und 100 1/min, siehe Abb. 4).

Bei konstant zu erfüllender mechanischer Leistung ist bei eingedrosselten Dampfzuständen die Drehzahl zu erhöhen, da zum einen die Dichte des Dampfes in etwa proportional zum Druck abnimmt und zum anderen die Enthalpiedifferenz ($h_3 - h_4$) kleiner wird. Somit sinkt einerseits die Arbeitsfähigkeit des Dampfes und gleichzeitig wird je Hub weniger Masse in das Füllvolumen eingelassen. Da die Regelung der Wärmekreisläufe mit dem Kondensatrücklauf verknüpft ist, wird die Kondensatortemperatur je nach den gewünschten Vorlauftemperaturen schwanken. Diese Temperaturschwankungen erzeugen eine Drehzahländerung aufgrund der damit verbundenen Wirkungsgradänderung. Soll die Anlage bei konstanter Drehzahl betrieben werden, so kann hier das Korrekturverhalten mit Hilfe der Drosselung abgeschätzt werden

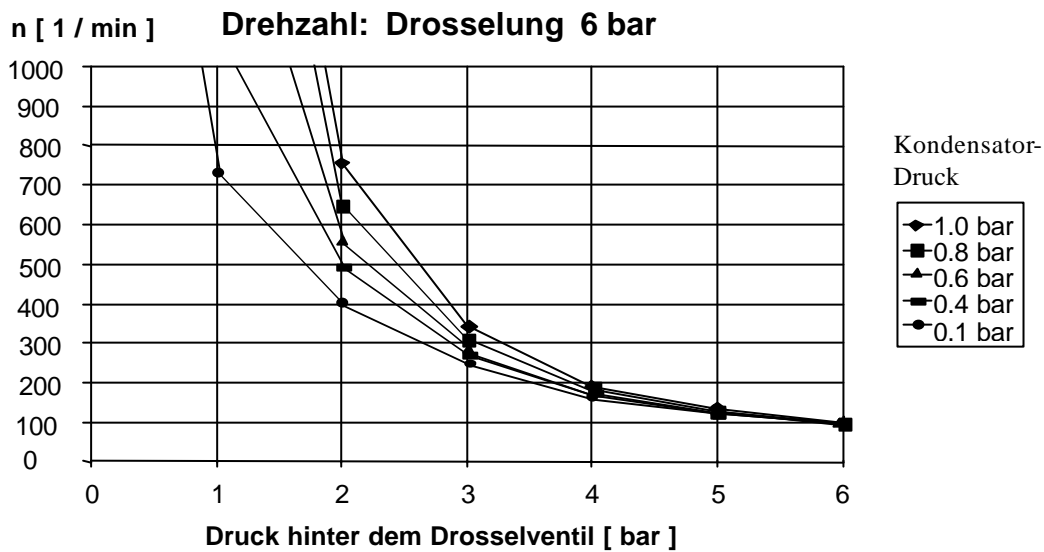


Abb. 5: Einfluß der Drosselung auf die Drehzahl bei X100

Um die relative Drehzahländerung bei Drosselung zu bestimmen, zum Beispiel von einer Drehzahl n_0 bei 6 bar auf $n_1 < n_0$, betrachte ($\rho \equiv$ Dampfdichte)

$$n_0 = \frac{30 \cdot X_0}{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0} \quad \text{und} \quad n_1 = \frac{30 \cdot X_1}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{n_1}{n_0} = \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \cdot \frac{X_1}{X_0} \quad (1)$$

Daraus kann eine Aussage über die sich ergebenden relativen Änderungen gewonnen werden:

$$1 - \frac{n_1}{n_0} = 1 - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \cdot \frac{X_1}{X_0} \quad \text{und mit } \Delta n = n_0 - n_1 \text{ sowie } \Delta X = X_0 - X_1 \text{ ergibt sich}$$

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \left(\frac{\Delta X}{X_0} \right) - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} + 1 \quad (2)$$

Man erhält also eine Geradengleichung der Form $y = ax + b$ bezüglich der relativen Drehzahländerung in Abhängigkeit von der relativen Leistungsänderung.

Für $\Delta X = 0$, also bei konstanter Leistung gilt:

$$\frac{\Delta n}{n_0} = 1 - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \quad (3)$$

Der Zustand 1 ergibt sich hier aus Zustand 0 durch Betätigen des Drosselventils.

p [bar]	6	5	4	3	2
$\frac{\Delta n}{n_0}$ [%]	0	-32,4	-90,6	-227,5	-644,7

Tabelle 1: Relative Drehzahländerung $X=\text{const.}$ und 1 bar Kondensatordruck

Läuft die Maschine hingegen bei konstantem Dampfzustand, so vereinfacht sich die Beziehung zwischen der relativen Drehzahländerung und der relativen Leistungsänderung zur

Äquivalenz und damit:
$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0}{X_0} \cdot \Delta X = \frac{n_0}{P_{mech,0}} \cdot \Delta P_{mech} \quad (4)$$

Soll dabei die Drehzahl konstant bleiben, so ist mit Hilfe der Drosselung eine Korrektur über den Dampfzustand erforderlich. Mit der Beziehung $P = M \cdot \omega$ und $P = \dot{m}_{DM} \cdot (h_3 - h_4)$ kann in analoger Weise eine Gleichung zur relativen Drehmomentänderung hergeleitet werden:

$$\frac{\Delta M}{M_0} = 1 - \frac{r_1 \cdot (h_3 - h_4^1)}{r_0 \cdot (h_3 - h_4^0)} \quad (5)$$

Bei einer Drosselung von 6 auf 5 bar bei 1bar Kondensatordruck würde sich das Drehmoment um 24,8 % reduzieren. In der Praxis wird die Drehbewegung des Schwungrades über einen Riemen auf den Generator übertragen. Dort befindet sich ein Tachogenerator zur Aufnahme des Istwertes. Dieser wird im Regler mit dem Sollwert w verglichen, und daraufhin wird die Stellgröße y der sich ergebenden Regelabweichung $e = (w - x)$ angepasst. Diese Stellgröße, hier in der Form eines 4-20 mA-Signals, wird dem Stellmotor des Drosselventils übermittelt, der die dazugehörige Hubänderung vornimmt.

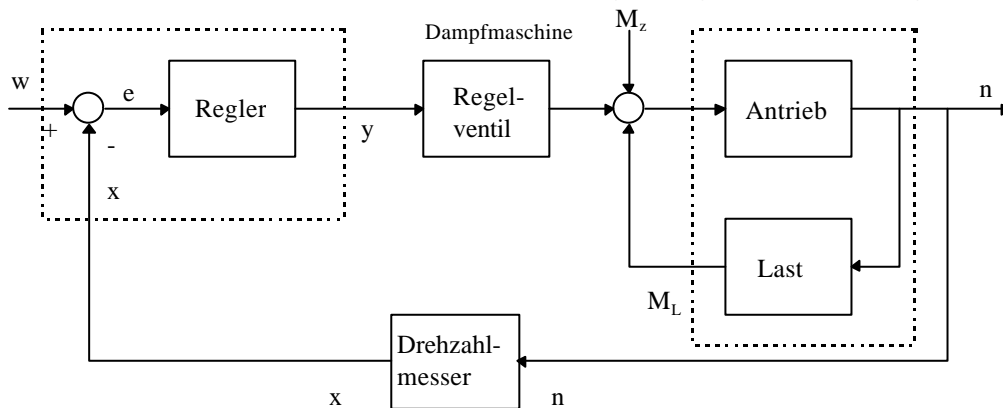


Abb. 6: Signalflußplan der Drehzahlregelung

Das Lastmoment (Verbraucher) wirkt dem Antriebsmoment entgegen und bewirkt, daß sich die Last wie ein proportionales Übertragungsglied mit Verzögerung erster Ordnung (PT1, VZ1) verhält. Alle Störmomente, die von außen auf das System einwirken, seien zu dem Störmoment M_L zusammengefaßt. Für die Drehzahlregelung können Regler mit P-, PI- oder PID-Verhalten verwendet werden. Prinzipiell gibt der Signalflußplan in Abb. 6 die Verhältnisse näherungsweise wieder, in allgemeiner Anlehnung an Motoren.

Etwas komplexer als die Drehzahlregelung stellt sich Aufgabe der Regelung der Wärmemengen dar, die über die Wärmetauscher zu den Verbrauchern gelangen sollen. Hierbei handelt es sich um Kaskadenregelungen. Die einzustellende *Wärmeleistung* richtet

sich nach den Verbraucheranforderungen, sowohl bezüglich der Wärme als auch des Stromes, da die erzeugte mechanische Leistung den Abwärmestrom aus der Maschine bestimmt. Diesen Zusammenhang kann man recht gut über eine Betrachtung bei Wirkungsgradänderung verdeutlichen. Betrachtet man die Energiebilanz $\dot{Q}_{WT} = \dot{Q}_W - \dot{Q}_{AB}$ bei konstanter Wärmeabnahme aber bei unterschiedlichen Wirkungsgraden, kann eine Beziehung zwischen der relativen Wirkungsgradänderung und der Wärmeleistungsänderung durch den Bypass gewonnen werden. Die Bypassleistung wird dabei auf die mechanische Leistung bezogen. Somit erhält man folgende Formel:

$$\frac{\Delta \dot{Q}_{WT}}{P_{mech}} = \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0} \right) = \frac{\Delta h}{h_0} \left(\frac{1}{h_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta h}{h_0}} \right), \quad t = \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_W} \Rightarrow t = \frac{\Delta \dot{Q}_{WT}}{\dot{Q}_W} \left\{ \frac{\Delta h}{h_0} \left(\frac{1}{h_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta h}{h_0}} \right) \right\}^{-1} = \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_W}. \quad (6)$$

Damit ist ein Ausdruck gewonnen, der einen direkten Zusammenhang zwischen der Zielgröße t und der erforderlichen Regelung der Zusatzwärmeleistung \dot{Q}_{WT} und der Wirkungsgradänderung aufzeigt. Die Wirkungsgradänderung ergibt sich durch die Drehzahlregelung. Dies verdeutlicht noch einmal die Verquickung dieser Regelstrecken.

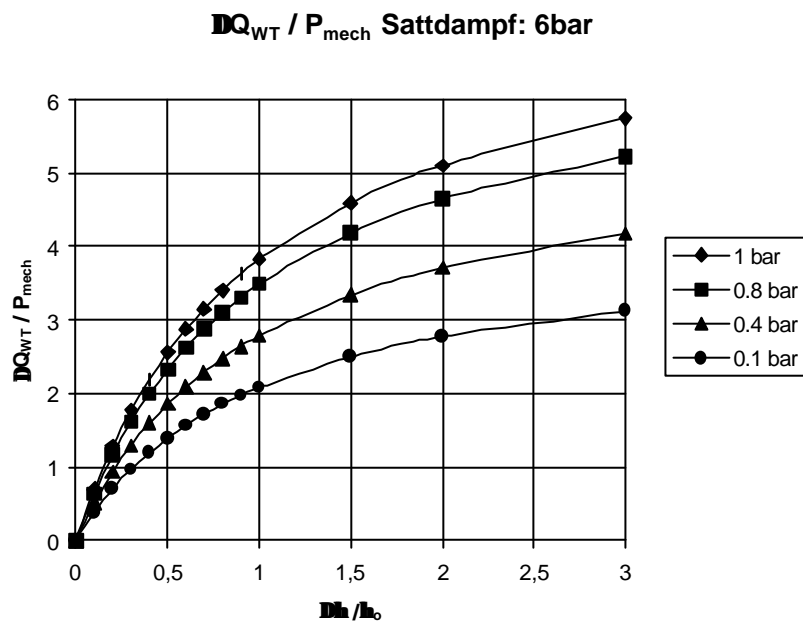


Abb. 7: Einfluß der Wirkungsgradänderung auf die Bypassregelung

Der Einfluß der Bypass-Regelung (siehe Abb. 2) auf die Kondensat-Rücklauf-Temperatur kann mit den folgenden Formeln abgeschätzt werden (Herleitung siehe /5/).

$$\dot{m}_D \cdot \Delta h \cong \dot{m}_D \cdot \bar{c}_p \cdot (\Delta T) \cong \Delta \dot{Q}_W \Rightarrow \dot{m}_D \cdot \Delta h = \dot{m}_D \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T = \mp \frac{(P_{mech} + \dot{Q}_W)}{\dot{m}_D} \cdot \Delta \dot{m}_{WT} \Rightarrow$$

$$\Delta T = \mp \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D^2 \cdot \bar{c}_p} \cdot \Delta \dot{m}_{WT} = \mp \Lambda \cdot \Delta \dot{m}_{WT} \quad \text{mit} \quad \Lambda = \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D^2 \cdot \bar{c}_p}. \quad (7)$$

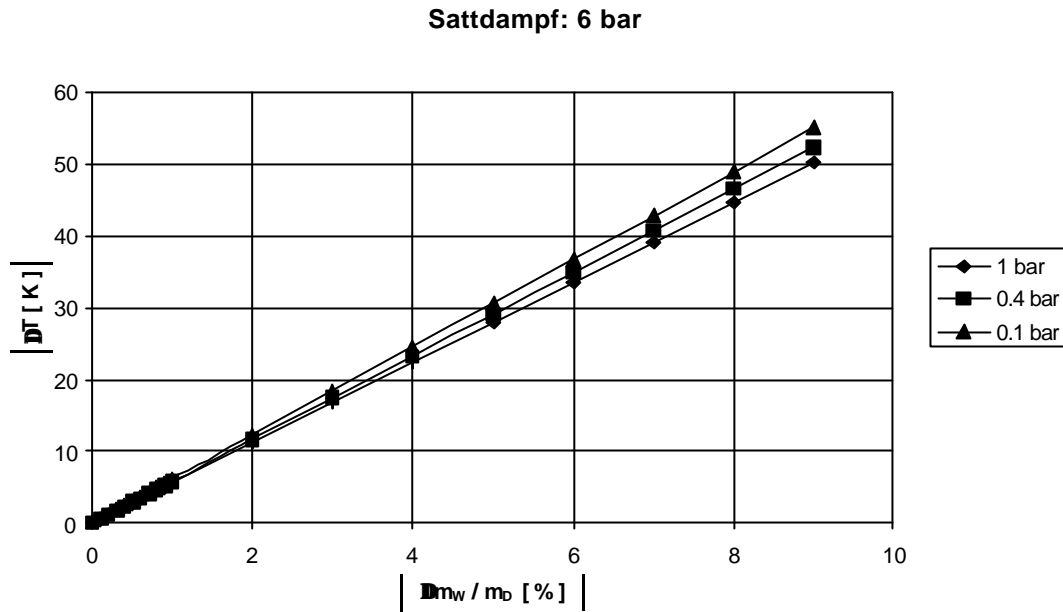


Abb. 8: Einfluß auf die Kondensat-Rücklauf-Temperatur

Man erkennt, daß der Einfluß des Kondensator-Drucks relativ gering ist, da der Unterschied hier auf die Variation von h_1 zurückzuführen ist, die relativ gering ist. Einer Temperaturänderung von $|\Delta T| = 1K$ entspricht einer Durchflußänderung im Bypass von $|\Delta \dot{m}_{wT} / \dot{m}_D| \approx 0,18\%$. Für die Gesamtenergie gilt: $P_{mech} + \dot{Q}_W = \dot{m}_D \cdot (h_3 - h_1)$ und damit gilt letztendlich ($h_1 \equiv$ Kondensat):

$$\Lambda = \frac{h_3 - h_1}{\dot{m}_D \cdot \bar{c}_p} \Rightarrow \Delta T \cong \mp \frac{h_3 - h_1}{\bar{c}_p} \cdot \frac{\Delta \dot{m}_{wT}}{\dot{m}_D} \quad (8)$$

Als Resultat ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Veränderung des zu regelnden Massenstroms im Bypass und der Temperaturänderung im Wärmekreislauf. Aus diesem Grund scheint es von Vorteil zu sein, das System über die **Kondensatrücklauf-Temperatur** zu kontrollieren und diese in gewissen Grenzen zu regeln. Dieser Temperatur kommt sozusagen sowohl thermodynamisch als auch verfahrenstechnisch eine **Schlüsselrolle** zu, weshalb der Hauptregelkreis für die konzipierte Wärmebedarfs-Regelung sich auf diese Führungsgröße stützt.

Referenzen:

- /1/ "PV-Generator linked to a Piston-Type Steam Engine with Combined Heat and Power as a Hybridsystem for a completely self-sufficient Energy-Supply", K. Brinkmann
2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna 1998
- /2/ "Physical Analysis of a Hybridsystem consisting of a PV-Generator linked to a Piston-Type Steam Engine with Combined Heat and Power for a completely self-sufficient Energy-Supply"
K. Brinkmann, *11. Internationales Sonnenforum, Köln 1998*
- /3/ "Kombinierte Nutzung von Biomasse und Sonnenenergie zum Betrieb eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage", K. Brinkmann
Siebtens Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik, Deggendorf 1998
- /4/ "Simulation eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage", K. Brinkmann, R. Taubner
14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1999
- /5/ "Systemtechnische Untersuchung eines Hybridsystems bestehend aus Photovoltaikanlage und Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung", K. Brinkmann, *Dissertation 1999*
FernUniversität Hagen / Fachbereich Elektrotechnik