

Online-Validierung energietechnischer Prozesse unter Zulassung transienter Messdatenverläufe

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Bernd Laipple

geboren in Waiblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt

Tag der Einreichung: 29.10.2002

Tag der mündlichen Prüfung: 14.10.2003

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen
Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik

2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder danke ich für die stets wohlwollende Förderung der Arbeit, die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen und die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt danke ich für die Übernahme des Mitberichts und das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung, allen beteiligten Studenten und dem Betriebspersonal des Heizkraftwerks Stuttgart-Vaihingen bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Erstellung meiner Arbeit sowie für das ausgezeichnete Arbeitsklima, das mir stets in bester Erinnerung bleiben wird.

Schließlich bedanke ich mich bei der Stiftung „Energieforschung Baden-Württemberg“ für die finanzielle Förderung meiner Arbeit.

Kirchheim, im November 2003

B. Laipple

Kurzfassung

Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Betriebsführungssystemen ist die Bereitstellung in sich konsistenter Messdatensätze. Da Messungen jedoch stets mit Ungenauigkeiten behaftet sind, bedarf es einer intelligenten Fehlerausgleichsrechnung. Der Nachteil der hierzu entwickelten und bisher eingesetzten Validierungs-Algorithmen ist, dass sie ein stationäres Prozessverhalten voraussetzen. Um die Messdatenvalidierung auch beim Auftreten transienter Prozesszustände einsetzen zu können, bedarf es einer dynamischen Messdatenvalidierung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Methoden zur Online-Validierung energietechnischer Prozessverläufe entwickelt und zwar

- die Validierung nach Elimination der Prozessdynamik und
- die Dynamische Validierung.

Die Wirkungsweise und Wirksamkeit beider Methoden werden anhand transienter Messdatenverläufe verschiedener Prozessbereiche des Heizkraftwerks Stuttgart-Vaihingen aufgezeigt und erprobt.

Dazu wird die für die Validierung notwendige dynamische Modellbildung der einzelnen Prozessbereiche durchgeführt. Zudem werden für die einzelnen Messgrößen toleranzbereichabhängige Gewichtungsfaktoren vorgegeben.

Die auf diese Weise durchgeführte Online-Validierung führt auch bei transientem Prozessverhalten zu guten Ergebnissen.

Abstract

Precondition for an effective application of operation management systems is the supply with consistent measuring datasets. As measurements are always imprecise an intelligent error estimation is needed. The disadvantage of the developed and up to now applied data reconciliation algorithms is their assumption of a steady process behaviour. To apply data reconciliation also on transient process states a dynamic data reconciliation is required.

In this thesis two methods for online data reconciliation are developed in fact

- the reconciliation after process dynamic elimination and
- the dynamic reconciliation.

The effectiveness both methods is tested and shown by means of transient measurement data of different process areas of the combined heat and power plant Stuttgart-Vaihingen.

For this purpose required dynamic models of the particular process areas are implemented. Further the tolerance-dependent weighting factors are pretended for the measuring signals to be reconciliated.

The online data reconciliation carried out in this manner reasonable results also in the case of transient process behaviour.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Abkürzungen, Formelzeichen und Indices</u>	IX
1	<u>Einleitung</u>	1
2	<u>Validierungsalgorithmen</u>	3
2.1	Stationäre Validierung	3
2.1.1	Herleitung des stationären Validierungs-Algorithmus	4
2.1.2	Lineare Betrachtung	7
2.2	Entwicklung dynamischer Validierungs-Algorithmen	8
2.2.1	Diskretisierung des allg. linearen Differentialgleichungs-Systems	9
2.2.2	Validierung nach Elimination der Prozessdynamik	9
2.2.3	Dynamische Validierung	11
2.3	Test und Vergleich der verschiedenen Validierungsmethoden	17
2.3.1	Beispiel-Prozess	17
2.3.2	Vorgabe der Gewichtungparameter	17
2.3.3	Verwendete Nebenbedingungen	18
2.3.4	Validierungsbeispiele	18
2.4	Gewonnene Erkenntnisse	21
3	<u>Das Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen</u>	23
3.1	Anlagenbeschreibung	24
3.2	Online-Messdatenerfassung	26
4	<u>Validierung des Bereiches „HKW-Ausgang/Heiznetz“ nach Elimination der Prozessdynamik</u>	27
4.1	Überprüfung der Wärmestrom-Messstellen im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“	29
4.2	Berücksichtigung der Massenstrom-Laufzeit zwischen den Wärmestrom-Messstellen	30
4.3	Beschreibung der Validierung	33
4.3.1	Messgrößenvektoren	36

4.3.2	Nebenbedingungen	36
4.3.3	Gewichtungsmatrix der Messgrößen	38
4.3.4	Gewichtungsmatrix der Nebenbedingungen	39
4.3.5	Validierungs-Begrenzungen	39
4.3.6	Validierungsergebnisse	40
4.4	Untersuchungen zur Offset-Unterdrückung	45
4.5	Erkenntnisse	47
5	<u>Validierung des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“</u>	48
5.1	Modellbildung des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“	49
5.2	Validierung	51
5.3	Gewonnene Erkenntnisse	58
6	<u>Dynamische Validierung im Bereich „Dampferzeuger“</u>	59
6.1	Beschreibung des Dampferzeugers	59
6.2	Nichtlineare Modellbildung	61
6.2.1	Wahl der Bezugsgrößen	64
6.2.2	Bilineare Betrachtungsweise	65
6.3	Parameteridentifikation	69
6.3.1	Identifizierung der Economiser-, Trommel/Verdampfer- und Überhitzerzeitkonstante	69
6.3.2	Identifizierung der Trommellevel-Zeitkonstante	72
6.3.3	Identifizierung des Dampferzeuger-Wirkungsgrades	73
6.3.4	Identifizierung der Brennstoffwärmestrom-Aufteilung	75
6.4	Vergleich von Messung und Rechnung	77
6.5	Detaillierung der Trommellevel-Berechnung	80
6.6	Dynamische Validierung	83
6.6.1	Linearisierung	85
6.6.2	Beschreibung der dynamischen Validierung	87
6.6.3	Validierungsergebnisse	89

7	<u>Verbesserung/Überprüfung des Lastprognose-, Bilanzierungs- und Optimierungssystems</u>	93
7.1	Beschreibung des LBO-Systems	93
7.2	Auswirkungen der Prozess-Validierung auf das LBO-System	96
7.3	Verbesserung der Bilanzierung durch Parameteridentifikation	98
8	<u>Zusammenfassung</u>	99
9	<u>Literatur</u>	102
10	<u>Anhang</u>	105

Abkürzungen, Formelzeichen und Indices

Abkürzungen

AK	Abhitzekessel	GuD	Gas und Dampf
Bl.	Block	HKW	Heizkraftwerk
D	Dampf	TK	Trommelkessel
DT	Dampfturbine	v.M.	vom Messbereich
G	Generator	W	Wasser
Gln.	Geichung(en)	WDT	Wasserdampf tafel
GT	Gasturbine		

Formelzeichen

A	Fläche	<u>u</u>	Eingangsvektor
<u>A</u>	Systemmatrix	V	Volumen
a	Strecke	<u>V</u>	validierte Messgrößen
<u>B</u>	Eingangsmatrix	v	spezifisches Volumen
<u>C</u>	Ausgangsmatrix	w	WDT-Übertragungsfaktoren
<u>D</u>	Durchgangsmatrix	<u>x</u>	Zustandsvektor
<u>f</u>	Nebenbedingungen	<u>y</u>	Ausgangsvektor
G	Gütekriterium	α	Winkel
<u>G</u>	Gewichtungsmatrix	β	Startvektor
g	Gewichtung	Δ	Differenz
h	Enthalpie, Höhe	$\Delta\vartheta$	Grädigkeit
i, j	Zählvariablen	∂	Differentialoperator
<u>J</u>	Jakobimatrix	ϑ	Temperatur
k	Faktor, Zeitpunkt	σ	(Ko-) Varianz
l	Level	τ	Tagesverlauf
<u>M</u>	Messgrößen		
m	Masse		
\dot{m}	Massenstrom		
max	Maximumoperator		
<u>N</u>	bilineare Matrix		
P	Leistung		
p	Druck		
\dot{Q}	Wärmestrom		
r	Radius		
<u>S</u>	(Ko-) Varianzmatrix		
t	Zeit		
T	Abtastzeit		

Indices

*	bezogen	nB	nach Block
0	Bezugsgröße	norm	normiert
Anz	Anzapfung	o	oben
abs	Absolut	P	Parameter
aus	Ausgang	p	Prognose
B	Brennstoff	R	berechnete Größe
bez	Bezogen	Rohrltg.	Rohrleitung
bilin.	Bilinear	RL	Rücklauf
D	Dynamisch	RMS	Root-Mean-Square
d	diskret	RS	Reduzierstation
DE	Dampferzeuger	S	Stationär
det.	detailliert	satt	Sattdampfbereich
dyn	Dynamisch	Sp	Speicher
E	Entnahme	Spw	Speisewasser
ECO	Economiser	stat	Stationär
ein	Eingang	T	Turbine
el	Elektrisch	TG	Turbine u. Generator
F	Fehler	th	thermisch
FD	Frischdampf	Tr	Trommel
Fg	Fehlergrenze	u	Eingangsgröße, unten
GD	Gegendruck	ÜH	Überhitzer
Gr	Grädigkeit	V	validierte Messgröße
H	Heizstrom	v	vor
Heizw.	Heizwasser	vB	vor Block
HK	Heizkondensator	VD	Verdampfer
Hn	Heiznetz	VL	Vorlauf
K	Kovarianz	W	Wasser
KA	Kreisabschnitt	X	unbekannte Eingangsgr.
Lauf	Laufzeit	y	Ausgangsgröße
Leit.	Leitung		
Lev	Trommel-Level		
M	Messgröße		
max	maximal		
messber	Messbereich		
min	minimal		
N	Nebenbedingung		
n	nach		

1 Einleitung

Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Betriebsführungssystemen ist die Bereitstellung in sich konsistenter Datensätze. Dies gilt sowohl für die produktionstechnische Betriebsführung, die konsistente Energie- und Massenstrombilanzen benötigt, als auch für die anlagentechnische Betriebsführung, die auf zuverlässigen Anlagenzustands-/Verschleißdiagnosen bzgl. der wesentlichen Anlagen- und Maschinenkomponenten aufbaut /1/.

Da Messungen jedoch stets mit messstellenspezifischen Ungenauigkeiten behaftet sind, bedarf es einer intelligenten Fehlerausgleichsrechnung. Der Nachteil der hierzu entwickelten und bisher eingesetzten Validierungs-Algorithmen ist, dass sie ein stationäres Prozess- und Anlagenzustandsverhalten voraussetzen, d.h. die Messdatenvalidierung darf nur in „ruhigen“, eingeschwungenen Zeitabschnitten des Prozessablaufes erfolgen, s. /2-11/. Dabei ist es nicht ausreichend, wenn nur die Signalverläufe einzelner Messgrößen stationäres Verhalten aufweisen, vielmehr müssen alle Ein- und Ausgangsgrößen des betrachteten Prozessabschnittes stationäres Verhalten aufweisen.

Auch bei Online-Verfahren /8/, die eine fortlaufende Überwachung der Anlage zu diskreten Zeitpunkten ermöglichen, führt die Validierung nur bei abschnittsweisen stationären Prozesszuständen zu sinnvollen Ergebnissen.

Um die Messdatenvalidierung auch beim Auftreten transienter Prozesszustände einsetzen zu können, wie z.B. beim An- und Abfahren einer Anlage, bedarf es einer dynamischen Messdatenvalidierung. Voraussetzung für eine dynamische Messdatenvalidierung ist

- eine abschnittsweise sorgfältige dynamische Modellbildung sowie
- die Bestimmung der Gewichtungsmatrizen für die zu validierenden Messdaten und der Nebenbedingungen (implizite dynamische Modellgleichungen).

In Kapitel 2 ist die Entwicklung von zwei verschiedenen dynamischen Validierungsalgorithmen beschrieben. Ihre Wirkungsweise wird an generierten transienten Messdatenverläufen getestet und mit der konventionellen stationären Validierung verglichen.

Die dynamischen Validierungsalgorithmen werden im Folgenden auf transiente Messdatenverläufe verschiedener Prozessbereiche von dem im Kapitel 3 beschriebenen Heizkraftwerk der Universität Stuttgart-Vaihingen angewendet.

In Kapitel 4 wird die dynamische Validierung im Schnittstellenbereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ angewandt. Es werden die Wärmestrom-Messstellen auf ihre Zuverlässigkeit überprüft und mit der bereits entwickelten Methode „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ validierte Messdatensätze erzeugt, die sowohl in der Energie- als auch in der Massenstrombilanz Konsistenz aufweisen.

Der Prozessbereich „Turbine/Heizkondensatoren“ wird im Kapitel 5 modelltechnisch abgebildet und mit dem Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ gekoppelt. Die Gesamtvalidierung der beiden Teilbereiche ermöglicht die Erzeugung konsistenter Datensätze sowie die Berechnung messtechnisch nicht erfasster Prozessgrößen und die Identifikation von unbekanntem Modell-Parametern.

In Kapitel 6 wird der Bereich „Dampferzeuger“ von Block 5 mithilfe eines dynamischen Modells abgebildet. Nach einer sorgfältig durchgeführten Parameteridentifikation erfolgt die Verifizierung des dynamischen Modells mittels des Vergleiches von Messung und Rechnung. Schließlich werden mit der in Kapitel 2 entwickelten Methode „Dynamische Validierung“ die transienten Messdatensätze dieses Prozessbereiches validiert.

In Kapitel 7 wird das von der Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik entwickelte Lastprognose-, Bilanzierungs- und Optimierungssystem beschrieben. Es werden die Auswirkungen von Bilanzierungsungenauigkeiten auf die Blockeinsatz-Optimierung untersucht und an konkreten Fallbeispielen die Vorteile der in den vorigen Kapiteln entwickelten dynamischen Validierung aufgezeigt.

2 Validierungsalgorithmen

Prinzipiell stellt die Validierung eine Fehler-Ausgleichsrechnung dar, bei der unscharfe Prozess-Messgrößen derart verändert werden, dass die Nebenbedingungen, meist implizite Modellgleichungen, Konsistenz aufweisen. Dabei besteht die Möglichkeit, die Messstellen gemäß ihrer Fehlertoleranzen unterschiedlich zu gewichten.

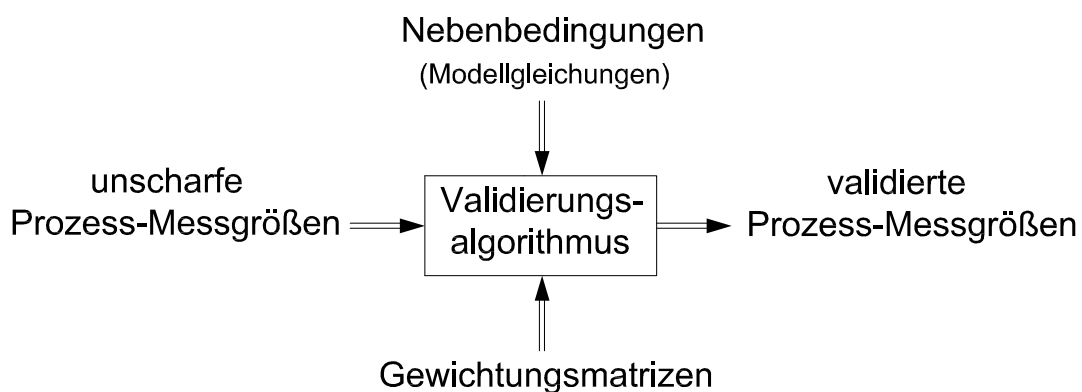


Bild 2/1: Schema der Validierung

Im folgenden Kapitel ist die stationäre Validierung ausführlich beschrieben. In Kap. 2.2 steht die Entwicklung von Validierungsalgorithmen für transiente Prozessverläufe im Vordergrund. Abschließend werden die unterschiedlichen Verfahren an generierten dynamischen Datensätzen getestet und verglichen.

Alle Validierungsuntersuchungen erfolgen aus numerischen Gründen sowie auch in der Regelungstechnik üblich, im per-unit-system, d.h. anhand bezogener Größen

$$X^* = \frac{X_{\text{Absolut}}}{X_{\text{Bezug}}} = \frac{X}{X_0}.$$

2.1 Stationäre Validierung

Die Algorithmen zur Messdatenvalidierung bei transientem Prozess-/Anlagenverhalten basieren auf einem stationären Validierungs-Algorithmus. In diesem Kapitel wird einführend dieser stationäre Validierung-Algorithmus beschrieben.

Es gibt zwei gängige Möglichkeiten der stationären Validierung. Ein Verfahren behandelt die Nebenbedingungen (Modellgleichungen) nach der Methode von Lagrange. Bei diesem Verfahren werden die Messwerte derart korrigiert, dass die Nebenbedingungen exakt erfüllt werden, s. /2-9/.

Im zweiten Validierungsverfahren werden die Nebenbedingungen einzeln gewichtet, s. /10/ und /11/. So können eventuelle Unschärfen in bestimmten Nebenbedingungen durch eine schwächere Gewichtung berücksichtigt werden. Diese unscharfen Nebenbedingungen werden dann von den validierten Messwerten nicht exakt erfüllt. Im Folgenden wird ausschließlich das zweite Verfahren behandelt.

2.1.1 Herleitung des stationären Validierungs-Algorithmus

Die hier vorgestellte stationäre Validierung geht von der quadratischen Fehlerausgleichsfunktion

$$F(\underline{V}) = (\underline{V} - \underline{M})^T \underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + \underline{f}(\underline{V})^T \underline{G}_N \underline{f}(\underline{V}) \Rightarrow \text{Min} \quad (2/1)$$

aus. Dabei ist:

- \underline{V} Vektor der validierten Messgrößen
- \underline{M} Messgrößenvektor
- \underline{G}_M Gewichtungsmatrix für die Messgrößen
- \underline{G}_N Gewichtungsmatrix für die Nebenbedingungen
- $\underline{f}(\underline{V})$ Vektor der impliziten Nebenbedingungen.

a) Gewichtung der Messabweichungen $(\underline{V} - \underline{M})_i$

Zur Gewichtung der einzelnen Messabweichungen $(\underline{V} - \underline{M})_i$ bietet sich der Bezug auf die Streuungen σ_i an. Da die einzelnen Abweichungen quadratisch in der Fehlerausgleichsfunktion eingehen, stellt die Kovarianzmatrix

$$\underline{\underline{S}}_K = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_{1i}^2 & \dots & \sigma_{1m}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1}^2 & \dots & \sigma_i^2 & \dots & \sigma_{im}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1}^2 & \dots & \sigma_{mi}^2 & \dots & \sigma_m^2 \end{pmatrix} \quad (2/2)$$

ein geeignetes Maß für die lineare Gewichtung der jeweiligen Abweichungen dar. Die Messabweichungen der einzelnen Messstellen sind im allgemeinen voneinander unabhängig, daher können die Kovarianzen σ_{ik}^2 zu Null gesetzt werden. Somit besitzt $\underline{\underline{S}}_K$ diagonalform, sie wird im Folgenden als Varianzmatrix bezeichnet:

$$\underline{\underline{S}} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_i^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{pmatrix} \quad (2/3).$$

Da $\underline{\underline{S}}$ eine Diagonalmatrix ist, lässt sich die inverse Varianzmatrix $\underline{\underline{S}}^{-1}$ einfach bestimmen. Zum leichteren Verständnis werden die Bezeichnungen für die Gewichtungsmatrix $\underline{\underline{G}}_M = \underline{\underline{S}}^{-1}$ und für die einzelnen Gewichtungen $g_i = 1/\sigma_i^2$ eingeführt:

$$\underline{\underline{S}}^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1^2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/\sigma_i^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1/\sigma_m^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & g_i & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & g_m \end{pmatrix}_M = \underline{\underline{G}}_M \quad (2/4).$$

Die Unsicherheiten σ_i der einzelnen Messgrößen M_i sind ebenso unbekannt wie deren Ist-Werte. Es müssen daher Schätzwerte verwendet werden.

b) Gewichtung der Nebenbedingungen

Der Term $\underline{f}(\underline{V})$ in Gl. (2/1) entspricht dem Vektor der impliziten Nebenbedingungen, in Abhängigkeit der validierten Messgrößen \underline{V} :

$$\underline{f}(\underline{V}) = \begin{pmatrix} f_1(\underline{V}) \\ \vdots \\ f_i(\underline{V}) \\ \vdots \\ f_n(\underline{V}) \end{pmatrix} \quad (2/5).$$

Die einzelnen Nebenbedingungen können durch die Diagonalmatrix

$$\underline{\underline{G}}_N = \begin{pmatrix} g_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & g_i & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & g_n \end{pmatrix}_N \quad (2/6)$$

unterschiedlich gewichtet werden. Somit kann eine eventuelle Unschärfe in einer Nebenbedingung durch eine geringere Gewichtung berücksichtigt werden.

Sollen alle Nebenbedingungen möglich exakt erfüllt werden, so erreicht man dies durch die unterschiedliche Dimensionierung der Gewichtungsmatrizen $\underline{\underline{G}}_N$ und $\underline{\underline{G}}_M$:

$$g_{iN} \gg g_{\max M}, \quad i = 1, n.$$

$$\text{Mit: } g_{\max M} = \max(g_{jM}), \quad j = 1, m.$$

Das heißt, dass alle Gewichtungen g_{Ni} der einzelnen Nebenbedingungen sehr viel größer zu wählen sind als die maximale Messgrößengewichtung $g_{M\max}$.

c) Minimierung der quadratischen Fehlerausgleichsfunktion

Bedingung für das Minimum der quadratischen Fehlerausgleichsfunktion (2/1) ist, dass die partiellen Ableitungen nach \underline{V} gleich Null sind:

$$\frac{\partial F(\underline{V})}{\partial \underline{V}} = 2 \underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + 2 \underbrace{\left(\frac{\partial \underline{f}(\underline{V})}{\partial \underline{V}} \right)^T}_{\underline{J}^T} \underline{G}_N \underline{f}(\underline{V}) = \underline{0} \quad (2/7a)$$

$$\Rightarrow \underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + \underline{J}^T \underline{G}_N \underline{f}(\underline{V}) = \underline{0} \quad (2/7b)$$

Die in obiger Gleichung enthaltene Jakobi-Matrix \underline{J} berechnet sich wie folgt:

$$\underline{J} = \frac{\partial \underline{f}(\underline{V})}{\partial \underline{V}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial v_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial v_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial v_m} \end{pmatrix} \quad (2/8)$$

2.1.2 Lineare Betrachtung

Der Aufwand für die Lösung der Gleichung (2/7) nach den validierten Messgrößen \underline{V} wird durch eine **Linearisierung** um den Arbeitspunkt $\underline{V}_0 = \underline{M}$ stark reduziert:

$$\begin{aligned} \underline{f}(\underline{V}) &= \underline{J}_0 \Delta \underline{V} + \underline{f}_0 \\ \underline{f}(\underline{V}) &= \underline{J}_0 (\underline{V} - \underline{V}_0) + \underline{f}_0 \\ \underline{f}(\underline{V}) &= \underline{J}_0 \underline{V} + \underline{f}_0 - \underline{J}_0 \underline{V}_0 \end{aligned} \quad (2/9)$$

mit:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{V} &= \underline{V} - \underline{V}_0 = \underline{V} - \underline{M} \\ \underline{f}_0 &= \underline{f}(\underline{V}_0) = \underline{f}(\underline{M}) \\ \underline{J}_0 &= \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{V}} \right|_{\underline{V}_0} = \frac{\partial \underline{f}(\underline{M})}{\partial \underline{M}} \end{aligned}$$

Eingesetzt in Gleichung (2/7b) folgt:

$$\underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + \underline{J}_0^T \underline{G}_N (\underline{J}_0 \underline{V} + \underline{f}_0 - \underline{J}_0 \underline{V}_0) = \underline{0} \quad (2/10)$$

$$\text{und sortiert nach } \underline{V}: \underbrace{(\underline{G}_M + \underline{J}_0^T \underline{G}_N \underline{J}_0)}_{\underline{B}} \underline{V} = \underbrace{-\underline{J}_0^T \underline{G}_N (f_0 - \underline{J} \underline{V}_0) + \underline{G}_M \underline{M}}_{\underline{C}} \quad (2/11)$$

$$\text{Multiplikation von links mit } \underline{B}^{-1} \text{ führt auf: } \underline{V} = \underline{B}^{-1} \underline{C} \quad (2/12)$$

Das Ergebnis der stationären Validierung ist der Vektor \underline{V} , der die validierten Messgrößen enthält.

⇒ Diese herkömmliche stationäre Validierungsmethode wird im Kapitel 4 im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ eingesetzt, und zwar beim Vergleich mit der nachfolgenden Methode „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“.

2.2 Entwicklung dynamischer Validierungs-Algorithmen

Um die Messdatenvalidierung auch im Online-Betrieb, d.h. auch während transienter Prozesszustände einsetzen zu können, bedarf es der Entwicklung von Validierungs-Algorithmen, die die Prozessdynamik berücksichtigen.

Im Folgenden werden zwei Lösungswege beschrieben, und zwar

- ein vereinfachter Lösungsweg, bei dem die transienten Messdatenverläufe in äquivalente stationäre Messdatenverläufe transformiert werden, s. hierzu Kapitel 2.2.2., sowie
- ein genereller Lösungsweg, bei dem die transienten Messdatenverläufe unter Verwendung dynamischer Modellgleichungen validiert werden, s. hierzu Kapitel 2.2.3.

Da die zu validierenden Messdatensätze nicht kontinuierlich, sondern nur zu diskreten Zeitpunkten k zur Verfügung stehen, muss zur Berücksichtigung der Dynamik ein geeignetes numerisches Berechnungsverfahren verwendet werden. Hierzu sind das Rückwärtsdifferenzenverfahren, das dem numerischen Integrationsverfahren nach Euler entspricht, sowie die exakte Diskretisierung der dynamischen Systemgleichungen untersucht worden. Dabei hat sich die exakte Diskretisierung - trotz geringer Nachteile in der Rechenzeit - aufgrund ihrer höheren

Genauigkeit als vorteilhafter erwiesen. Die notwendigen Schritte von einer kontinuierlichen zur einer diskreten Betrachtungsweise sind im Folgenden aufgeführt.

2.2.1 Diskretisierung des allg. linearen Differentialgleichungs-Systems

Ausgehend vom allgemeinen linearen dynamischen Prozessmodell in kontinuierlicher Form

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B} u(t) \quad (2/13)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{C} \underline{x}(t) + \underline{D} u(t) \quad (2/14)$$

wird im Folgenden die diskrete Betrachtung verwendet, s. /12/:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A}_d \underline{x}(k) + \underline{B}_d u(k) \quad (2/15)$$

$$\underline{y}(k) = \underline{C}_d \underline{x}(k) + \underline{D}_d u(k) \quad (2/16).$$

Dabei ergeben sich die diskreten Systemmatrizen zu

Systemmatrix:
$$\underline{A}_d = e^{\underline{A}T} = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\underline{A}^{\mu} T^{\mu}}{\mu!} \quad (2/17)$$

Eingangsmatrix:
$$\underline{B}_d = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\underline{A}^{\mu} T^{\mu}}{(\mu+1)!} T^{\mu+1} \underline{B} \quad (2/18)$$

Ausgangsmatrix:
$$\underline{C}_d = \underline{C} \quad (2/19)$$

Durchgangsmatrix:
$$\underline{D}_d = \underline{D} \quad (2/20)$$

2.2.2 Validierung nach Elimination der Prozessdynamik

Bei dieser dynamischen Validierungsmethode wird zunächst das transiente Prozessverhalten mittels eines entsprechenden prädiktiv wirkenden Dynamikmodells eliminiert, und danach das resultierende stationäre Verhalten des Prozesses validiert, s. Bild 2/2.

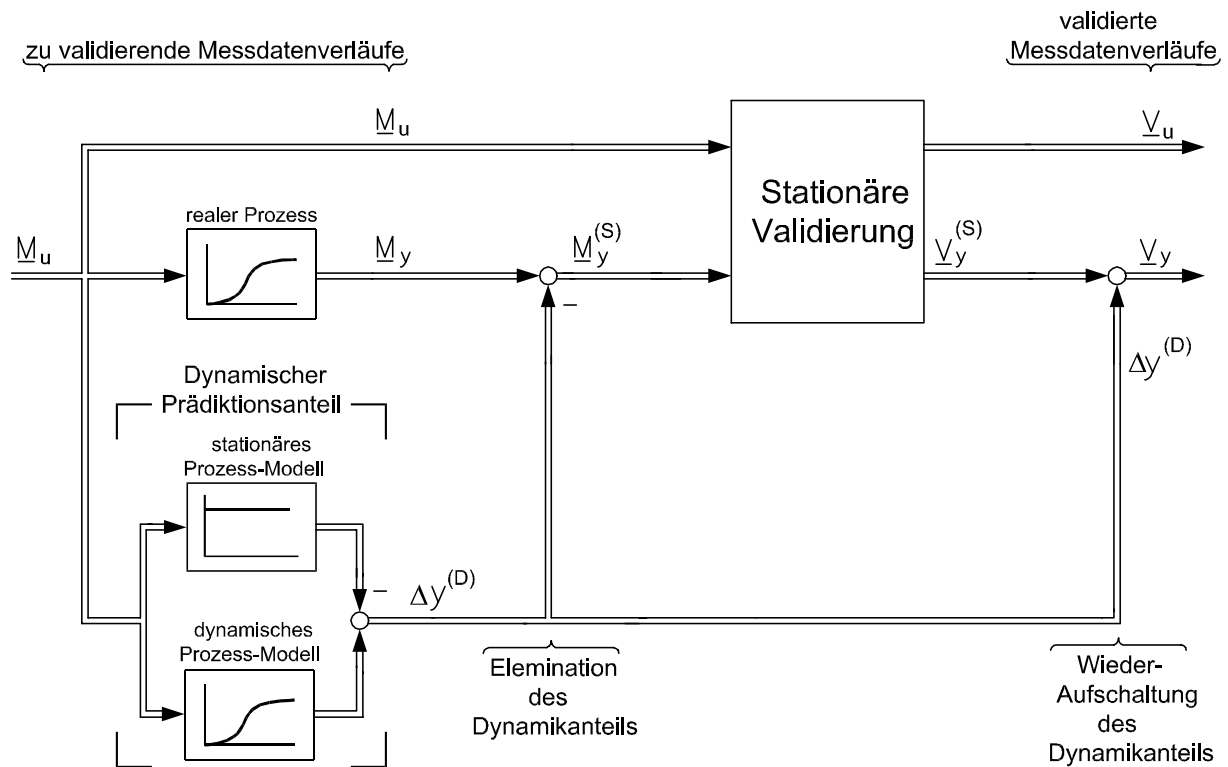


Bild 2/2: Validierung nach Elimination der Prozessdynamik

Um den dynamischen Prädiktionsanteil $\Delta \underline{y}^{(D)}$ zu berechnen, benötigt man das stationäre Prozessmodell M_S sowie auch das dynamische Modell M_D :

$$\Delta \underline{y}^{(D)} = M_D(\underline{M}_u) - M_S(\underline{M}_u) \quad (2/21)$$

mit \underline{M}_u : Messvektor der Eingangsgrößen.

Wird der berechnete dynamische Anteil vom realen Prozessausgang abgezogen, so bleibt das stationäre Prozessverhalten $\underline{M}_y^{(S)}$ übrig:

$$\underline{M}_y^{(S)} = \underline{M}_y - \Delta \underline{y}^{(D)} \quad (2/22).$$

Das damit berechnete Prozessausgangsverhalten $\underline{M}_y^{(S)}$ kann nun stationär, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, validiert werden. Nach erfolgter Validierung wird das zuvor eliminierte dynamische Prozessverhalten auf den stationär validierten Prozessausgangsvektor wieder aufaddiert:

$$\underline{V}_y = \underline{V}_y^{(S)} + \Delta \underline{y}^{(D)} \quad (2/23).$$

Gleichzeitig mit der oben beschriebenen stationären Validierung der Prozess-Ausgangs-Messgrößen werden auch die gemessenen Prozess-Eingangs-Messgrößen \underline{M}_u validiert. Das Ergebnis ist der Vektor \underline{V}_u .

Abschließend werden die Teilergebnisse \underline{V}_y und \underline{V}_u zusammengefasst:

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} \underline{V}_y \\ \underline{V}_u \end{pmatrix} \quad (2/24).$$

⇒ In Kapitel 4 werden nach dieser Methode die Prozessdaten im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ validiert.

2.2.3 Dynamische Validierung

Durch die Messung der Ausgangsgrößen des Prozesses zum Zeitpunkt k ergibt sich mithilfe eines diskreten Dynamikmodells die Möglichkeit, die zu früheren Zeitpunkten $k-1, k-2, \dots, k-n$ gemessenen Ein-/Ausgangsgrößen sowie die berechneten Zustandsgrößen zu validieren. Auch schon bereits validierte Größen können zu einem späteren Zeitpunkt *nachvalidiert* werden. Daher sind verschiedenartige Validierungs-Algorithmen möglich.

Einige Validierungs-Algorithmen sind im Rahmen dieser Arbeit implementiert und getestet worden. Dabei hat sich der nachfolgende vorgestellte Validierungsalgorithmus - im Hinblick auf die Rechenzeit und der numerischen Stabilität - als besonders günstig erwiesen.

a) Festlegung des Mess- und Validierungsvektors

Folgende gemessenen bzw. berechneten Größen sollen validiert werden:

	$t(k-2)$	$t(k-1)$	$t(k)$	t
- gemessene Ausgangsgrößen:		$\underline{M}_y(k-1)$	$\underline{M}_y(k)$	
- gemessene Eingangsgrößen:	$\underline{M}_u(k-2)$	$\underline{M}_u(k-1)$		
- berechnete Zustandsgrößen:	$\underline{x}(k-2)$			

Die obigen Prozessgrößen werden im allgemeinen Messvektor \underline{M} zusammengefasst:

$$\underline{M} = \begin{pmatrix} \underline{M}_y(k) \\ \underline{M}_y(k-1) \\ \underline{M}_u(k-1) \\ \underline{M}_u(k-2) \\ \underline{x}(k-2) \end{pmatrix} \quad (2/25).$$

Die berechnete Zustandsgröße $\underline{x}(k-2)$ wird aus Sicht des Validierungs-Algorithmus wie eine Messgröße behandelt. Ihre Berechnung erfolgt aus bereits zu früheren Zeitpunkten validierten Größen:

$$\underline{x}(k-2) = \underline{A}_d \underline{V}_x(k-3) + \underline{B}_d \underline{V}_u(k-3) \quad (2/26)$$

Der Algorithmus liefert als Ergebnis die validierten Ausgangs-Messgrößen $\underline{V}_y(k)$ bzw. $\underline{V}_y(k-1)$, die validierten Eingangs-Messgrößen $\underline{V}_u(k-1)$ bzw. $\underline{V}_u(k-2)$ und die validierte Zustandsgröße $\underline{V}_x(k-2)$.

Sie werden im allgemeinen Validierungsvektor \underline{V} zusammengefasst:

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} \underline{V}_y(k) \\ \underline{V}_y(k-1) \\ \underline{V}_u(k-1) \\ \underline{V}_u(k-2) \\ \underline{V}_x(k-2) \end{pmatrix} \quad (2/27)$$

Eine zusammenfassende Darstellung der obigen Beziehungen ist im Bild 2/3 wiedergegeben.

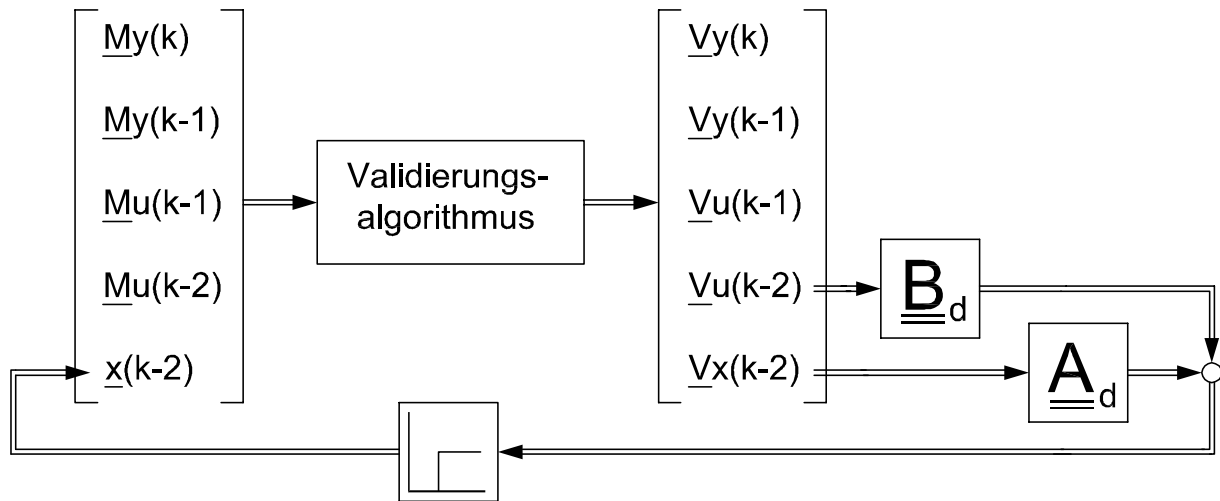


Bild 2/3: Dynamische Validierung

Anstelle der Messrößen $\underline{M}_y(k-1)$ und $\underline{M}_u(k-2)$ könnten auch die bereits validierten Größen $\underline{V}_y(k-1)$ und $\underline{V}_u(k-2)$ im Messvektor \underline{M} enthalten sein. In diesem Fall würde der Validierungs-Algorithmus diese Größen *nachvalidieren*. Im Folgenden wird jedoch auf diese Möglichkeit verzichtet. Der Grund hierfür ist, dass sich ein eventueller Validierungsfehler zum Zeitpunkt k auf die folgenden Zeitschritte auswirken würde.

b) Minimierung der quadratischen Fehlerfunktion

Wie beim stationären Validierungs-Algorithmus kann die partiell abgeleitete quadratische Fehlerfunktion (vgl. Gl. 2/7) zu Null gesetzt werden:

$$\frac{\partial F(\underline{V})}{\partial \underline{V}} = 2 \underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + 2 \underline{J}^T \underline{G}_N \underline{f}(\underline{V}) = 0 \quad (2/28),$$

mit $\underline{f} \triangleq$ Vektor der impliziten Nebenbedingungen, d.h. der Modellgleichungen.

Die Nebenbedingungen $\underline{f}(\underline{V})$ ergeben sich unter der realistischen Annahme, dass alle Ausgangsgrößen gegenüber den Eingangsgrößen verzögert sind, und damit die Durchgangsmatrix $\underline{D}_d = \underline{0}$ ist, wie folgt:

$$\underline{V}_y(k) = \underline{C}_d \underline{x}(k) \quad \text{und} \quad \underline{V}_y(k-1) = \underline{C}_d \underline{x}(k-1) \quad (2/29).$$

In benötigter impliziter Schreibweise folgt:

$$\underline{f}(\underline{V}) = \begin{pmatrix} \underline{V}_y(k) - \underline{C}_d \underline{x}(k) \\ \underline{V}_y(k-1) - \underline{C}_d \underline{x}(k-1) \end{pmatrix} \quad (2/30).$$

Die Berechnung des Zustandes $\underline{x}(k)$ ergibt sich nach Gl.(2/26):

$$\underline{x}(k) = \underline{A}_d \underline{x}(k-1) + \underline{B}_d \underline{V}_u(k-1) \quad (2/31).$$

Der in den Nebenbedingungen enthaltene Zustand $\underline{x}(k-1)$ berechnet sich aus den gesuchten Validierten Größen zu:

$$\underline{x}(k-1) = \underline{A}_d \underline{V}_x(k-2) + \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) \quad (2/32).$$

Gl.(2/28) in Gl.(2/29) eingesetzt führt auf:

$$\underline{x}(k) = \underline{A}_d^2 \underline{V}_x(k-2) + \underline{A}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) + \underline{B}_d \underline{V}_u(k-1) \quad (2/33).$$

Setzt man die Zustände, die jetzt ausschließlich von dem gesuchten Validierungsvektor \underline{V} abhängen, in die impliziten Nebenbedingungen (Gl.2/30) ein, so erhält man:

$$\underline{f}(\underline{V}) = \begin{pmatrix} \underline{V}_y(k) & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \underline{V}_x(k-2) & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) & -\underline{C}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-1) \\ \underline{V}_y(k-1) & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{V}_x(k-2) & -\underline{C}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) & \end{pmatrix} \quad (2/34).$$

Die impliziten Nebenbedingungen sind im Bild 2/4 als Blockschaltbild dargestellt.

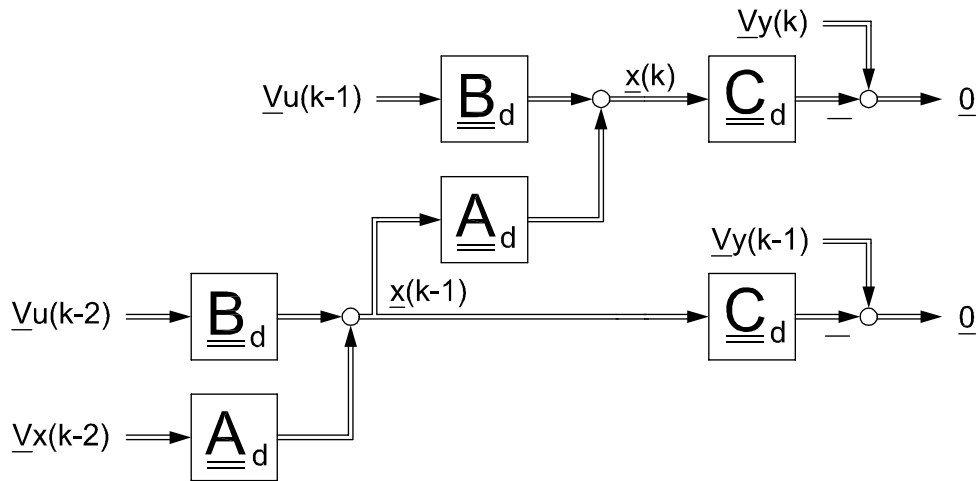


Bild 2/4: Implizite Nebenbedingungen

Die Jakobi-Matrix \underline{J} berechnet sich aus den Gleichungen (2/27) und (2/34) zu:

$$\underline{J} = \frac{\partial \underline{f}(\underline{V})}{\partial \underline{V}} = \begin{pmatrix} \underline{I} & \underline{0} & -\underline{C}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \\ \underline{0} & \underline{I} & \underline{0} & -\underline{C}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \end{pmatrix} \quad (2/35)$$

Ausgehend von einem linearem Prozessdynamikmodell kann aus den Nebenbedingungen der validierte Messvektor \underline{V} ausgeklammert werden:

$$\underline{f}(\underline{V}) = \begin{pmatrix} \underline{V}_y(k) & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \underline{V}_x(k-2) & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) & -\underline{C}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-1) \\ \underline{V}_y(k-1) & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{V}_x(k-2) & -\underline{C}_d \underline{B}_d \underline{V}_u(k-2) & \underline{V}_u(k-2) \end{pmatrix} \quad (2/36)$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{I} & \underline{0} & -\underline{C}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \\ \underline{0} & \underline{I} & \underline{0} & -\underline{C}_d \underline{B}_d & -\underline{C}_d \underline{A}_d^2 \end{pmatrix}}_{\underline{J}} \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{V}_y(k) \\ \underline{V}_y(k-1) \\ \underline{V}_u(k-1) \\ \underline{V}_u(k-2) \\ \underline{V}_x(k-2) \end{pmatrix}}_{\underline{V}} \quad (2/37)$$

Gl.(2/37) eingesetzt in Gl.(2/28) ergibt:

$$\underline{\underline{G}}_M (\underline{V} - \underline{M}) + \underline{\underline{J}}^T \underline{\underline{G}}_N \underline{\underline{J}} \underline{V} = \underline{0} \quad (2/38)$$

und nach \underline{V} sortiert:

$$\underbrace{(\underline{\underline{G}}_M + \underline{\underline{J}}^T \underline{\underline{G}}_N \underline{\underline{J}})}_{\underline{\underline{E}}} \underline{V} = \underbrace{\underline{\underline{G}}_M \underline{M}}_{\underline{\underline{F}}} \quad (2/39)$$

Gl.(2/39) wird nach dem validierten Messvektor \underline{V} aufgelöst, so dass folgt:

$$\underline{V} = \underline{\underline{E}}^{-1} \underline{\underline{F}} \quad (2/40)$$

Der „Ergebnisvektor“ der validierten Messgrößen kann somit explizit berechnet werden.

⇒ Nach dieser Methode werden in Kapitel 6 die Prozessdaten im Bereich Dampferzeuger validiert.

2.3 Test und Vergleich der verschiedenen Validierungsmethoden

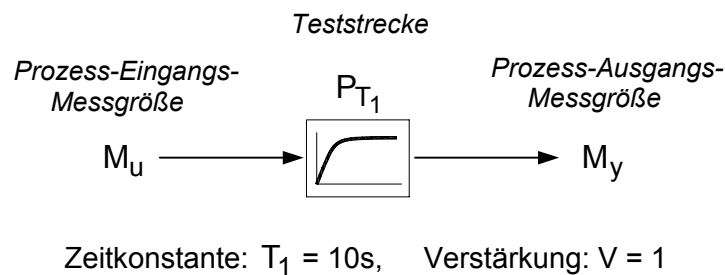
Die hergeleiteten Validierungsalgorithmen für die Methoden

- „stationäre Validierung“, vgl. Kapitel 2.1,
- „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“, vgl. Kapitel 2.2.2, und
- „dynamische Validierung“, vgl. Kapitel 2.2.3,

werden in diesem Kapitel an einem einfachen Modellbeispiel getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen.

2.3.1 Beispiel-Prozess

Als Beispiel-Prozess dient ein einfaches Dynamikmodell 1. Ordnung mit P_{T_1} -Übertragungsverhalten.



Die Messdatensätze M_u und M_y werden mit einer Abtastzeit von $T = 2\text{s}$ mithilfe einer Simulation generiert. Die Prozess-Eingangsmessgröße ist beim Start der Simulation zu Null gesetzt. Sie springt als Prozessanregung zum Zeitpunkt $t=10\text{s}$ auf den Wert 1 und behält diesen bis zum Ende des betrachteten Prozessgeschehens bei.

2.3.2 Vorgabe der Gewichtungparameter

Für die einzelnen Messabweichungen $(V - M)_i$ werden die Streuungen $\sigma_i = 1\%$ vorausgesetzt. Damit berechnen sich die quadratischen Gewichtungen g_{i_M} zu

$$g_{i_M} = \frac{1}{\sigma_i^2} = \frac{1}{0,01^2} = 10^4.$$

Die im Folgenden beschriebenen Nebenbedingungen werden im Gegensatz zu den Messgrößen sehr viel höher gewichtet, und zwar zu:

$$g_{i_N} = 10^6 \times g_{i_M} = 10^{10}.$$

Sie werden deshalb von den validierten Prozess-Messgrößen nahezu exakt erfüllt.

2.3.3 Verwendete Nebenbedingungen

Für den Algorithmus „Stationäre Validierung“ und „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ gilt die (stationäre) Nebenbedingung

$$f(\underline{V})_k = f(V_y, V_u)_k = V_y(k) - V_u(k) = 0. \quad (2/41)$$

Für den Algorithmus „Dynamische Validierung“ gilt die Nebenbedingung laut Gl.(2/32). Die diskreten Matrizen berechnen sich nach Kapitel 2.2.1 aus den kontinuierlichen Matrizen des P_{T_1} -Übertragungsverhaltens zu, vgl. /13/:

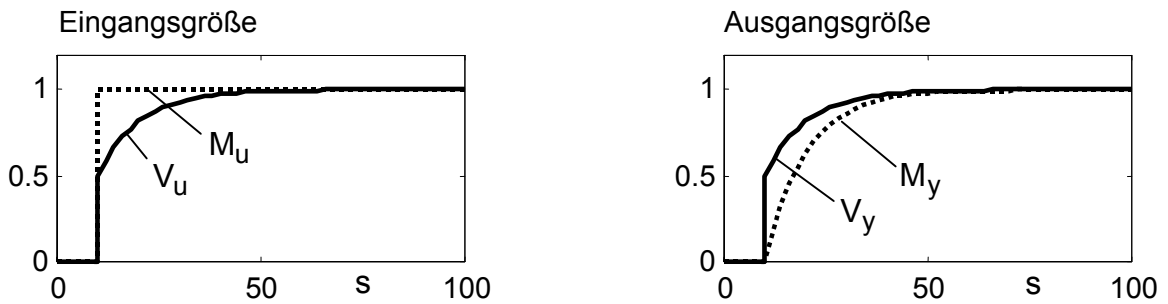
$$\begin{array}{l} \text{Zustandsgleichung} \\ \text{Ausgangsgleichung} \end{array} \quad \begin{array}{l} \dot{x} = -\underbrace{\frac{1}{T_1}}_A x + \underbrace{\frac{1}{T_1}}_B u \\ y = \underbrace{1}_C \cdot x \end{array} \quad (2/42).$$

2.3.4 Validierungsbeispiele

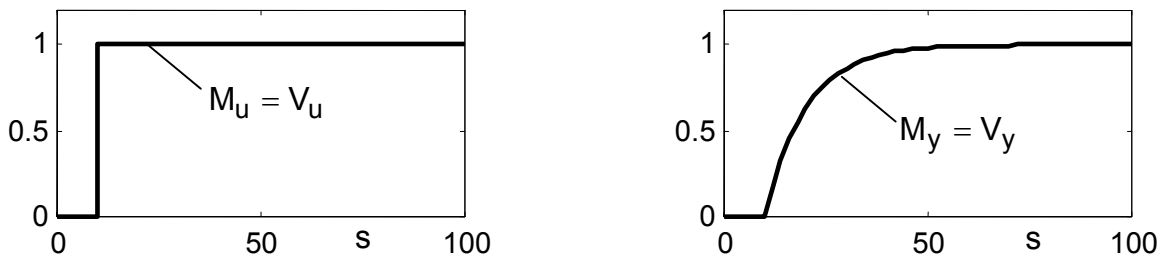
Im Bild 2/5 a sind die Prozessmessgrößen M_u und M_y und ihre validierten Verläufe V_u und V_y mit der Methode „Stationäre Validierung“ dargestellt. Durch die stationäre Nebenbedingung wird die Prozessträgheit als Messfehler interpretiert. Die validierten Verläufe gewährleisten die Konsistenz in der Gleichung $\underline{V}_y = \underline{V}_u$. Somit wird die korrekte Messung durch die stationäre Validierung verfälscht.

Im Gegensatz hierzu werden die Messverläufe M_u und M_y bei den Methoden „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ und „Dynamische Validierung“ aufgrund der Berücksichtigung der Prozessdynamik nicht verändert, d.h. sie entsprechen den validierten Verläufen, s. Bild 2/5 b und c.

a) Methode „Stationäre Validierung“



b) Methode „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“



c) Methode „Dynamische Validierung“

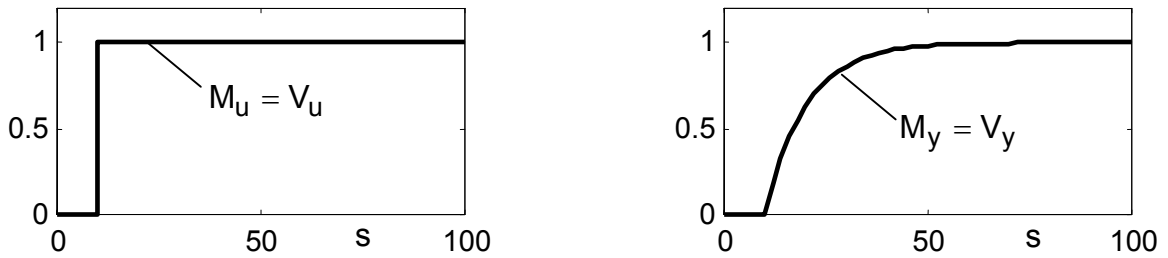
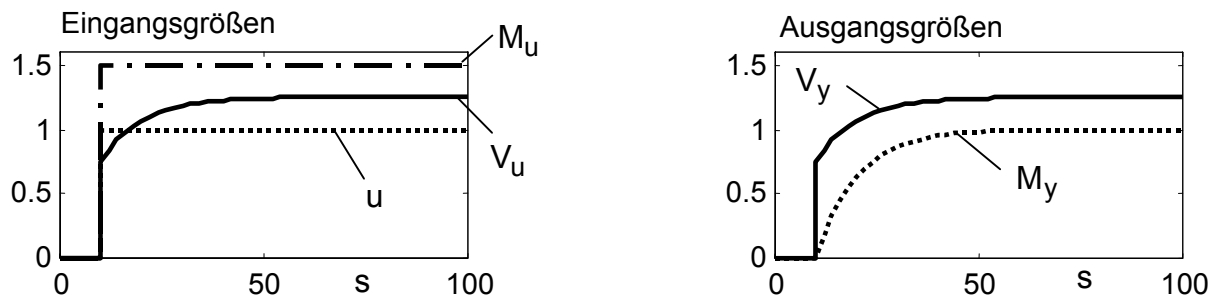


Bild 2/5: Validierung der Prozessmessgrößen am Beispiel eines P_{T1} -Übertragungsverhalten

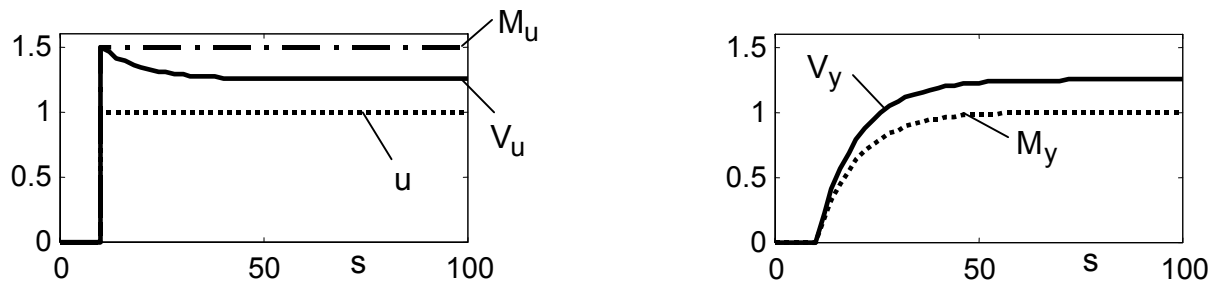
In den folgenden Fällen werden den generierten Messverläufen zu Testzwecken ein „künstlicher“ Messfehler aufgeschaltet. Im Bild 2/6 a-c wird aus dem unverfälschtem Verlauf u die Messung $M_u = 1,5 \cdot u$ generiert und der jeweiligen Validierungsmethode als Prozess-Eingangsmessgröße zugeführt. Bei Bild 2/6 a und b wird durch die stationäre Nebenbedingung der Fehler im eingeschwungenen Zustand zwischen der validierten Prozess-Ein- und Ausgangsgröße aufgeteilt. Die „dynamische Validierung“

in c verändert die Prozess-Ein- und Ausgangsgrößen unwesentlich. Der Messfehler wird als *Systemdynamik* interpretiert und daher kaum korrigiert, was aber gegenüber den zum Teil „falsch“ validierenden beiden anderen Methoden nicht von Nachteil ist.

a) Methode „Stationäre Validierung“



b) Methode „Validierung nach Elimination der Prozessträgheit“



c) Methode „Dynamische Validierung“

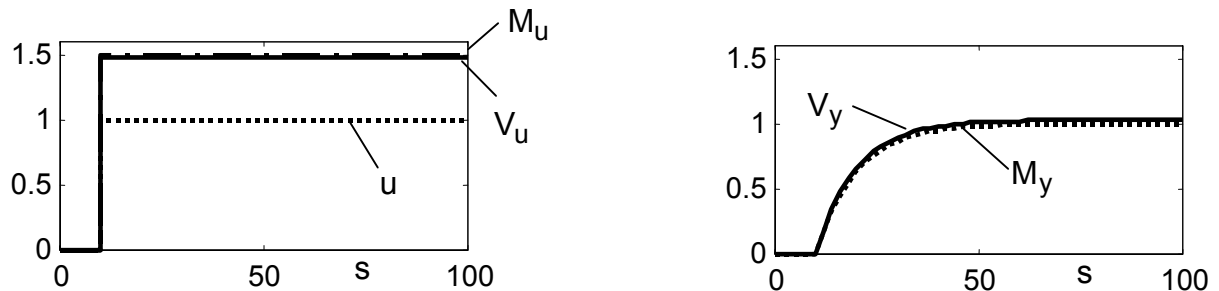


Bild 2/6: Validierung nach künstlich generiertem Messfehler bei der Prozess-Eingangsmessgröße

Das prinzipielle Verhalten bei einem generierten Messfehler bei der Prozess-Ausgangsgröße entspricht dem in Bild 2/6.

Darüberhinaus sind im Rahmen dieser Arbeit weitere Prozessbeispiele untersucht worden, und zwar mit folgenden Übertragungsverhalten

- P_{T_2} - Strecke
 - P_{T_3} - Strecke
 - P_{T_1} - Strecke mit zwei Eingängen
 - zwei P_{T_1} -Strecken parallel
 - zwei P_{T_2} -Strecken parallel
 - Strecke mit offenem Integrator.
- } zeitverzögerte Strecken mit Übertragungsverhalten n-ter Ordnung ohne offenen Integrator

2.4 Gewonnene Erkenntnisse

Bei den drei untersuchten Methoden der Prozessdatenvalidierung bewirkt erst die Verknüpfung mehrerer Nebenbedingungen eine Verbesserung der Messdatensätze. Das obige Beispiel soll lediglich die Wirkungsweise der drei verschiedenen Ansätze aufzeigen.

Die Methode „stationäre Validierung“ kann ausschließlich stationäre Nebenbedingungen berücksichtigen. Sie ist daher für transiente Prozesse nicht geeignet, s. Bild 2/5a. Messfehler werden entsprechend der Gewichtung der Messstellen unter Berücksichtigung ihrer Verwendung in den Nebenbedingungen aufgeteilt. Es werden bei ausschließlich einer mit Ungenauigkeiten behafteten Messstelle alle anderen über die Nebenbedingungen verknüpften Messverläufe durch die Validierung verändert.

Bei der Methode „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ wird im Vorfeld die Prozessträgheit berücksichtigt. Diese Methode kann demnach bei transientem Prozessverhalten eingesetzt werden, wobei aber nur der stationäre Anteil validiert wird. Obwohl auftretende Messfehler die Berechnung des Dynamikanteils beeinflussen, werden die verwendeten stationären Nebenbedingungen im eingeschwungenen Zustand erfüllt. Der Algorithmus ist gut verständlich und baut auf der Methode der „Stationären Validierung“ auf. Für eingeschwungene Zustände werden ebenfalls bei nur einer mit Ungenauigkeiten behafteten Messstelle alle anderen über die Nebenbedingungen verknüpften Messverläufe durch die Validierung verändert.

Bei der dynamischen Validierung werden der stationäre sowie auch der transiente Prozessanteil validiert, wobei die Konsistenz der dynamischen Nebenbedingungen immer gewährleistet ist. Verschwindet im eingeschwungenem Zustand aufgrund von Messfehlern der Dynamikanteil nicht, ist keine Konsistenz in den für diesen Zeitbereich geltenden stationären Nebenbedingungen vorhanden.

3 Das Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen

Die Universität Stuttgart betreibt im Universitätsbereich Stuttgart-Vaihingen seit 1959 ein eigenes Heizkraftwerk.

Hauptaufgabe des Heizkraftwerks ist die Wärmeversorgung der universitätseigenen Lehr- und Forschungseinrichtungen, des Instituts der Max-Planck-Gesellschaft, der Fraunhofer-Gesellschaft, der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt-technik sowie von rund 3000 Studentenwohnungen. Die Versorgung mit Fernkälte in Form von Kaltwasser fällt ebenfalls in die Zuständigkeit des Heizkraftwerkes.

Die Stromerzeugung des Heizkraftwerks ist abhängig von der jeweiligen Wärmeerzeugung und wird lastabhängig durch Bezug von den Neckarwerken Stuttgart ergänzt.

Soweit es mit den Versorgungsaufgaben vereinbar ist, wird das HKW auch zu Lehr- und Forschungszwecken genutzt.

3.1 Anlagenbeschreibung

Im Bild 3/1 ist das Gesamt-Anlagenschaltbild des Heizkraftwerks dargestellt.

Die Gas- und Dampfanlage besteht aus zwei Gasturbinen (Block 41 und 42) mit jeweils einem Abhitzekessel und einer Dampfturbine (Block 43). Block 50 kann mit leichtem Heizöl oder mit Gas betrieben werden. Er besitzt einen Trommel-dampferzeuger mit Naturumlauf. Block 60 kann lediglich mit leichtem Heizöl gefeuert werden, sonst ist er baugleich mit Block 50. Die elektrischen und thermischen Nennleistungen sind in Tabelle 3/1 enthalten.

Der Wasserkreislauf für die Fernwärmeversorgung besteht aus Vor- und Rücklauf, die parallel verlegt sind. Zur Wärmespeicherung steht der in Bild 3/1 dargestellte Wärmespeicher zur Verfügung sowie der Vor- und Rücklauf des gesamten Heiznetzes.

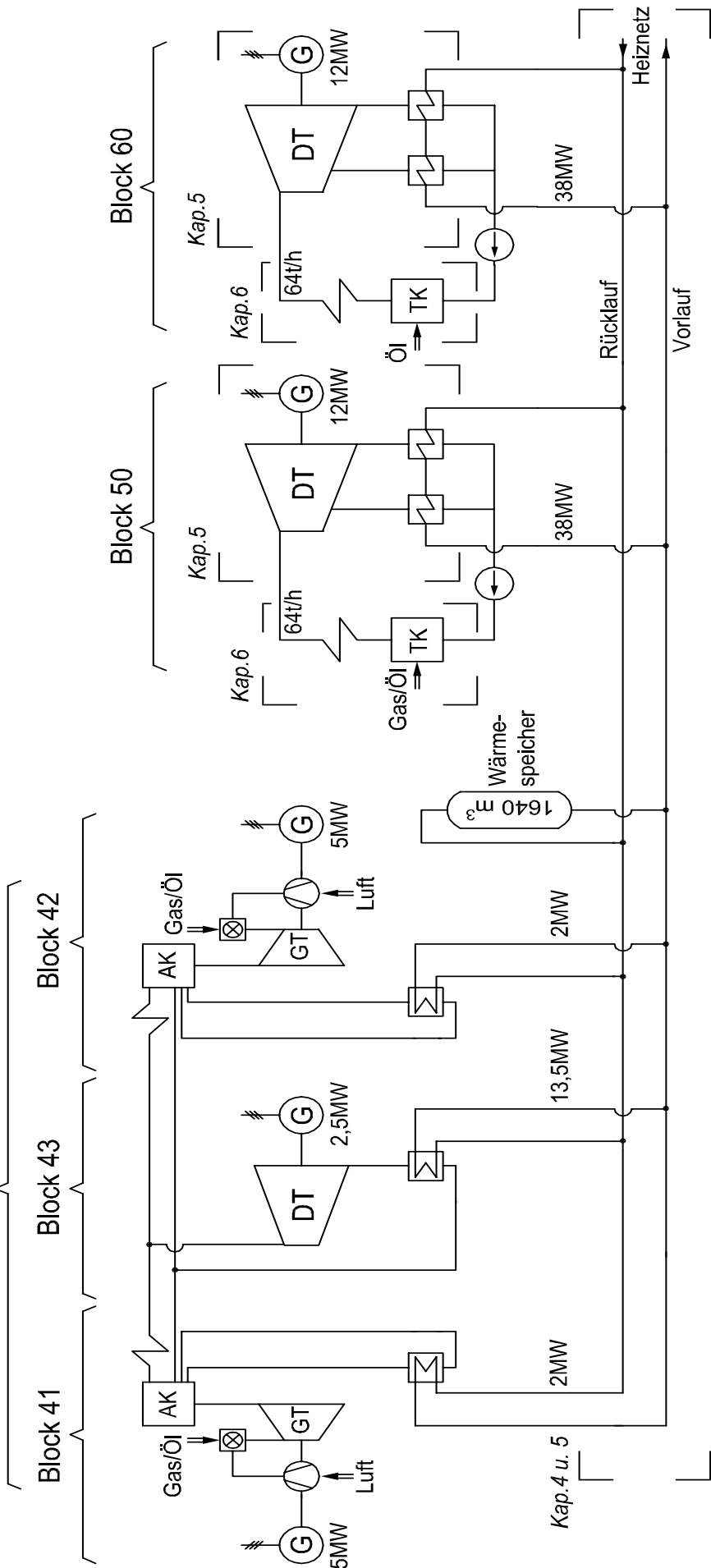
Block	elektrische Leistung P [MW_{el}]	Wärmeleistung \dot{Q} [MW_{th}]	Feuerung
41	5	2	Gas
42	5	2	Gas
43	2,5	13,5	—
50	12	38	Gas/Öl
60	12	38	Öl
Summe	36,5	93,5	

} GuD-Anlage

Tabelle 3/1: Leistungsdaten Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen

In den nachfolgenden Kapiteln 4 bis 6 werden die Bereiche „HKW-Ausgang/Heiznetz“, „Turbine/Heizkondensatoren“ und „Dampferzeuger“ am Beispiel von Block 50 modelltechnisch abgebildet und die Prozessmessgrößen validiert.

GuD-Anlage



- GT Gasturbine
- AK Abhitzeessel
- DT Dampfturbine
- TK Trommelkessel

Bild 3/1: Gesamt-Anlagenschaltbild Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen

3.2 Online-Messdatenerfassung

Zur Validierung sowie zur Überprüfung der für die Kraftwerkseinsatzoptimierung benötigten Bilanzgleichungen ist seitens der Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik (S/A) im Heizkraftwerk eine Online-Messdatenerfassung von ca. 300 wesentlichen Prozessgrößen mit einer zusätzlichen Datenübertragung zu den ca. 1km entfernten Institutsräumen installiert worden. Der prinzipielle Aufbau der Messdatenerfassung und Übertragung ist im Bild 3/2 veranschaulicht.

Im Heizkraftwerk wird das Prozess-Leittechniksystem Contronic P der Firma H&B/ABB eingesetzt. Das Prozessinformationsmanagement- und Archivierungssystem PlantConnect /14/ der Firma ABB erfasst im 5s-Takt ca. 300 prozessrelevante Signale vom Prozessleitsystem und speichert diese in einer SQL-Datenbank, s. *PC1*¹⁾. Die so erfassten Messdaten können mittels genormten Datenprotokoll TCP/IP aus der Datenbank ausgekoppelt und über das Datennetzwerk der Universität an den PlantConnect-Client der Abteilung S/A übertragen werden, s. *PC2*. Dort stehen die erfassten Daten dann für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Prozessdatenvalidierungen, Parameteridentifikationen und Langzeitauswertungen zur Verfügung.

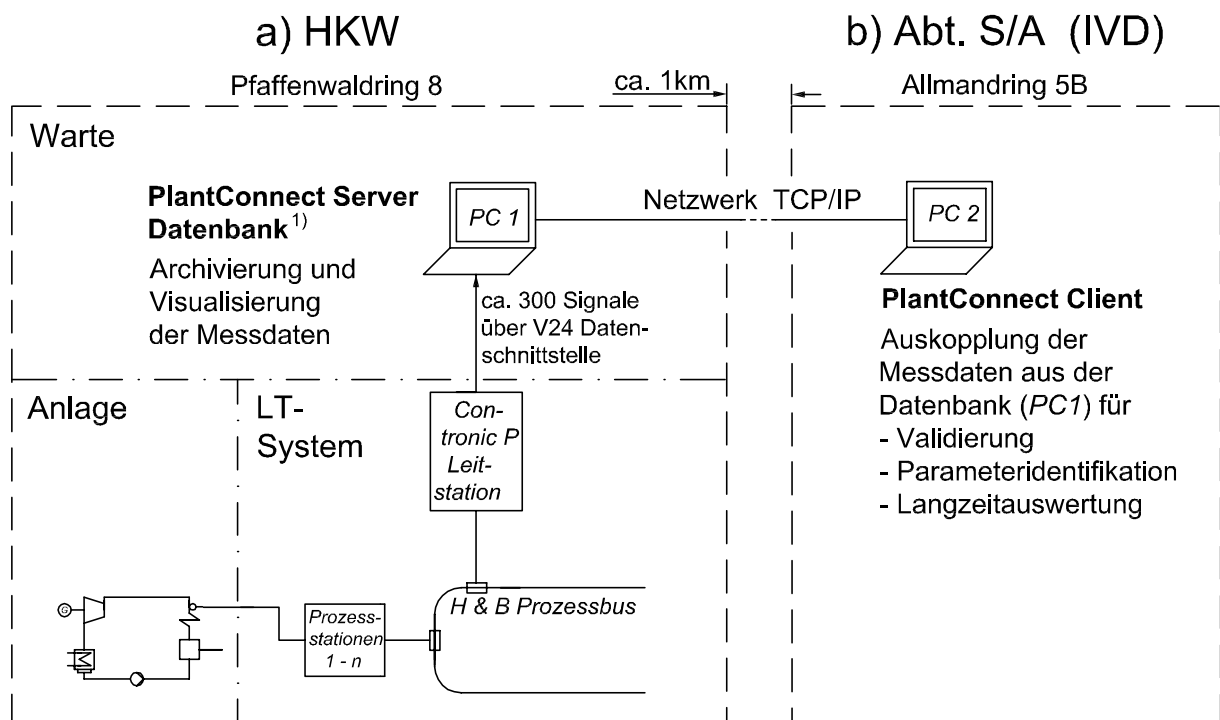


Bild 3/2: Online-Messdatenerfassung

¹⁾ Zusätzlich werden die Daten von Prozess- und Anlagengrößen, die der Anlagen-Lebensdauerüberwachung dienen, von der HKW-Betriebsleitung in komprimierter Form archiviert.

4 Validierung des Bereiches „HKW-Ausgang/Heiznetz“ nach Elimination der Prozessdynamik

Das vom HKW Stuttgart-Vaihingen versorgte Fernheiznetz hat die Aufgabe, die Universitätsgebäude mit Fernwärme zu versorgen. Um die Wärmeversorgung auch bei Engpässen aufrecht zu erhalten und um in der Sommer- und Übergangszeit - wenn möglich - ohne nächtliche Wärmeversorgung auszukommen, stehen acht Verdrängungsspeicher mit einer Gesamtspeicherkapazität von 1640m^3 zur Verfügung, s. Bild 4/1. Zusätzlich kann durch Anheben der Vorlauftemperatur auch die Speicherkapazität des Rohrleitungssystems genutzt werden. Das Heizwasser besitzt eine Vorlauftemperatur von maximal 130°C . Der Vorlauf-Druck wird auf 4,5 bar geregelt.

In Bezug auf die zu implementierende Online-Validierung besteht besonderer Handlungsbedarf an den Wärmestrom-Messstellen der Heizkondensatoren der einzelnen Blöcke sowie an der Gesamtwärmestrom-Messstelle am „HKW-Austritt“/ „Heiznetz-Eintritt“, da diese Messstellen laut Betriebspersonal mit relativ großen Ungenauigkeiten behaftet sind.

Im Folgenden wird daher die Zuverlässigkeit der betreffenden Messstellen untersucht und ihre Messdaten einer dynamischen Validierung unterzogen. Eine Gesamtübersicht über die Wärmestrommessstellen sowie über sonstige Messstellen im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ ist im Bild 4/1 enthalten.

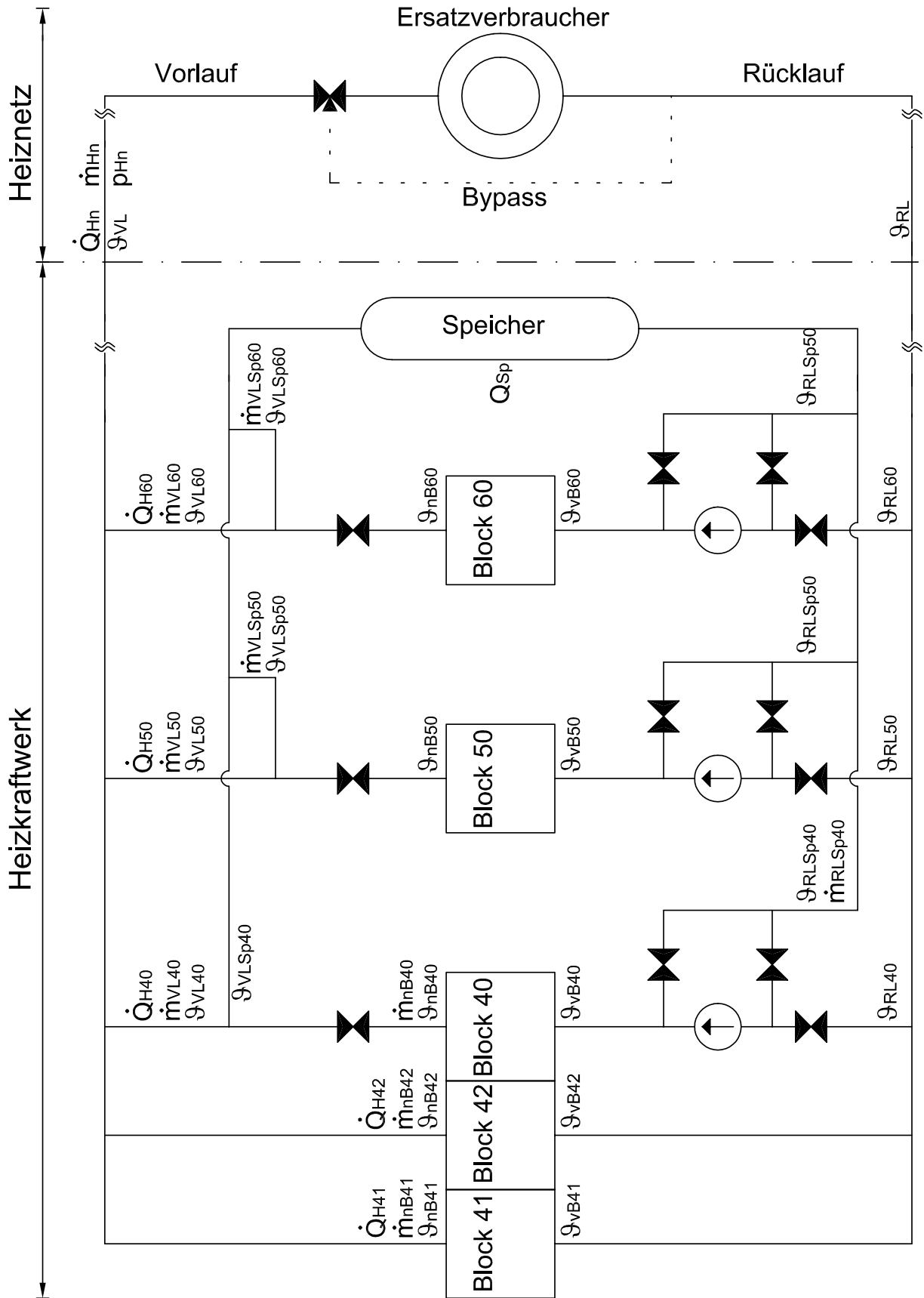


Bild 4/1: Relevante Messstellen zur Wärmestrom-Bilanzierung im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“

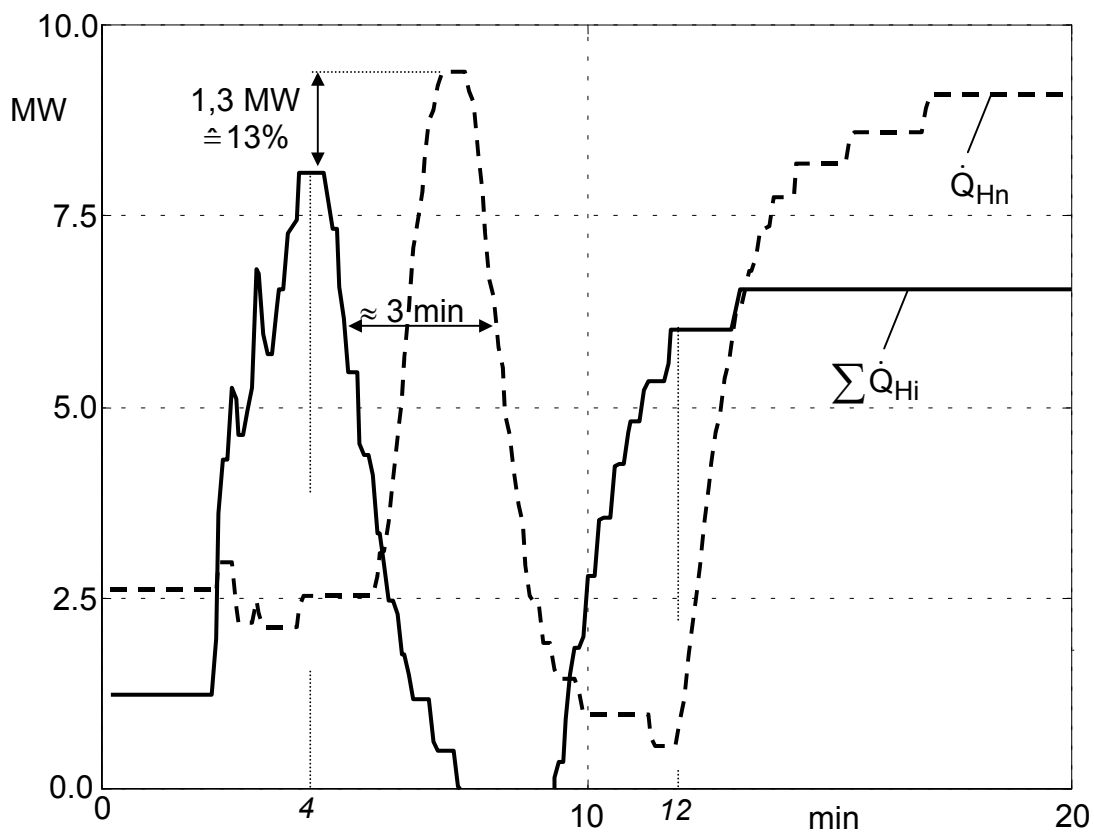
4.1 Überprüfung der Wärmestrom-Messstellen im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“

Im Folgenden wird der an das Heiznetz abgegebene Wärmestrom mit der Summe der von den einzelnen Blöcken ausgekoppelten Teil-Wärmeströme verglichen. Speicher-Wärmeströme von und zu den Verdrängungsspeichern müssen nicht berücksichtigt werden, da die obigen Teil-Wärmeströme nach den Abzweigungen der Speicherleitungen gemessen werden. Zugrunde gelegt wird die Energiestrombilanz, wobei unter der Voraussetzung verlustfreier Betrachtungsweise gilt:

$$\dot{Q}_{Hn} \stackrel{!}{=} \dot{Q}_{H40} + \dot{Q}_{H41} + \dot{Q}_{H42} + \dot{Q}_{H50} + \dot{Q}_{H60} \quad (\text{ideal}) \quad (4/1).$$

Die im Bild 4/2 dargestellten Verläufe erstrecken sich über einen Zeitraum von 20 Minuten, und zwar von 1:57 - 2:17 Uhr am Dienstag den 12.09.2000.

Die kurzzeitige Zunahme der Wärmeauskopplung nach ca. 4 Minuten, wie auch die längerfristige Wärmeversorgung ab ca. 12 Minuten, wird aus den Verdrängungsspeichern über die Leitung von Block 50 bezogen.



$$\dot{Q}_{Hn} = \dot{Q}_{H40} + \dot{Q}_{H41} + \dot{Q}_{H42} + \dot{Q}_{H50} + \dot{Q}_{H60} + \Delta\dot{Q}_{\text{Fehler}} \quad (\text{real})$$

Bild 4/2: Vergleich der Wärmestrom-Verläufe

Wie anhand von Bild 4/2 zu sehen, treten größere Inkonsistenzen in der Energiebilanz auf. Die Differenz zwischen der Summe der gemessenen Teil-Wärmeströme und dem Gesamt-Wärmestrom beträgt in diesem Zeitausschnitt ca. $\Delta\dot{Q}_{\text{Fehler}} = 1,3 \text{ MW}$; das entspricht 13% des mittleren Wärmestromes, der zu dieser Jahreszeit tagsüber aus dem Heiznetz an die Wärmeverbraucher zu liefern ist. Die systematische Inkonsistenz ab ca. 12 Minuten des in Bild 4/2 dargestellten Zeitbereichs ist die Grundlage für die weiterführende Untersuchungen im Kapitel 4.4. Zusätzlich tritt zwischen den Messverläufen ein zeitlicher Versatz von etwa 3 Minuten auf. Dieser beruht im wesentlichen darauf, dass die Summe der von den einzelnen Blöcken abgegebenen und dort gemessenen Teil-Wärmeströme verzögert an der Messstelle des Gesamt-Wärmestroms am HKW-Ausgang/Heiznetz-Eingang ankommt. Die notwendige Berechnung dieser Laufzeit, die für die später durchgeführte Validierung benötigt wird, wird im Kapitel 4.2 erläutert.

4.2 Berücksichtigung der Massenstrom-Laufzeit zwischen den Wärmestrom-Messstellen

Die Massenstrom-Laufzeit T_{Lauf} ist zum einem abhängig von der Rohrleitungslänge $l_{\text{Rohrft.}}$ zwischen den Wärmestrom-Messstellen der einzelnen Blöcke und der Gesamtwärmestrom-Messstelle sowie von der Fließgeschwindigkeit des Heizwassers $v_{\text{Heizw.}}$:

$$T_{\text{Lauf}} = \frac{l_{\text{Rohrftg.}}}{v_{\text{Heizw.}}} \quad (4/2).$$

Da die Heizrohre im Betrieb vollständig mit Wasser gefüllt sind, kann anstelle der Rohrleitungslänge die Masse $m_{\text{Heizw.}} = V_{\text{Heizw.}} \cdot \delta_{\text{Heizw.}}$ und der Fließgeschwindigkeit der Gesamtmassenstrom \dot{m}_{Hn} im Vorlauf zur Berechnung der Laufzeit herangezogen werden:

$$T_{\text{Lauf}} = \frac{m_{\text{Heizw.}}}{\dot{m}_{\text{Hn}}} = \frac{V_{\text{Heizw.}} \cdot \delta_{\text{Heizw.}}}{\dot{m}_{\text{Hn}}} \quad (4/3).$$

Da der Heizwasserdruck auf 4,5 bar geregelt wird und sich Temperaturänderungen nur geringfügig auf die Dichte des Heizwassers auswirken, wird diese im Folgenden als konstant angenommen:

$$\delta_{\text{Heizw.}} = \text{const} \quad (4/4).$$

Um die Volumina zwischen den einzelnen Blockmessstellen und der Gesamtmessstelle zu bestimmen, wurden sämtliche Rohrleitungslängen und -durchmesser im Vorlauf ermittelt. Die Anordnung der Wärmestrom-Messstellen sowie die Gesamtmassenstrom-Messstelle ist im Bild 4/3 dargestellt.

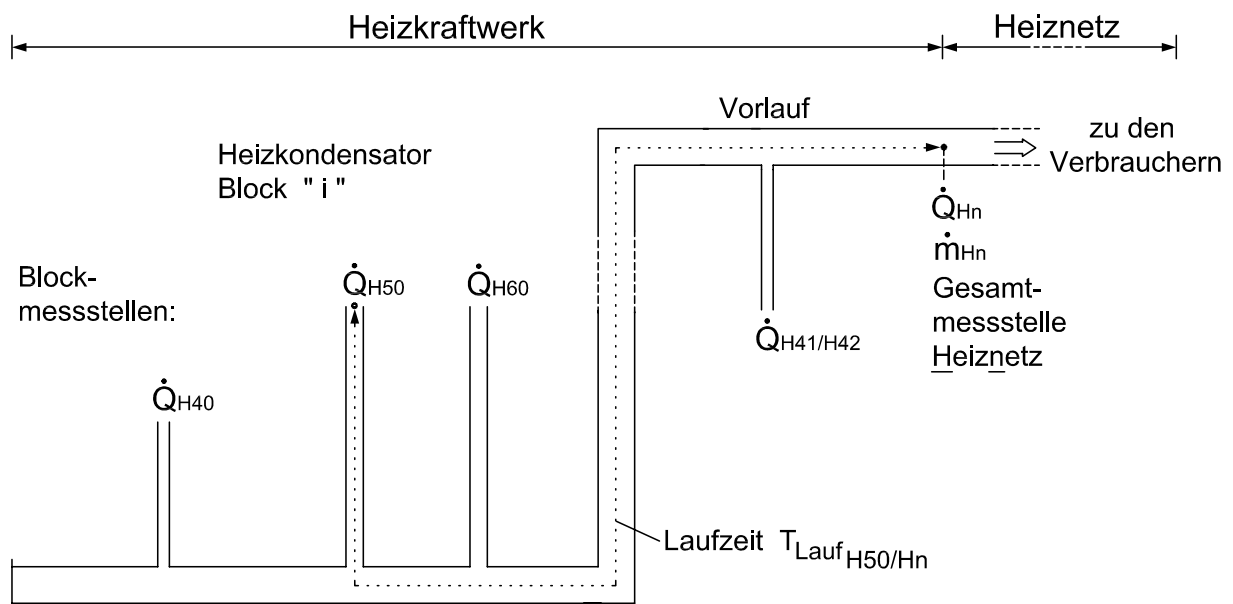


Bild 4/3: Anordnung der Wärmestrom-Messstellen

In Tabelle 4/1 sind die notwendigen Volumina zur Heizwassermassen-Berechnung sowie die maximale thermische Leistung der einzelnen Blöcke zusammengestellt. Wie zu ersehen, sind die Unterschiede der Volumina zwischen den Blockmessstellen 40, 50 sowie 60 und der Gesamtmessstelle geringfügig. Deshalb werden die Heizwassermassen-Unterschiede bei diesen 3 Blöcken im Folgenden vernachlässigt.

Block	Volumen „ $\dot{Q}_{Hi} \rightarrow \dot{Q}_{Hn}$ “	$\dot{Q}_{Hi\max}$
41	$\approx 9,0 \text{ m}^3$	2,0 MW
42	$\approx 9,0 \text{ m}^3$	2,0 MW
40	$\approx 25,9 \text{ m}^3$	13,5 MW
50	$\approx 25,1 \text{ m}^3$	38,0 MW
60	$\approx 24,5 \text{ m}^3$	38,0 MW

Tabelle 4/1: Rohrleitungs-/Wasser-Volumina zwischen einzelnen Blockmessstellen und der Gesamtmessstelle sowie max. thermische Leistung der Blöcke

Bei den Blöcken 41 und 42 handelt es sich um Gasturbinen mit jeweils einem Restwärmetauscher. Wegen ihrer geringen thermischen Leistung, s. Tab. 4/1, werden sie hauptsächlich im Sommer eingesetzt. In all jenen Fällen, an denen ihr Anteil an der Wärmeversorgung vernachlässigbar ist, kann die Dynamik zwischen der Summe der einzelnen Wärmestrom-Messstellen der Blöcke und der Gesamtwärmestrom-Messstelle vereinfacht durch ein Totzeitglied nachgebildet werden:

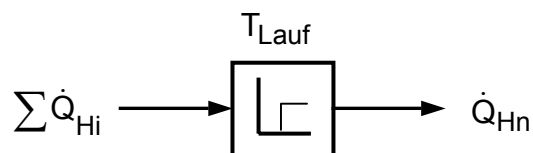


Bild 4/4: Vereinfachtes Wärmestrom-Dynamikmodell

Bei dem im folgenden betrachteten Zeitraum, sowie an den meisten Tagen im Jahr, tragen die Blöcke 41 und 42 keinen bzw. einen sehr geringen Anteil zur Wärmeproduktion bei. In diesen Zeiträumen wird das vereinfachte Wärmestrom-Dynamikmodell im weiteren verwendet.

Innerhalb des betreffenden Rohrleitungsabschnittes zeitlich auftretende Massenstromänderungen $\Delta \dot{m}_{Hn}$ haben Einfluss auf die aktuelle Laufzeit selbst. Dies führt zu einer iterativen Laufzeitberechnung, welche im Anhang A1 näher

beschrieben ist. Im Bild 4/5 ist die Laufzeit T_{Lauf} in Abhängigkeit vom Gesamtmassenstrom \dot{m}_{Hn} mit der Berücksichtigung zurückliegender Massenstromänderungen dargestellt.

Mithilfe einer Parameteridentifizierung ergibt sich für die Masse des Wassers zwischen einer Blockwärmestrom-Messstelle und der Gesamtwärmestrom-Messstelle zu $m_{\text{Heizw.}} = 25\text{t}$, die in Tabelle 4/1 relevanten Volumina bestätigen dieses Ergebnis. Der Betrachtungszeitraum ist identisch mit Bild 4/2.

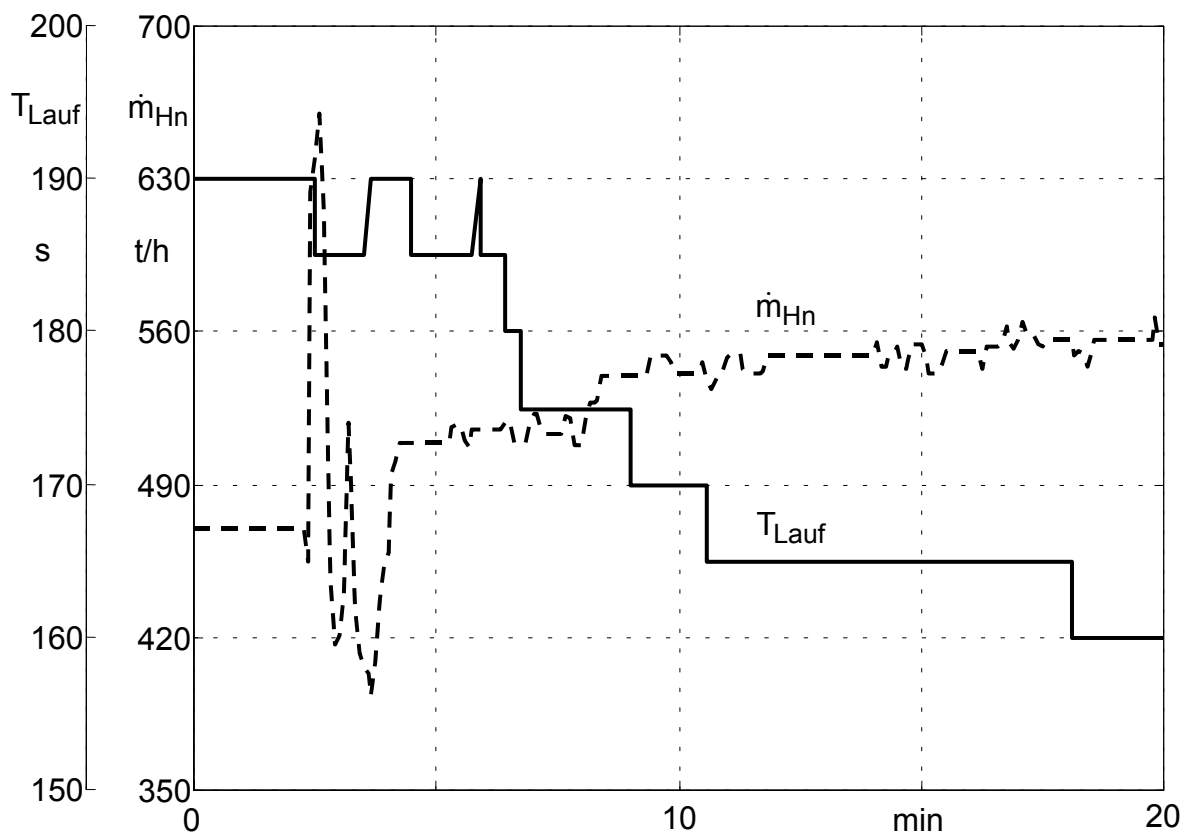


Bild 4/5: Laufzeit in Abhängigkeit vom Gesamtmassenstrom im Heiznetz

4.3 Beschreibung der Validierung

Die obigen Erkenntnisse aus Kapitel 4.1 und 4.2 erlauben eine vereinfachte dynamische Validierung, nach dem Prinzip der „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“, s. Kap. 2.2. Die Ausgangsgleichung für den Validierungsalgorithmus ist die quadratische Fehlerausgleichsfunktion

$$F(\underline{V}) = (\underline{V} - \underline{M})^T \underline{G}_M (\underline{V} - \underline{M}) + \underline{f}(\underline{V})^T \underline{G}_N \underline{f}(\underline{V}) \Rightarrow \text{Min} \quad (4/5)$$

- mit
- \underline{V} Vektor der validierten Messgrößen
 - \underline{M} Messgrößenvektor
 - \underline{G}_M Gewichtungsmatrix für die Messgrößen
 - \underline{G}_N Gewichtungsmatrix für die Nebenbedingungen
 - $\underline{f}(\underline{V})$ Vektor der impliziten Nebenbedingungen.

Der schematische Aufbau der Validierung ist in Bild 4/6 dargestellt, er wird im Folgenden erläutert.

Validiert werden insgesamt 22 Messgrößen, s. Tabelle 4/2 sowie Bild 4/1.

Wärmeströme	Massenströme	Temperaturen
\dot{Q}_{Hn}	\dot{m}_{Hn}	ϑ_{VL40}
\dot{Q}_{H40}	\dot{m}_{VL40}	ϑ_{RL40}
\dot{Q}_{H41}	\dot{m}_{nB41}	ϑ_{nB41}
\dot{Q}_{H42}	\dot{m}_{nB42}	ϑ_{vB41}
\dot{Q}_{H50}	\dot{m}_{VL50}	ϑ_{nB42}
\dot{Q}_{H60}	\dot{m}_{VL60}	ϑ_{vB42}
		ϑ_{VL50}
		ϑ_{RL50}
		ϑ_{VL60}
		ϑ_{RL60}

Tabelle 4/2: Messgrößen

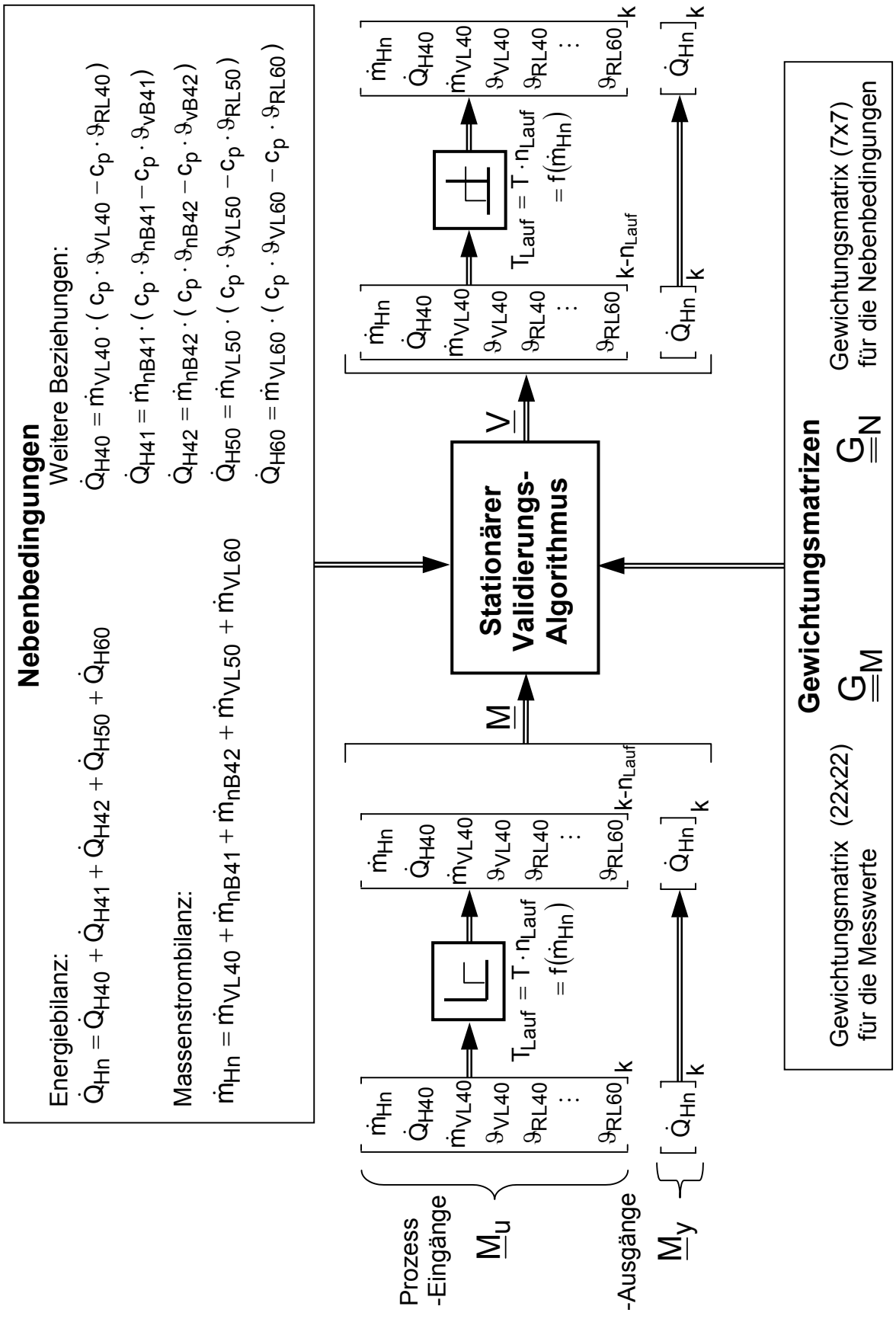


Bild 4/6: Schema der Validierung nach Elimination der Prozessdynamik im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“

Als Bezugsgrößen wurden gewählt

- für Massenströme	\dot{m}_0	=	1000 t/h	} und hieraus resultierend
- für Temperaturen	ϑ_0	=	100 °C	
- für Drücke	p_0	=	4,5 bar	
- für Wärmeströme	\dot{Q}_0	=	117 MW	

4.3.1 Messgrößenvektoren

Der Eingangs-Messvektor \underline{M}_u enthält alle zu validierenden Messgrößen bis auf den Gesamtwärmestrom \dot{Q}_{Hn} . Sie werden um die Laufzeit

$$T_{\text{Lauf}} = T \cdot n_{\text{Lauf}} = f(\dot{m}_{Hn}) \quad T \hat{=} \text{Abtastzeit} \quad (4/6)$$

verzögert dem stationären Validierungsalgorithmus zugeführt. Die Prozessdynamik wird dadurch eliminiert.

Der Ausgangs-Messvektor \underline{M}_y enthält nur die Messgröße \dot{Q}_{Hn} , welche direkt in den stationären Validierungsalgorithmus eingeht.

4.3.2 Nebenbedingungen

Da die Dynamik – hier das Laufzeitverhalten – im Vorfeld eliminiert wurde, erweisen sich stationäre Nebenbedingungen als ausreichend.

Als erste Nebenbedingung wird die Energiebilanz gewählt:

$$\dot{Q}_{Hn} = \dot{Q}_{H40} + \dot{Q}_{H41} + \dot{Q}_{H42} + \dot{Q}_{H50} + \dot{Q}_{H60} \quad (4/7).$$

Als weitere Nebenbedingung wird die Massenstrombilanz verwendet:

$$\dot{m}_{Hn} = \dot{m}_{VL40} + \dot{m}_{nB41} + \dot{m}_{nB42} + \dot{m}_{VL50} + \dot{m}_{VL60} \quad (4/8).$$

Da sich Massenstromänderungen mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten, kann ihre „schnelle“ Dynamik vernachlässigt werden.

Um genügend Redundanz zu erhalten, werden für die Validierung noch fünf weitere Beziehungen für die einzelnen Blockmessgrößen herangezogen:

$$\dot{Q}_{H40} = \dot{m}_{VL40} \cdot (c_p(\vartheta_{VL40}) \cdot \vartheta_{VL40} - c_p(\vartheta_{RL40}) \cdot \vartheta_{RL40}) \quad (4/9)$$

$$\dot{Q}_{H41} = \dot{m}_{nB41} \cdot (c_p(\vartheta_{nB41}) \cdot \vartheta_{nB41} - c_p(\vartheta_{vB41}) \cdot \vartheta_{vB41}) \quad (4/10)$$

$$\dot{Q}_{H42} = \dot{m}_{nB42} \cdot (c_p(\vartheta_{nB42}) \cdot \vartheta_{nB42} - c_p(\vartheta_{vB42}) \cdot \vartheta_{vB42}) \quad (4/11)$$

$$\dot{Q}_{H60} = \dot{m}_{VL60} \cdot (c_p(\vartheta_{VL60}) \cdot \vartheta_{VL60} - c_p(\vartheta_{RL60}) \cdot \vartheta_{RL60}) \quad (4/12)$$

$$\dot{Q}_{H50} = \dot{m}_{VL50} \cdot (c_p(\vartheta_{VL50}) \cdot \vartheta_{VL50} - c_p(\vartheta_{RL50}) \cdot \vartheta_{RL50}) \quad (4/13)$$

Die nachfolgenden Gleichungen (4/14) und (4/15) werden für die Validierung als Nebenbedingungen nicht eingesetzt. Der Grund hierfür ist, dass sie bei einer ausführlichen Überprüfung anhand von Messverläufen nur ungenügend erfüllt werden und somit das Validierungsergebnis verschlechtern.

- Der Gesamt-Wärmestrom ins Heiznetz wurde bis Sept. 1999 mittels der Beziehung

$$\dot{Q}_{Hn} = \dot{m}_{Hn} \cdot (c_p(\vartheta_{VL}) \cdot \vartheta_{VL} - c_p(\vartheta_{RL}) \cdot \vartheta_{RL}) \quad (4/14)$$

bestimmt. Die ungenügende Genauigkeit – speziell der Massenstrom-Messung – war dem HKW-Betriebspersonal bekannt. Daher ist im Oktober 1999 eine neue Gesamt-wärmestrom-Messtelle \dot{Q}_{Hn} installiert worden. Sie stellt eine geschlossene Einheit dar, d.h. ihre Massenstrom- und Temperaturmesswerte sind explizit nicht zugänglich.

- Die Temperaturmischungsgleichung für den Heiznetzvorlauf

$$\frac{\vartheta_{VL40}\dot{m}_{VL40} + \vartheta_{nB41}\dot{m}_{nB41} + \vartheta_{nB42}\dot{m}_{nB42} + \vartheta_{VL50}\dot{m}_{VL50} + \vartheta_{VL60}\dot{m}_{VL60}}{\dot{m}_{VL40} + \dot{m}_{nB41} + \dot{m}_{nB42} + \dot{m}_{VL50} + \dot{m}_{VL60}} \rightarrow \boxed{\text{LC}} \rightarrow \vartheta_{VL} \quad (4/15)$$

beeinflusst die Validierung ebenfalls negativ, und zwar - wie oben dargestellt - auch bei dynamischer Betrachtung.

4.3.3 Gewichtungsmatrix der Messgrößen

Wie eingangs im Abschnitt 2.1.1 ausführlich dargestellt erfolgen die Gewichtungen g_j der Messgrößen X_j umgekehrt-proportional zum Quadrat der Streuungen σ_j^2 . Dabei stellt die Streuung ein Maß für die Abweichung statistischer Werte vom Durchschnitt dar.

Per Definition ist die Fehlergrenze der Höchstwert einer relativen oder absoluten Abweichung. Im Allgemeinen wird für Messgeber die Fehlergrenze Δx_{Fg} , bezogen auf den Messbereich, von den Herstellern angegeben. Diese wird zur Berechnung der Gewichtungen herangezogen. Damit ergibt sich die absolute Streuung zu:

$$\sigma_{iabs} = \Delta x_{Fg\ i} \cdot x_{messber.\ i} \quad (4/16a)$$

und die jeweilige auf den Bezugswert bezogene Streuung zu:

$$\sigma_{ibez} = \sigma_i = \frac{\Delta x_{Fg\ i} \cdot x_{messber.\ i}}{X_{0i}} \quad (4/16b)$$

Für die einzelnen Gewichtungsfaktoren folgt damit mit Gleichung (4/16b) und (2/4):

$$g_{iM} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta x_{Fg\ i} \cdot x_{messber.\ i}}{X_{0i}} \right)^2} \quad (4/17)$$

Im Anhang A2 ist die Ermittlung der Fehlergrenze für eine gesamte Messkette, d.h. Messgeber mit Leittechnik-Erfassungskarte und eventuell Messumformer, ausführlich beschrieben, vgl. /15/. Zudem sind im Anhang A3 die Messbereiche, Bezugswerte und die daraus resultierenden Gewichtungen der in Tabelle 4/2 aufgeführten Messgrößen zusammengestellt.

Um im Validierungsalgorithmus numerische Schwierigkeiten zu vermeiden, werden die Gewichtungen zusätzlich normiert. Hierzu werden die Werte der diagonal

angeordneten Gewichtung-Elemente durch den maximalen Gewichtungswert g_{iM}^{\max} geteilt:

$$g_{iM}^{\text{norm}} = \frac{g_{iM}}{\max(\underline{\underline{G}}_M)} = \frac{g_{iM}}{g_{iM}^{\max}} \quad (4/18).$$

Somit ergibt sich für das größte Element der normierten Gewichtungsmatrix $\underline{\underline{G}}_M^{\text{norm}}$ der Wert 1,0.

Ein derartiges Vorgehen ist zulässig, da es bei der quadratischen Fehlerausgleichsfunktion nur auf die relative Gewichtung der einzelnen Messstellen untereinander ankommt.

4.3.4 Gewichtungsmatrizen der Nebenbedingungen

Die Matrix $\underline{\underline{G}}_N$ gewichtet die sieben Nebenbedingungen. Um eine nahezu exakte Erfüllung der Nebenbedingungen zu erreichen, werden die Elemente von $\underline{\underline{G}}_N$ wesentlich höher als die Elemente von $\underline{\underline{G}}_M$ gewählt, und zwar wiederum quadratisch zu:

$$g_{iN} = (10^3)^2 = 10^6 \gg 1,0 = \max(\underline{\underline{G}}_M^{\text{norm}}) \quad (4/19)$$

Eine weitere Maßnahme, um eine nahezu exakte Erfüllung der Nebenbedingungen zu gewährleisten, ist eine zusätzliche Validierung mit bereits validierten Messwerten anstelle von Original-Messwerten. Eine solcher *zweiter Validierungsdurchlauf* erweist sich im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ als notwendig.

4.3.5 Validierungs-Begrenzungen

Durch die Validierung werden die Messwerte verändert. Um eine Veränderung in einen physikalisch nicht sinnvollen Bereich zu verhindern, werden Begrenzungen der Messbereiche eingeführt.

Bei der hier erläuterten Validierung werden negativ gemessene und negativ validierte Massen- und Wärmeströme zu Null gesetzt und anschließend ihre Gewichtung für den zweiten Validierungsdurchlauf von $g_{iM}^{\text{norm}} \leq 1$ auf $g_{iM}^{\text{norm}} = 10^3$ erhöht.

4.3.6 Validierungsergebnisse

In den nachfolgenden Bildern 4/7 bis 4/10 sind für die in Tabelle 4/2 aufgeführten Messgrößen die jeweiligen Original-, dynamisch und stationär validierten Messverläufe gegenübergestellt. Der Betrachtungszeitraum beginnt am 12.09.2000 um 1:57h und erstreckt sich über 20 Minuten. Aufgrund des bereits in Abschnitt 4.1 beschriebenen Lastwechsels weist der Gesamt-Heiznetzärmestrom ein stark instationäres Verhalten auf.

Im Bild 4/7 ist der direkte Vergleich zwischen original-, dynamisch validiertem und stationär validiertem Messverlauf der Gesamtwärmestrom-Messstelle \dot{Q}_{Hn} dargestellt. Die dynamisch und stationär validierten Messverläufe erkennen den Fehler in der Energiebilanz (vgl. Bild 4/2) und vermindern den Gesamtwärmestrom \dot{Q}_{Hn} . Bei der stationären Validierung wird die Verzögerung zwischen den einzelnen Blockmessstellen und der Gesamtmessstelle im Heiznetz nicht berücksichtigt. Dieser stationär validierte Messverlauf spricht deswegen zu früh an, was zu einem schlechten Validierungsergebnis führt.

Der Original-, dynamisch- sowie stationär-validierte Messverlauf des Massenstroms ins Heiznetz ist im Bild 4/8 dargestellt. Die Validierung berechnet mithilfe der Diskrepanz in den Nebenbedingungen, insbesondere in der Massenstrombilanz, einen verminderten Massenstrom gegenüber dem Original-Messverlauf. Da die Massenstrombilanz stationär als Nebenbedingung in den Algorithmus eingeht, ist der stationär validierte Verlauf praktisch identisch mit dem dynamisch validierten.

Die Wärmestromverläufe der einzelnen Blöcke sowie der Gesamtwärmestrom ins Heiznetz sind im Bild 4/9a dargestellt. Die Blöcke 40, 41, 42 und 60 liefern keinen Beitrag zur Wärmeenergieerzeugung. Der konstant negativ gemessene Verlauf von Block 60 wird von der dynamischen und sowohl auch von der stationären Validierung berücksichtigt.

Bild 4/9b zeigt die betreffenden Massenströme. Die stationäre Validierung entspricht hier im wesentlichen der dynamischen. Um den Fehler in der Energiebilanz auszugleichen sowie um die Massenstrombilanz zu erfüllen, wird \dot{m}_{Hn} erniedrigt und \dot{m}_{Hn50} erhöht. Obwohl der Vorlauf-Massenstrom \dot{m}_{VL40} bis zur vierten Minute des dargestellten Zeitbereichs ca. 320 t/h beträgt, liefert er aufgrund identischer Vor- und Rücklauftemperaturen seitens des Blockes 40 keinen Beitrag zur Wärmeversorgung.

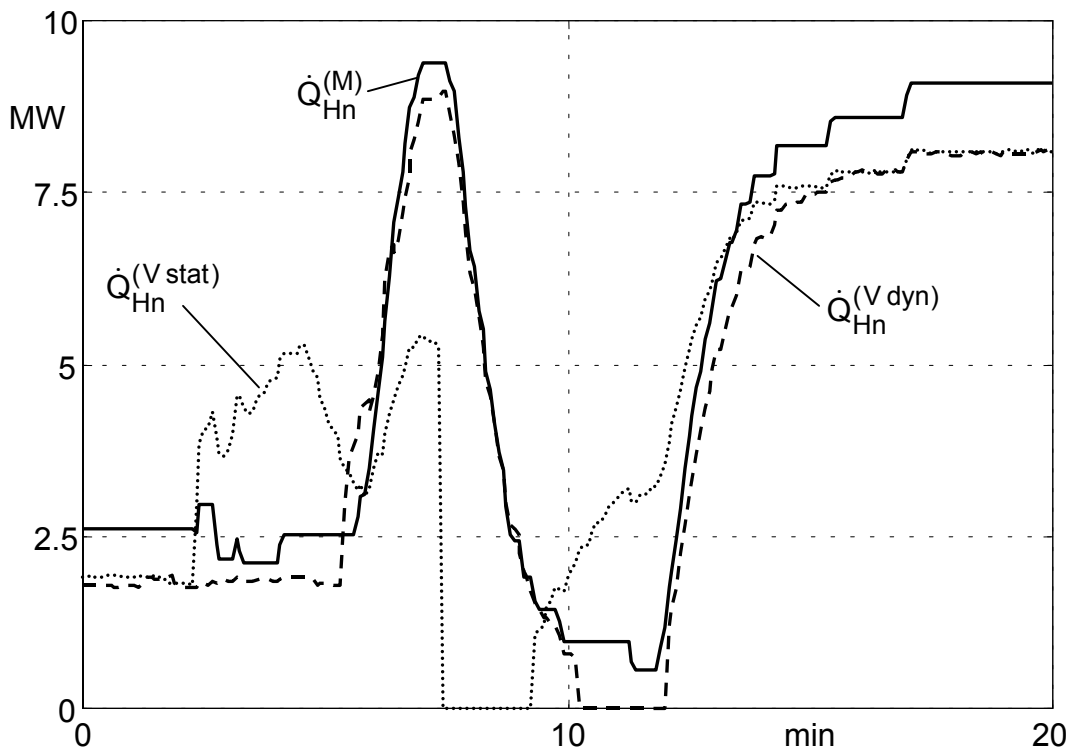


Bild 4/7: Gesamt-Heiznetzwärmestrom \dot{Q}_{Hn} ,

Original-Messverlauf, sowie stationär und dynamisch validierte Messverläufe

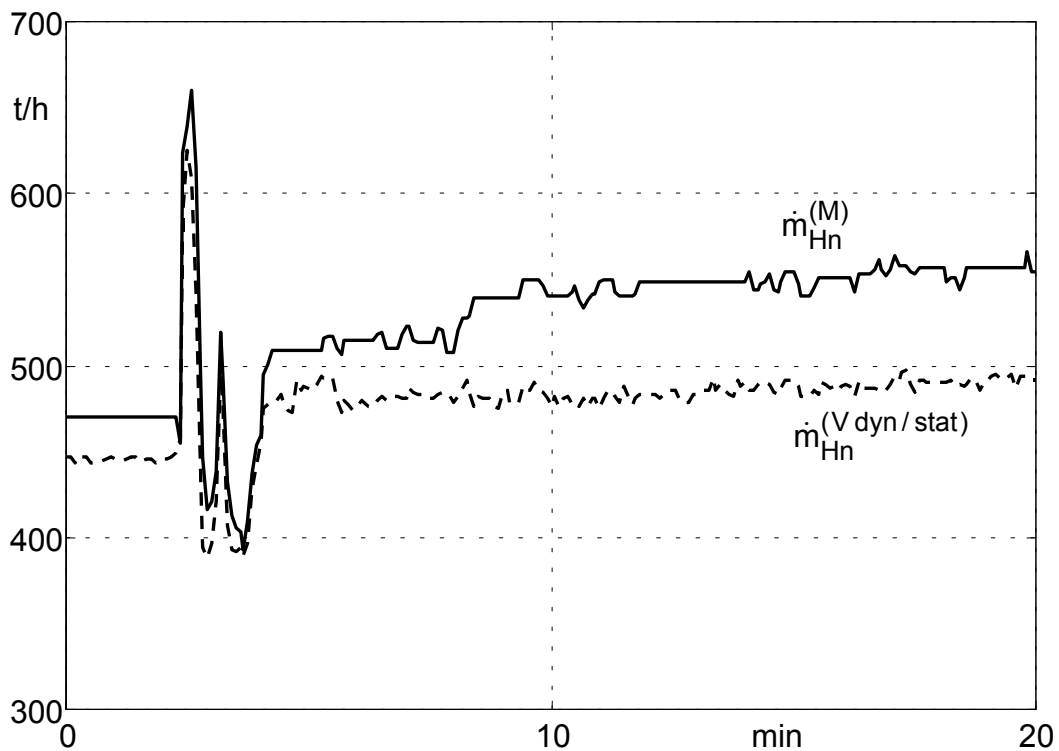
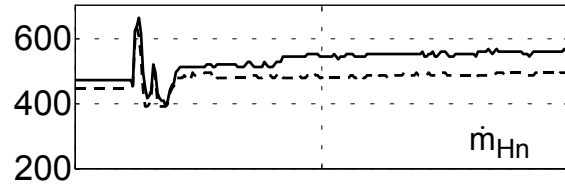
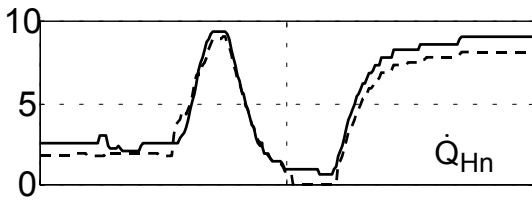


Bild 4/8: Gesamt-Heiznetzmassenstrom \dot{m}_{Hn} ,

Original-Messverlauf, sowie stationär und dynamisch validierte Messverläufe

a1) Gesamt-Wärmestrom [MW] ($\hat{=}$ Bild 4/7)

b1) Gesamt-Massenstrom [t/h] ($\hat{=}$ Bild 4/8)



a2) Teil-Wärmeströme [MW]

b2) Teil-Massenströme [t/h]

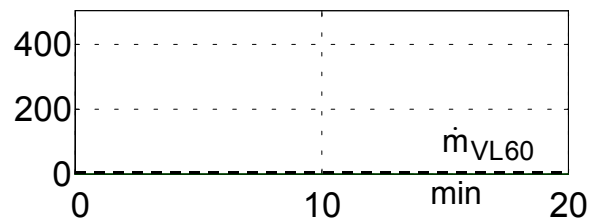
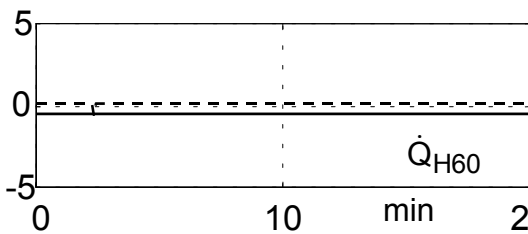
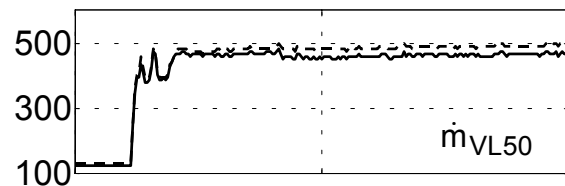
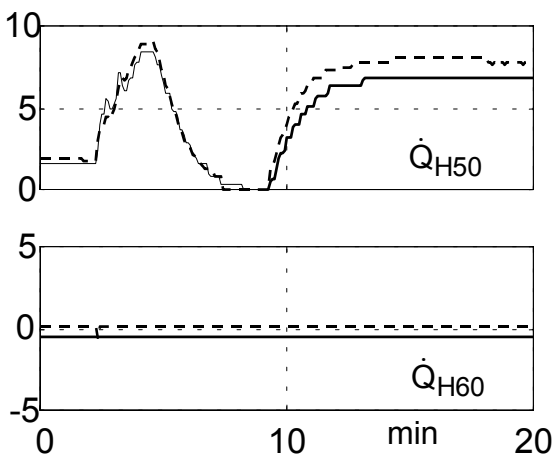
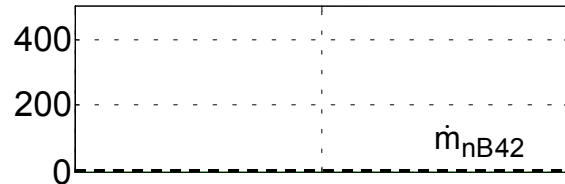
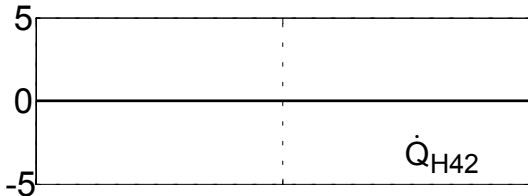
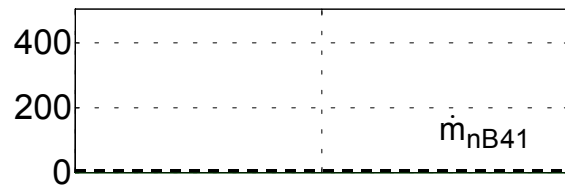
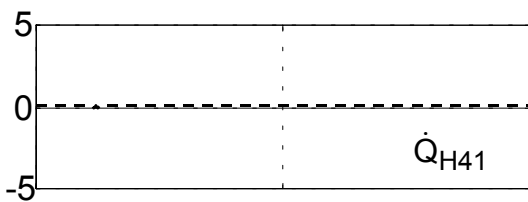
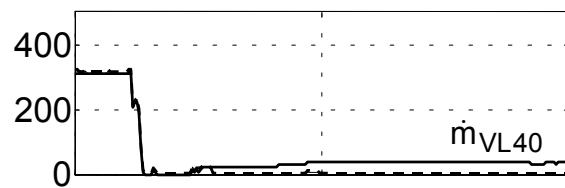
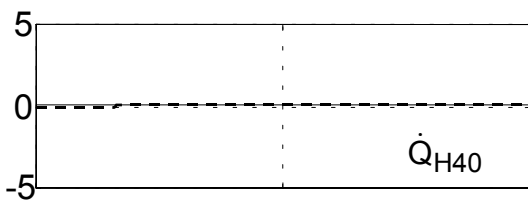
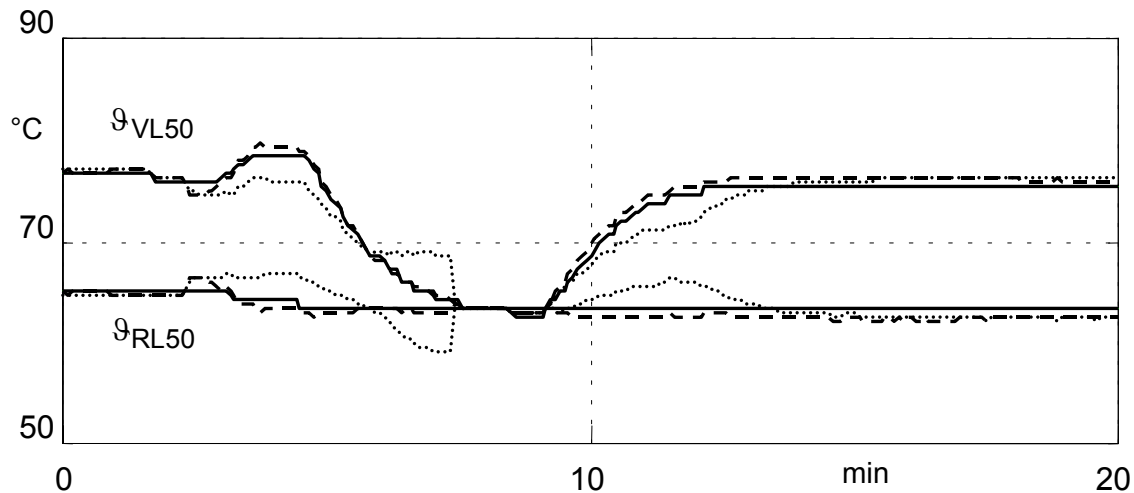


Bild 4/9: Übersicht über sämtliche Wärmeströme und Massenströme, Original- und dynamisch validierte Messverläufe

Im Bild 4/10 sind die Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturverläufe des in Betrieb befindlichen Block 50 dargestellt.

Die Original-Temperaturmessverläufe und die dynamisch validierten unterscheiden sich nur unwesentlich. Hingegen weisen die stationär validierten Temperaturmessverläufe ein schlechtes Validierungsergebnis auf, da bei diesen die Prozessdynamik nicht mit berücksichtigt wird.



**Bild 4/10: Vorlauf- und Rücklauf-Temperatur Block 50,
Original-Messverläufe, stationär und dynamisch validierte Messverläufe**

Wie in Bild 4/11 zu erkennen, ist mit den dynamisch validierten Messverläufen (V) die Konsistenz der Energiebilanz gewährleistet, wenn beim Vergleich des Gesamt-Wärmestroms $\dot{Q}_{Hn}^{(V)}$ mit der Summe der Teil-Wärmeströme $\sum \dot{Q}_{Hi}^{(V)}$ die Laufzeit T_{Lauf} berücksichtigt wird. Zusätzlich sind auch die Original-Messverläufe (M) mit abgebildet.

In Bild 4/12 ist der validierte Messverlauf des Gesamt-Massenstroms $\dot{m}_{Hn}^{(V)}$ und der Summe der Teil-Massenströme $\sum \dot{m}_{VLi}^{(V)}$ identisch, d.h. mit den validierten Messverläufen ist die Konsistenz der Massenstrombilanz gewährleistet.

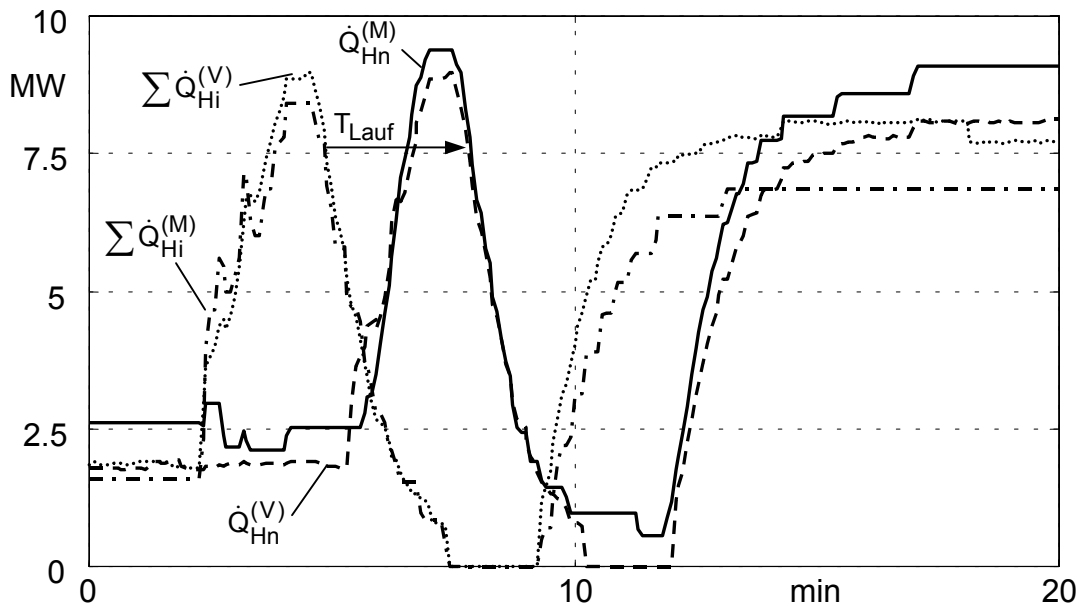


Bild 4/11: Überprüfung der Energiebilanz

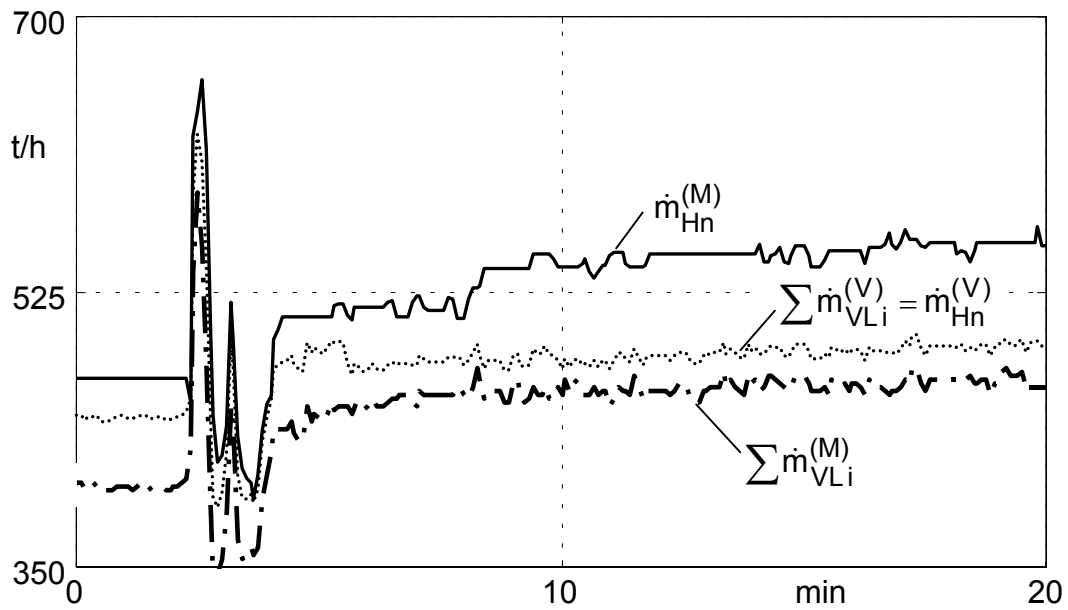


Bild 4/12: Überprüfung der Massenstrombilanz

4.4 Untersuchungen zur Offset-Unterdrückung

Wie anhand der Bilder 4/11 und 4/12 klar zu erkennen, weisen die betrachteten Original-Messverläufe Offset-Abweichungen auf. Beispiel hierfür ist im betrachteten Fall die stets positive Abweichung zwischen der Gesamtwärmestrom-Messstelle $\dot{Q}_{Hn}^{(M)}$ und der Summe der Blockmessstellen $\sum \dot{Q}_{Hi}^{(M)}$, vgl. Bild 4/11. Entsprechendes gilt für die Massenströme, vgl. Bild 4/12. Diese Offsets entstehen durch Unvollkommenheiten der Messeinrichtungen und/oder durch überlagerte prozessseitige Störeinflüsse.

Um zu klären, ob es sich um einen systematischen Offset-Fehler handelt, sind im Vorfeld der Validierung umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Hierzu wurden zunächst die impliziten Bilanzgleichungen über der Zeit gemittelt:

- Offsetberechnung in der Wärmestrombilanz:

$$\Delta_{\dot{Q}} \text{ Offs.} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\dot{Q}_{Hn}^{(M)}(t_{j-T_{\text{Lauf}}}) - \sum_i \dot{Q}_{Hi}^{(M)}(t_j) \right) = \bar{\dot{Q}}_{Hn}^{(M)} - \sum_i \bar{\dot{Q}}_{Hi}^{(M)} \quad (4/20)$$

- Offsetberechnung in der Massenstrombilanz:

$$\Delta_{\dot{m}} \text{ Offs.} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\dot{m}_{Hn}^{(M)}(t_j) - \sum_i \dot{m}_{Hi}^{(M)}(t_j) \right) = \bar{\dot{m}}_{Hn}^{(M)} - \sum_i \bar{\dot{m}}_{Hi}^{(M)} \quad (4/21)$$

Dabei wird in Gleichung (4/20) die Laufzeit zwischen den Wärmestrommessstellen mit berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle 4/3 sind die ermittelten Offsets für acht verschiedene Betriebsfälle bei unterschiedlichen Wärmeleistungen und Blockeinsätzen einander gegenübergestellt.

Datensatz	[MW]		[t/h]		[°C]		Betriebsart (Block in Betrieb):
	$\bar{Q}_{Hn}^{(M)}$	$\bar{Q}_{Hn}^{(M)} - \sum \bar{Q}_{Hi}^{(M)}$	$\bar{m}_{Hn}^{(M)}$	$\bar{m}_{Hn}^{(M)} - \sum \bar{m}_{VLi}^{(M)}$	$\bar{g}_{VL}^{(M)}$	$\bar{g}_{VL}^{(M)} - \bar{g}_{RL}^{(M)}$	
19.12.2001 06:30 - 07:30 h	37,0	1,6 (4,2%)	968	21,7 (2,2%)	96	33	50
03.01.2002 11:30 - 12:30 h	35,7	3,8 (10,5%)	1067	10,6 (1,0%)	93	28	
08.03.2002 06:00 - 07:00 h	32,7	3 (9,2%)	1010	21,6 (2,1%)	86	28	
31.01.2002 19:30 - 20:30 h	26,0	0,8 (3,1%)	664	-38,2 (-5,8%)	110	33	
19.12.2001 01:30 - 02:30 h	26,0	3,7 (14,2%)	716	39,3 (5,5%)	94	32	60
25.11.2001 16:45 - 17:45 h	15,2	1,4 (9,2%)	705	23,2 (3,3%)	87	18,7	
17.07.2001 07:30 - 08:30 h	10,8	1,25 (11,6%)	572	65,3 (11,4%)	74	16	40, 41, 42
01.07.2000 10:00 - 11:00 h	5,7	0,35 (6,1%)	261	5,7 (2,2%)	83	20	

Tabelle 4/3: Offsetuntersuchungen

Wie anhand der Auflistung zu ersehen, ist kein systematischer Zusammenhang zwischen den quantitativen Offsetberechnungen der Wärmelast bzw. des Massenstroms zu erkennen, und zwar weder insgesamt noch innerhalb der jeweiligen Betriebsarten. Auch aus den Temperaturdifferenzen zwischen Heiznetz-Vorlauf und -Rücklauf ist keine Systematik bezüglich eines möglichen Offsets bei den Wärmestrombilanzen vorhanden.

Daher war es leider nicht möglich, die Ungenauigkeiten der Messstellen mithilfe eines last-, massenstrom- oder temperaturabhängigen Offsets zu erfassen und so zumindest teilweise zu eliminieren¹⁾. Diese nicht erfolgreichen Untersuchungen zur Offset-Elimination bestätigen ihrerseits die Notwendigkeit der Messdatenvalidierung.

¹⁾ An der Erkennung einer Offset-Systematik hatte auch die HKW-Betriebsleitung starkes Interesse gezeigt, zwecks Durchführung gezielter hardwareseitiger Nachbesserungen.

4.5 Erkenntnisse

Die Berücksichtigung der Laufzeit zwischen den Wärmestrom-Blockmessstellen und der Gesamtwärmestrom-Messstelle ist für die Validierung bei transienten Prozessverläufen zwingend notwendig. Dies zeigt der Vergleich zwischen rein stationär und dynamisch validiertem Messverlauf recht deutlich, s. z.B. Bild 4/7.

Die dynamisch validierten Messverläufe führen zu einem zufriedenstellenden Bilanzierungs-Ergebnis, s. Bild 4/11 und 4/12.

Ein systematischer Offset-Fehler war nicht erkennbar und konnte somit im Vorfeld der durchgeführten Validierung nicht eliminiert werden.

5 Validierung des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“

In diesem Kapitel wird der Bereich „Turbine/Heizkondensatoren“ am Beispiel des Blockes 50 mithilfe von Modellgleichungen nachgebildet und validiert. Dabei erfolgt zudem eine Kopplung mit den zuvor verwendeten Modellgleichungen des Bereiches „HKW-Ausgang/Heiznetz“.

Zur modelltechnischen Nachbildung der Gegendruckturbine wird diese, wie in Bild 5/1 veranschaulicht, in zwei Teilbereiche unterteilt. Da die betrachtete Anlage nur mit einem Maximaldruck von ca. 74 bar betrieben werden kann, entspricht der Teilbereich 1 dem Mitteldruckteil und der Teilbereich 2 dem Niederdruckteil einer herkömmlichen Turbine.

Im Normalbetrieb wird über die beiden Entnahmen – nachfolgend mit Anzapf- und Gegendruckentnahme bezeichnet – der entnommene Dampf mithilfe der Heizkondensatoren A und B auf Sattdampf-Temperatur kondensiert. Die Ventile zwischen den Entnahmen und den Heizkondensatoren sind im Normalbetrieb ganz geöffnet. Die Anlage kann auch im reinem Heizbetrieb gefahren werden. Dabei werden die Heizkondensatoren über die Reduzierstation mit Dampf versorgt. Diese Betriebsweise sollte aus energetischen Gründen nur bei eventuellen Wärmeengpässen im Winter eingesetzt werden.

Zusätzlich steht parallel zum Heizkondensator A noch ein Hilfskondensator zur Verfügung. Dieser wird jedoch aufgrund des schlechten Wirkungsgrades bei Kondensationsbetrieb nur in Ausnahmefällen eingesetzt und deshalb im Folgenden nicht berücksichtigt.

Das Fernheizwasser durchströmt aus energetischen Gründen zuerst den vom Temperaturniveau niedrigeren Heizkondensator A. Im Heizkondensator B wird es auf eine Temperatur von ca. 120°C weiter erwärmt und dem Heiznetzvorlauf und/oder dem Wärmeverdrängungsspeicher zugeführt.

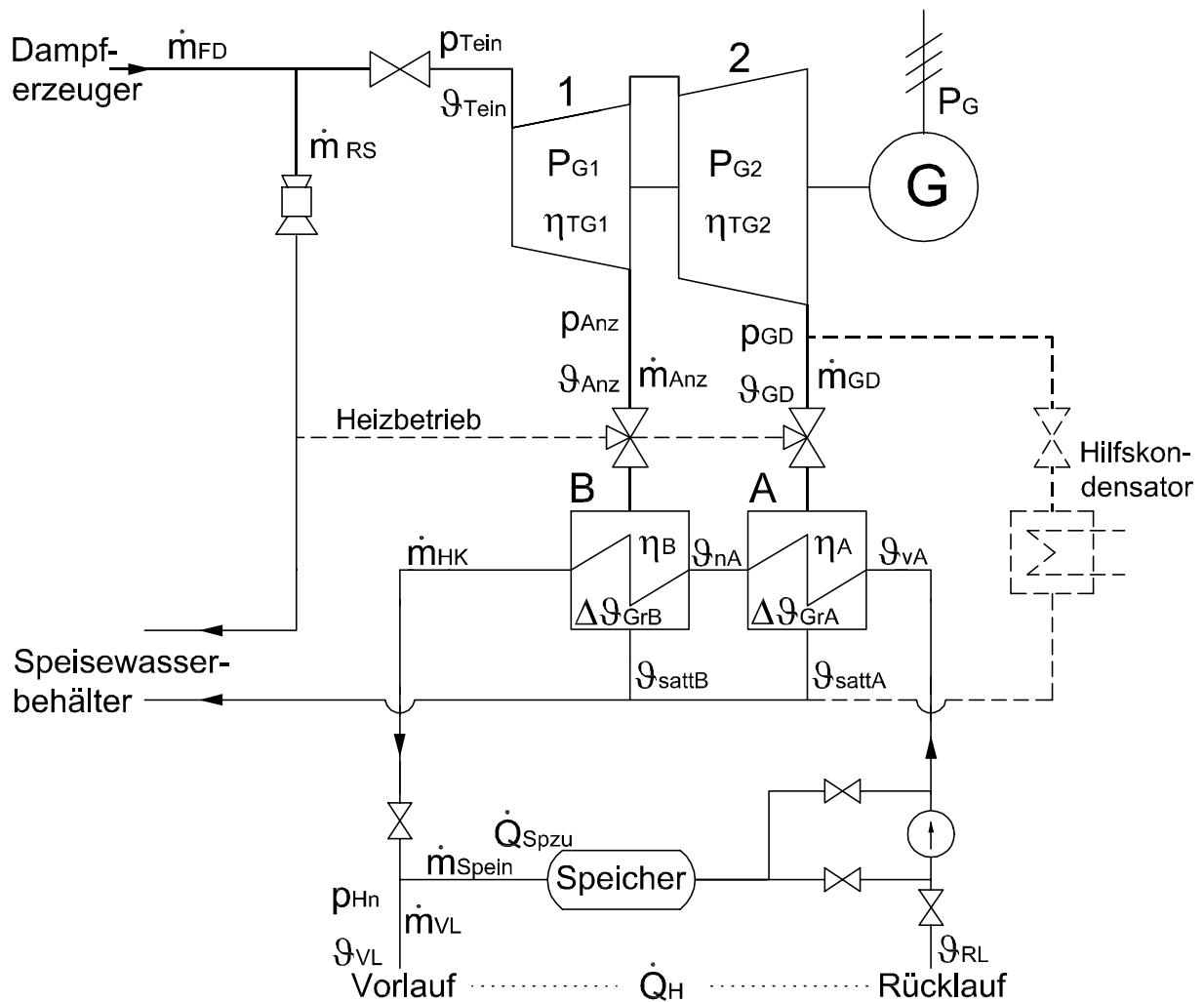


Bild 5/1: Anlagenschaltbild des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“, Bl. 50

5.1 Modellbildung des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“

Die Turbine und der Generator reagieren auf Laständerungen im Sekundenbereich. Da die Messwerte im 5s-Takt aufgezeichnet werden, ist es für die Validierung nicht notwendig die Modellgleichungen dynamisch zu formulieren.

Bei der Wärmeübertragung in den Heizkondensatoren werden ebenfalls rein stationäre Vorgänge angenommen, da in diesem Bereich eine dynamische Modellbildung mit mehreren unbekanntem Parametern verbunden wäre und somit die für die Validierung erforderliche Redundanz aufgehoben wird.

Modellgleichungen für den wasserseitigen Teilbereich der Heizkondensatoren:

Der Massenstrom des Heizwassers durch die Heizkondensatoren A und B kann aus Messgrößen berechnet werden, vgl. Bild 5/1:

$$\dot{m}_{HK} = \dot{m}_{VL} + \dot{m}_{Sp\,ein} \quad (5/1).$$

Die dem Heizwasser zugeführten Wärmeströme berechnen sich aus dem Massenstrom \dot{m}_{HK} und der jeweiligen Enthalpiedifferenz zu:

$$\dot{Q}_{Heiz\,A} = \dot{m}_{HK} \cdot (h_{nHK\,A} - h_{RL}) \quad (5/2)$$

$$\dot{Q}_{Heiz\,B} = \dot{m}_{HK} \cdot (h_{VL} - h_{nHK\,A}) \quad (5/3).$$

Die oben verwendeten Enthalpien werden mithilfe der Wasserdampf tabel aus dem Druck im Heiznetz und den dazugehörigen Temperaturen ermittelt:

$$h_{nHK\,A} = f(p_{Hn}, \vartheta_{nHK\,A}) \quad (5/4)$$

$$h_{RL} = f(p_{Hn}, \vartheta_{RL}) \quad (5/5)$$

$$h_{VL} = f(p_{Hn}, \vartheta_{VL}) \quad (5/6).$$

Für den Wärmestrom, der dem Verdrängungs-Speicher zugeführt wird, kann die Beziehung

$$\dot{Q}_{Sp\,zu} = \dot{m}_{Sp\,ein} \cdot (h_{VL} - h_{RL}) \quad (5/7)$$

aufgestellt werden.

Modellgleichungen für den dampfseitigen Teilbereich von Turbine und Heizkondensatoren:

Die Wärmeströme, die von den Entnahmen abgegeben werden, berechnen sich mithilfe der oben ermittelten Wärmeströme auf der Heißwasser-Seite und den Wirkungsgraden der Heizkondensatoren zu:

$$\dot{Q}_{HK\,A} = \frac{\dot{Q}_{Heiz\,A}}{\eta_A} \quad (5/8)$$

$$\dot{Q}_{HK\,B} = \frac{\dot{Q}_{Heiz\,B}}{\eta_B} \quad (5/9).$$

Die Massenströme der Entnahmen lassen sich damit berechnen zu:

$$\dot{m}_{GD} = \frac{\dot{Q}_{HK\,A}}{h_{GD} - h_{satt\,A}} \quad (5/10)$$

$$\dot{m}_{\text{Anz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{HKB}}}{h_{\text{Anz}} - h_{\text{sattB}}} \quad (5/11).$$

Dabei werden die benötigten Enthalpien wie folgt ermittelt:

$$h_{\text{GD}} = f(p_{\text{GD}}, \vartheta_{\text{GD}}) \quad (5/12) \quad h_{\text{Anz}} = f(p_{\text{Anz}}, \vartheta_{\text{Anz}}) \quad (5/13)$$

$$h_{\text{sattA}} = f(\vartheta_{\text{nHKA}} + \Delta\vartheta_{\text{GrA}}) \quad (5/14) \quad h_{\text{sattB}} = f(\vartheta_{\text{VL}} + \Delta\vartheta_{\text{GrB}}) \quad (5/15).$$

Mithilfe der Wirkungsgrade η_{TG1} und η_{TG2} können die elektrischen Teilleistungen

$$P_{\text{G1}} = \eta_{\text{TG1}} \cdot (\dot{m}_{\text{Anz}} + \dot{m}_{\text{GD}}) \cdot (h_{\text{T ein}} - h_{\text{Anz}}) \quad (5/16)$$

und $P_{\text{G2}} = \eta_{\text{TG2}} \cdot \dot{m}_{\text{GD}} \cdot (h_{\text{Anz}} - h_{\text{GD}}) \quad (5/17)$

berechnet werden.

5.2 Validierung

Die Gleichungen 5/1-17 sind im Blockschaltbild 5/2 grafisch dargestellt. Durch die zusätzliche Berechnung bekannter Messgrößen stehen folgende redundante Beziehungen dem Validierungsalgorithmus zur Verfügung:

$$\dot{m}_{\text{FD}} = \dot{m}_{\text{GD}} + \dot{m}_{\text{Anz}} + \dot{m}_{\text{RS}} \quad (5/18)$$

$$\dot{Q}_{\text{H}} = \dot{Q}_{\text{HeizA}} + \dot{Q}_{\text{HeizB}} - \dot{Q}_{\text{Sp zu}} \quad (5/19)$$

$$P_{\text{G}} = P_{\text{G1}} + P_{\text{G2}} \quad (5/20).$$

Es ist aber zu berücksichtigen, dass die im Bild 5/2 enthaltenen Parameter (P) und die mit (X) markierten Prozessgrößen unbekannt sind. Sie sollen mithilfe der Validierung ermittelt werden. Der Validierungsalgorithmus behandelt sie formal wie zu validierende Messgrößen, weshalb für diese vorab Schätzwerte vorgegeben werden müssen. Diese Schätzwerte \hat{P} und \hat{X} wurden wie folgt gewählt:

$$\text{Wirkungsgrade der Heizkondensatoren:} \quad \hat{\eta}_{\text{A/B}} = 97 \% \quad \left. \vphantom{\hat{\eta}_{\text{A/B}} = 97 \%} \right\} \hat{P} \quad (5/21)$$

$$\text{Teil-Wirkungsgrade Turbine/Generator, s. /16-17/:} \quad \hat{\eta}_{\text{TG1/2}} = 88 \% \quad \left. \vphantom{\hat{\eta}_{\text{TG1/2}} = 88 \%} \right\} \hat{P} \quad (5/22)$$

$$\text{Reduziermassenstrom:} \quad \hat{m}_{\text{RS}} = 2 \text{ t/h} \quad \left. \vphantom{\hat{m}_{\text{RS}} = 2 \text{ t/h}} \right\} \hat{X} \quad (5/23)$$

$$\text{Grädigkeiten der Heizkondensatoren:} \quad \Delta\hat{\vartheta}_{\text{GrA/B}} = 25 \text{ K} \quad \left. \vphantom{\Delta\hat{\vartheta}_{\text{GrA/B}} = 25 \text{ K}} \right\} \hat{X} \quad (5/24).$$

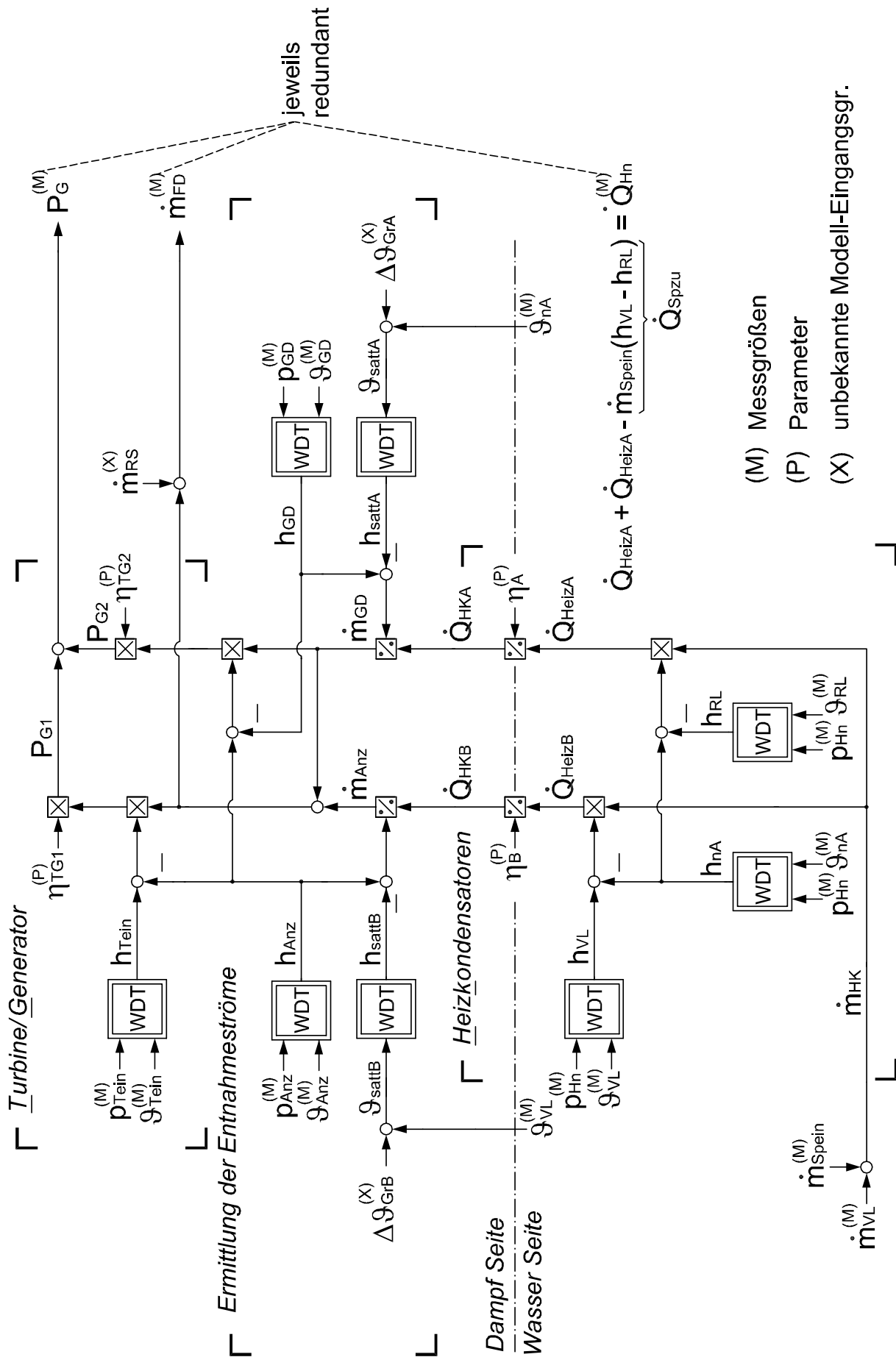


Bild 5/2: Blockschaltbild des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“, Block 50

Da in dem Bereich „Turbine/Heizkondensatoren“ relativ wenig Messstellen vorhanden sind und für die Parameter lediglich Schätzwerte vorgegeben werden können, werden im Folgenden die bereits in Kapitel 4 verwendeten Nebenbedingungen des Schnittstellenbereichs „HKW-Ausgang/Heiznetz“ der Validierung des Bereiches „Turbine/Heizkondensatoren“ hinzugefügt. Es wird somit mittels der derart erweiterten Validierung eine *stabilere* Berechnung auch jener Größen erreicht, die messtechnisch nicht erfasst werden können. Das Schema der Validierung ist im Bild 5/3 dargestellt.

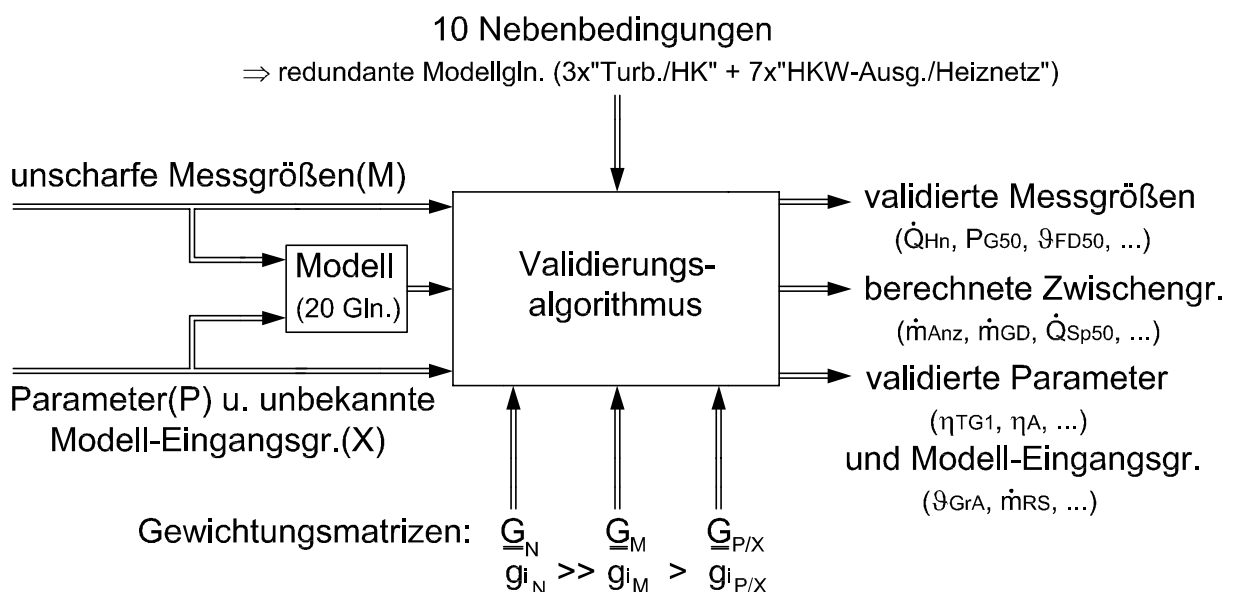


Bild 5/3: Validierungsschema

Damit die Nebenbedingen nahezu exakt erfüllt werden, werden deren Gewichtungen mit $g_{iN} = (10^3) = 10^6$ wesentlich größer gewählt als die genormten Gewichtungen g_{iM}^{norm} für die Messabweichungen, vgl. Kap. 4.3.4. Die Elemente der Gewichtungsmatrix $\underline{G}_{P/X}$ für die Parameter \underline{P} und für die unbekannt Modelleingangsgrößen \underline{X} werden um den Faktor 10^{-3} kleiner als die durchschnittliche Gewichtung der Messgrößen gewählt. Dadurch können diese Größen nach der Validierung relativ große Abweichungen zu ihren zu Anfang gewählten Werten aufweisen.

Das Mengengerüst der für die Validierung relevanten Größen ist in Tabelle 5/1 zusammengestellt.

Prozess-Bereich:		Turbine/Heizkond.	Koppelgrößen	HKW-Ausg./Heizn.	Gesamt
Messgrößen (M)	Leistungen	1	1	5	7
	Massenströme	2	1	5	8
	Temperaturen	5	2	8	15
	Drücke	3	1	—	4
Parameter (P)	Wirkungsgrade	4	—	—	4
unbekannte Eingangsgr. (X)	Grädigkeiten	2	—	—	2
	Massenstrom	1	—	—	1
Zwischengrößen	(Teil-) Leistungen	6	—	—	6
	Massenströme	3	—	—	3
Gesamt		27	5	18	50

Tabelle 5/1: Mengengerüst relevanter Größen

Insgesamt werden 50 Größen mithilfe des Validierungsalgorithmus nach Elimination der Prozessträgheit berechnet/validiert.

Im Bild 5/4 sind für einige Messstellen die Original-Messverläufe zusammen mit den jeweiligen validierten Verläufen veranschaulicht. Der dargestellte Zeitbereich ist von 7:20-7:30h am Mittwoch den 12.04.2002. Es ist ausschließlich Block 50 in Betrieb und keine Aus/Ein-Speicherung von Wärme bezüglich den Verdrängungsspeichern vorhanden.

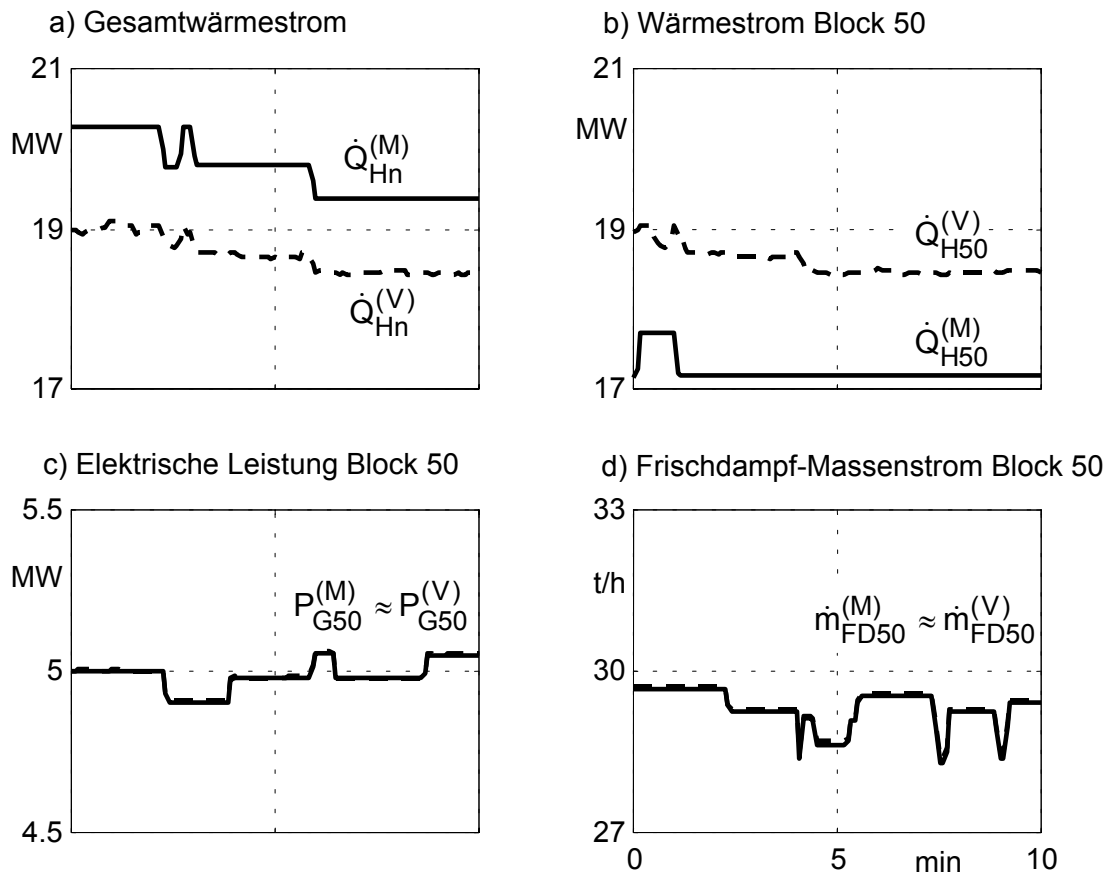


Bild 5/4: Original- und validierte Messverläufe

Wie anhand von Bild 5/4 a und b zu ersehen, ist der Gesamt-Wärmestrom wie schon in Kapitel 4 quantitativ höher als der Messverlauf der Blockmessstelle. Die Validierung gleicht diese Inkonsistenz unter Berücksichtigung der Laufzeit aus. Bei der elektrischen Leistung und beim Frischdampfmassenstrom von Block 50 unterscheiden sich die Original-Messverläufe kaum von den validierten Verläufen, vgl. Bild 5/4 c und d.

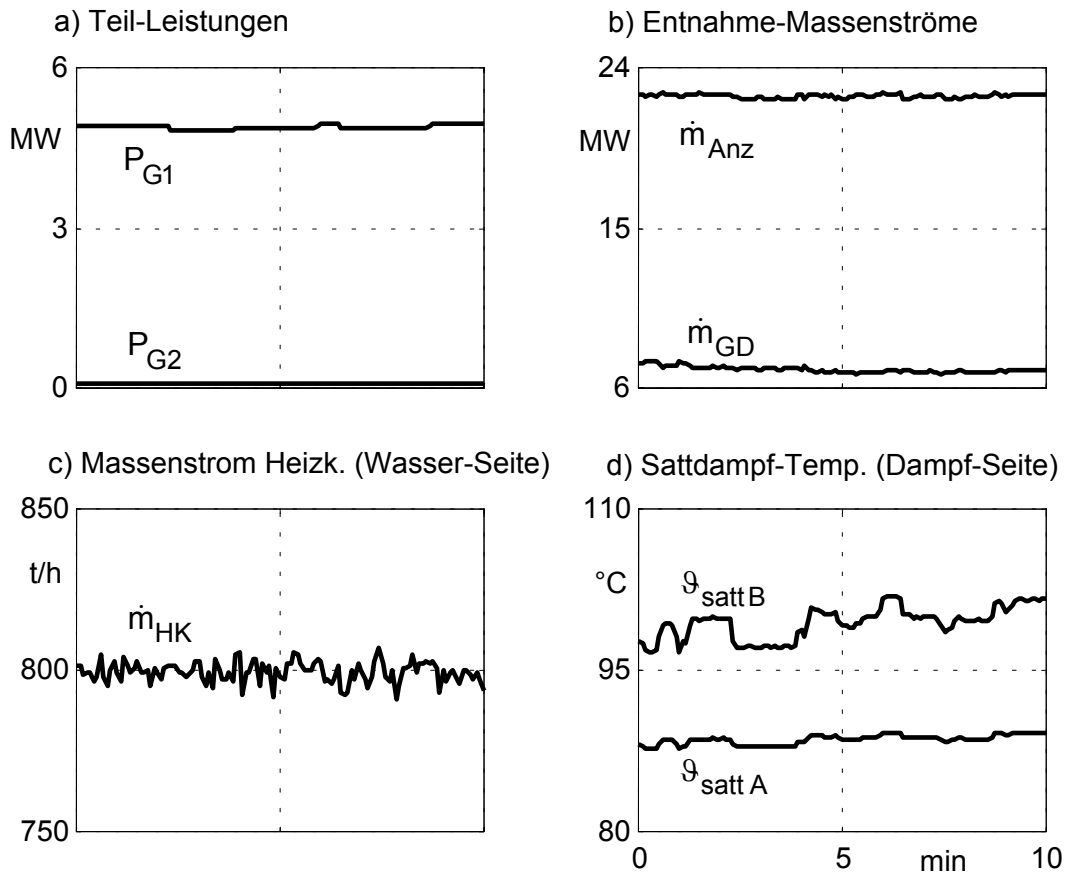


Bild 5/5: Berechnete Prozessgrößen, Block 50

Bild 5/5 enthält berechnete Prozessgrößen, die messtechnisch nicht erfasst werden. Dazu gehören die Teilleistungen der Turbine, s. Teilbild a, die Entnahme-Massenströme, s. Teilbild b, der Heizwasser-Massenstrom durch die Heizkondensatoren, s. Teilbild c, sowie die Sattdampftemperaturen, s. Teilbild d.

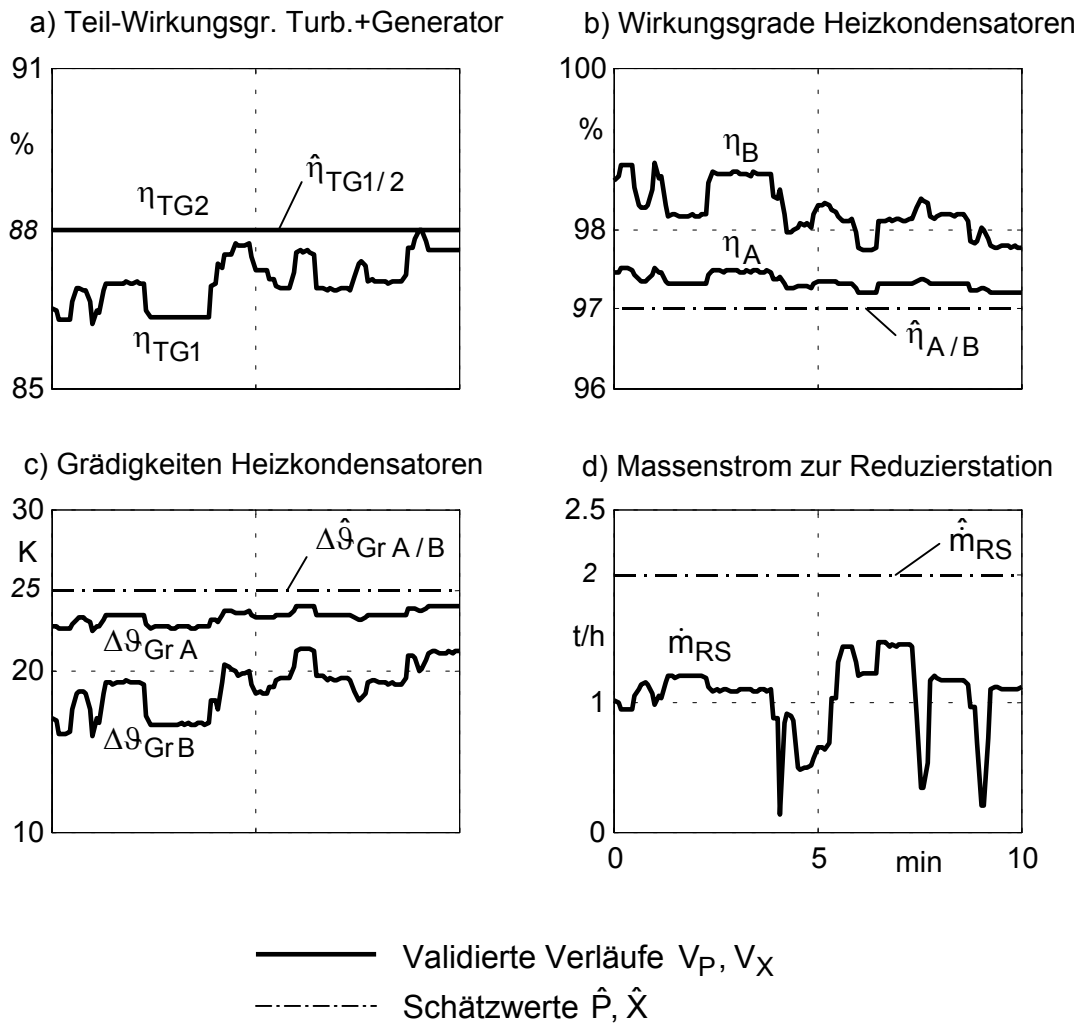


Bild 5/6: Validierte Parameter und Modell-Eingangsgößen, Block 50

Die durch den Algorithmus zusätzlich validierten Parameter \underline{P} und Modelleingangsgößen \underline{X} sind im Bild 5/6 dargestellt. Durch ihre relativ schwache Gewichtung gegenüber den Messgrößen können in ihren berechneten Verläufen größere Abweichungen gegenüber den vor der Validierung festgelegten Schätzwerten \hat{P} und \hat{X} auftreten, vgl. Gl.(5/21-24).

Der Wirkungsgrad an der zweiten Turbinen-Stufe wird aufgrund des dortigen geringen Leistungsanteils vom Validierungs-Algorithmus kaum verändert, s. Bild 5/6 a. Er verbleibt bei $\eta_{TG2} = 88\%$. Dagegen wird der Wirkungsgrad der leistungsstarken ersten Turbinenstufe vom Validierungsalgorithmus auf einen Mittelwert von $\bar{\eta}_{TG2} \approx 87\%$ zurückgenommen. In Teilbild 5/6 b sind die Wirkungsgrade der Heizkondensatoren und in Teilbild 5/6 c die zugehörigen

Grädigkeiten veranschaulicht. Der in Teilbild 5/6 d dargestellte Reduzier-Massenstrom stellt sich auf einen mittleren Wert von ca. $\bar{m}_{RS} \approx 1 \text{ t/h}$ ein.

5.3 Gewonnene Erkenntnisse

Durch die Zusammenschaltung des zuvor behandelten Bereiches „HKW-Ausgang/Heiznetz“ aus Kapitel 4 mit den in diesem Abschnitt behandelten Bereich „Turbine/Heizkondensatoren“ können alle relevanten Messgrößen validiert werden.

Des weiteren ermöglicht die durchgeführte Validierung die Identifizierung von Parametern sowie auch die Berechnung unbekannter Größen, vgl. /18/. Im Hinblick auf eine fortlaufende Beobachtung des Prozesses kommt dabei der Berechnung der Entnahme-Massenströme und der Identifizierung der Wirkungsgrade Turbine/Generator besondere Bedeutung zu, s. Bild 5/5 b und 5/6 a.

6 Dynamische Validierung im Bereich „Dampferzeuger“

Dampferzeugungsprozesse weisen generell ein stark verzögertes Ein-/Ausgangsverhalten auf. Deshalb ist bei der Online-Validierung ein dynamisches Prozessmodell zugrunde zulegen. Das diesbezügliche Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel des Dampferzeugers von Block 50 beschrieben.

6.1 Beschreibung des Dampferzeugers

Der Dampferzeuger des Blocks 50 ist ein Trommeldampferzeuger mit Naturumlauf, vgl. /19-20/. Das Speisewasser wird beim Durchströmen des Economisers vorerhitzt und hat bereits beim Eintritt in die Trommel nahezu die Verdampfungstemperatur von 290°C erreicht. In der Trommel fließt das Wasser aufgrund der wirksamen Schwerkraft in die Fallrohre und strömt in den beheizten Steigrohren, die die Wände des Feuerraums bilden, als Wasser/Dampf-Gemisch wieder in die Trommel zurück. In ihr befindet sich gesättigtes Wasser und Sattdampf. Durch die Schwerkraft werden Wasser und Dampf in der Trommel getrennt. Der Dampf tritt in den Überhitzer ein und würde dort - ungeregelt - auf ein Temperaturniveau oberhalb der Soll-Temperatur erhitzt. Die genaue Einstellung der Soll-Austrittstemperatur erfolgt per Regelung durch Einspritzen eines geringen Anteils des Speisewassers an den Eingängen der Überhitzerstufen zwei und drei. Die Feuerung des Dampferzeugers kann wahlweise mit leichtem Heizöl oder mit Gas betrieben werden.

Im Bild 6/1 ist das Anlagenschaltbild des Dampferzeugers dargestellt.

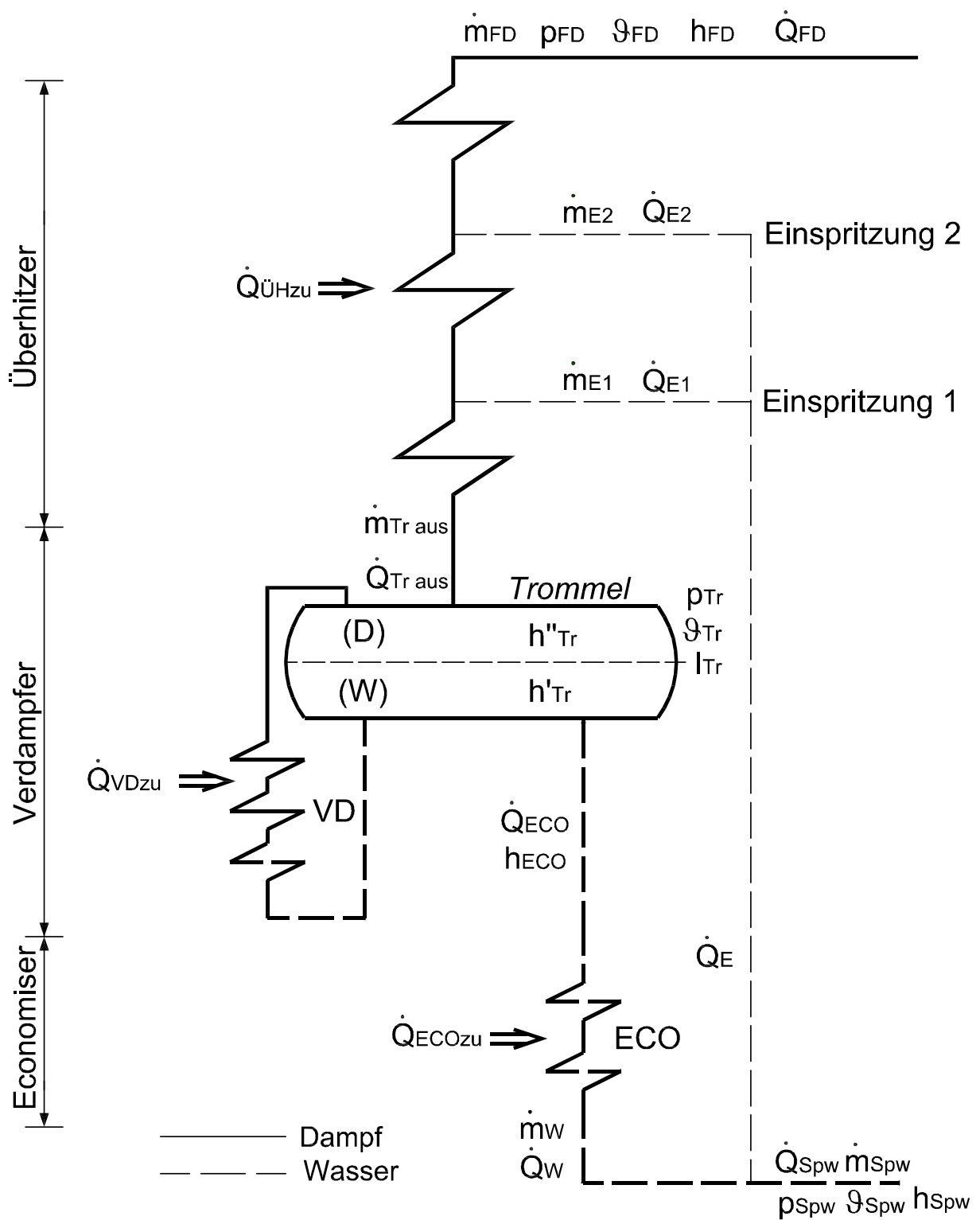


Bild 6/1: Anlagenschaltbild des Dampferzeugers, Block 50

6.2 Nichtlineare Modellbildung

Im Bild 6/2 ist der Energiefluss innerhalb des Dampferzeugers dargestellt, und zwar ohne die wirksamen Energiespeicher. Das in die Trommel eintretende Wasser besitzt den Wärmestrom \dot{Q}_W . Dieser berechnet sich aus dem Speisewasser-Wärmestrom \dot{Q}_{Spw} abzüglich des abgezweigten Einspritzwasser-Wärmestroms \dot{Q}_E . Der entbundene Brennstoff-Wärmestrom \dot{Q}_B teilt sich unter Berücksichtigung des Dampferzeuger-Wirkungsgrad η_{DE} entsprechend der Parameter k_{ECO} , k_{VD} und $k_{ÜH}$ in die Bereiche Economiser, Verdampfer und Überhitzer auf. Die Summe der in die Trommel zugeführten Wärmeströme \dot{Q}_{VDzu} , \dot{Q}_{ECOzu} und \dot{Q}_W sind bei stationärer Betrachtung gleich dem Trommelausgangs-Wärmestrom \dot{Q}_{Traus} .

Der Frischdampf-Wärmestrom \dot{Q}_{FD} ist die Summe aus Trommelausgang-Wärmestrom \dot{Q}_{Traus} und Überhitzer-Wärmestrom $\dot{Q}_{ÜH}$ zuzüglich der Einspritzwasser-Wärmeströme \dot{Q}_{E1} und \dot{Q}_{E2} .

Aufbauend auf dem oben beschriebenen Energieflussdiagramm folgt in Bild 6/3 das summarisch aus drei Energiespeichern bestehende Dynamikmodell des Dampferzeugers.

Um eine ausreichende Genauigkeit für die dynamischen Validierung zwischen Messung und Rechnung zu gewährleisten, wird der Frischdampfmassenstrom \dot{m}_{FD} nicht berechnet, sondern bezüglich der Validierung als Eingangsgröße verwendet. Desweiteren sind die Regelkreise des Dampferzeugers /21/, d.h. die Trommeldruck-Regelung mithilfe des Brennstoff-Massenstromes und die Trommellevel-Regelung mittels des Speisewasser-Massenstromes, nicht abgebildet, da im Hinblick auf eine Validierung nur das Input/Output-Verhalten des Prozesses von Bedeutung ist.

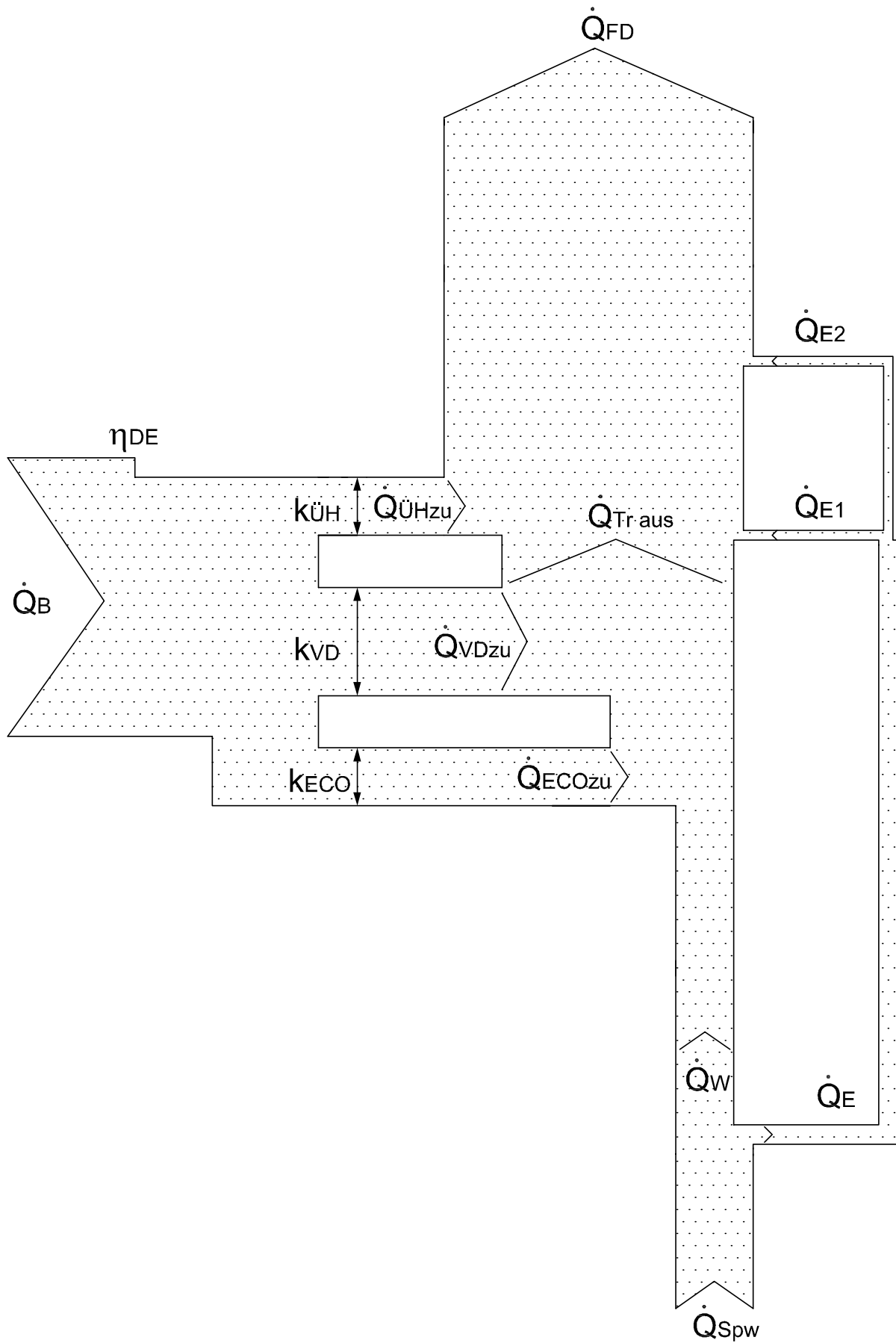


Bild 6/2: Energieflussdiagramm der Wärmeströme innerhalb des Dampferzeugers

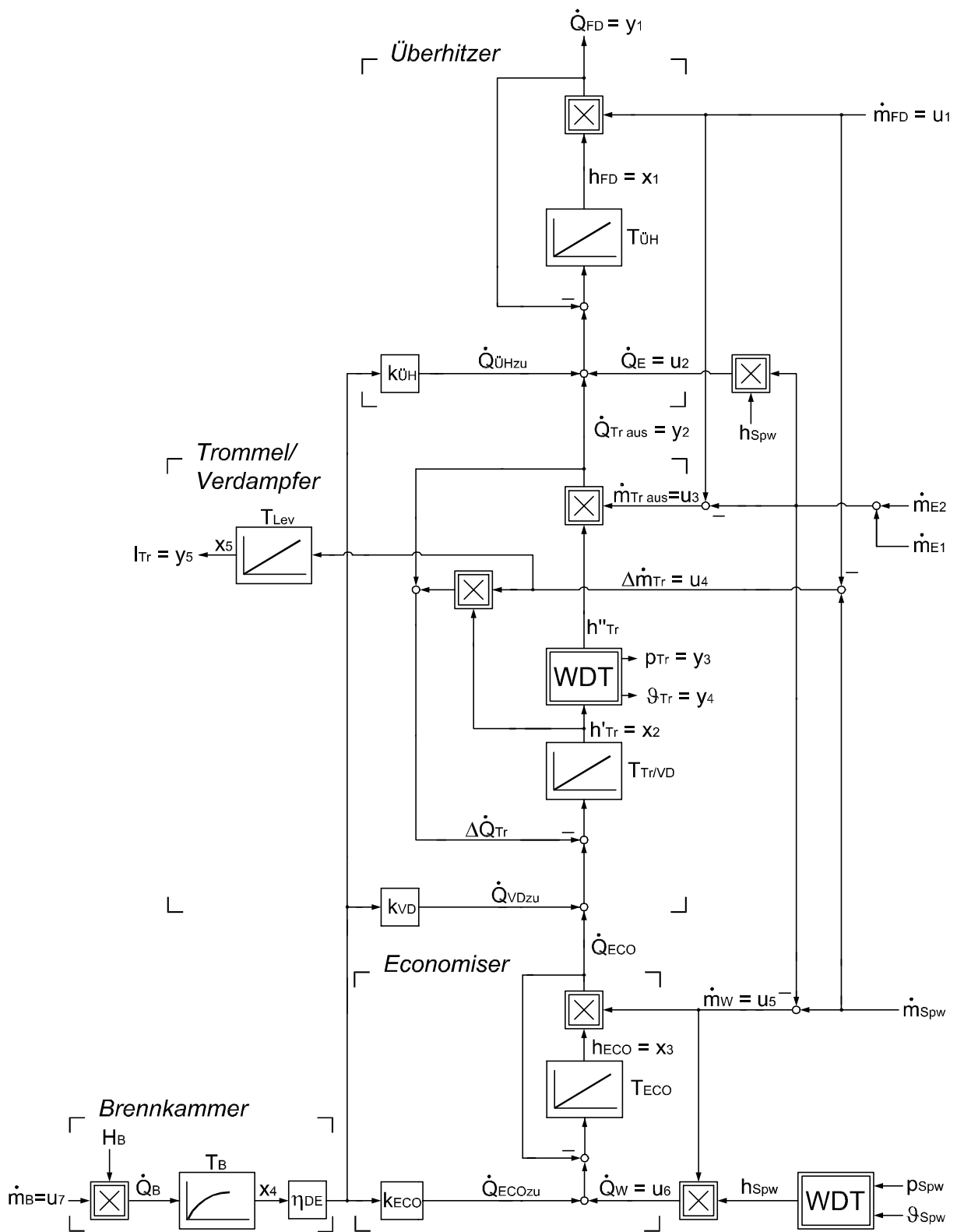


Bild 6/3: Dynamikmodell des Dampferzeugers

6.2.1 Wahl der Bezugsgrößen

Generell erfolgt die Berechnung aus numerischen Gründen mit bezogenen Größen. Als Bezugsgrößen wurden die folgenden Nennwerte gewählt:

Frischdampfdruck	$p_0 = 74 \text{ bar}$
Frischdampf Temperatur	$\vartheta_0 = 524 \text{ °C}$
Frischdampfmassenstrom	$\dot{m}_0 = 64 \text{ t/h.}$

Daraus abgeleitet ergeben sich die Bezugswerte für die Enthalpie und den Wärmestrom zu:

$$h_0 = f(p_0, \vartheta_0) = 3462,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_0 \cdot h_0 = 61,6 \text{ MW.}$$

Die oberen Brennwerte $H_{o \text{ Gas/Öl}}$ werden vom Lieferanten angegeben zu:

$$H_{o \text{ Gas}} = 11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \quad \text{und} \quad H_{o \text{ Öl}} = 10,95 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} .$$

Der Umrechnungsfaktor H_o / H_u beträgt 1,108. Somit ergeben sich die unteren Brennwerte

$$H_{u \text{ Gas}} = 10,0 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \quad \text{und} \quad H_{u \text{ Öl}} = 9,89 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} .$$

Diese werden für die Berechnung der Bezugswerte für die Brennstoff-Massenströme

$$\dot{m}_{0 \text{ Gas}} = \frac{\dot{Q}_0}{H_{u \text{ Gas}}} = 6144 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\text{und} \quad \dot{m}_{0 \text{ Öl}} = \frac{\dot{Q}_0}{H_{u \text{ Öl}}} = 6228 \text{ l/h}$$

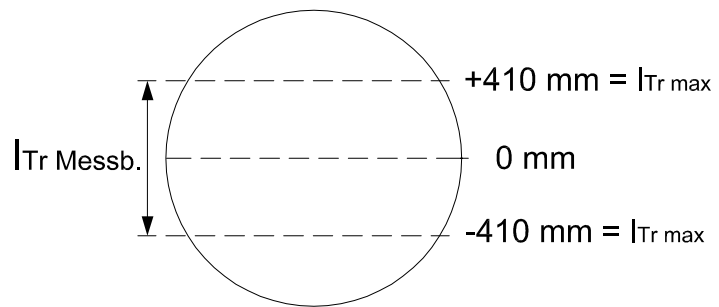
benötigt.

Für den Trommellevel I_{Tr} wurde der zugehörige Messbereich als Bezugswert gewählt, d.h.:

$$I_{Tr0} = I_{Tr\text{Messb.}}$$

$$= I_{Tr\text{max}} + |I_{Tr\text{min}}|$$

$$= 820\text{ mm}$$



Dabei liegt der Nullpunkt der Trommellevel-Messung bei halb gefüllter Trommel.

6.2.2 Bilineare Betrachtungsweise

Das in Bild 6/3 veranschaulichte Dynamikmodell des Dampferzeugers enthält durch die Enthalpie/Massenstrom-Multiplikationen Nichtlinearitäten. Die nachfolgende Herleitung der nichtlinearen Modellgleichungen lässt sich auf eine bilineare Betrachtungsweise zurückführen, da die oben erwähnten nichtlinearen Abhängigkeiten nur im Bereich der Eingangsgrößen auftreten.

Die kontinuierliche lineare Zustandsraumdarstellung

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{\underline{A}} \underline{x}(t) + \underline{\underline{B}} \underline{u}(t) \quad (6/1)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{\underline{C}} \underline{x}(t) + \underline{\underline{D}} \underline{u}(t)$$

wird mithilfe des Terms $\sum_{i=1}^q \underline{\underline{N}}_i \underline{x}(t) u_i(t)$ gemäß /22/ zur kontinuierlichen bilinearen

Zustandsdarstellung erweitert zu, s. auch Bild 6/4:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{\underline{A}} \underline{x}(t) + \underline{\underline{B}} \underline{u}(t) + \sum_{i=1}^q \underline{\underline{N}}_i \underline{x}(t) u_i(t) \quad (6/2).$$

$$\underline{y}(t) = \underline{\underline{C}} \underline{x}(t) + \underline{\underline{D}} \underline{u}(t) \quad \text{mit } q: \text{ Anzahl der Eingangsgrößen } u_i$$

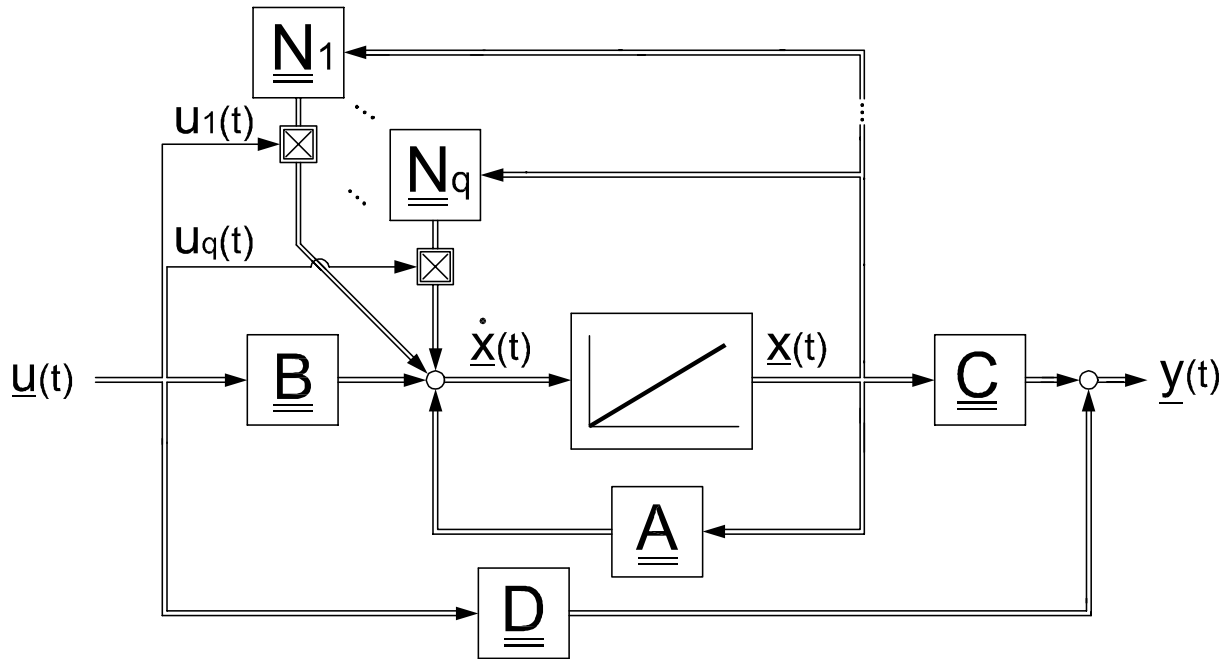


Bild 6/4: Blockschaltbild der kontinuierlichen bilinearen Zustandsraumdarstellung

Um die Matrizen in Gl. (6/2) zu bestimmen, wird zunächst das aus dem Blockschaltbild 6/3 abgeleitete Differentialgleichungssystem aufgestellt:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{\eta_{DE} k_{\dot{U}H}}{T_{\dot{U}H}} x_4 + \frac{1}{T_{\dot{U}H}} u_2 && + \frac{w_h}{T_{\dot{U}H}} x_2 u_3 - \frac{1}{T_{\dot{U}H}} x_1 u_1 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{\eta_{DE} k_{VD}}{T_{VD}} x_4 && + \frac{1}{T_{Tr/VD}} x_3 u_5 - \frac{w_h}{T_{Tr/VD}} x_2 u_3 - \frac{1}{T_{Tr/VD}} x_2 u_4 \\
 \dot{x}_3 &= \frac{\eta_{DE} k_{ECO}}{T_{ECO}} x_4 + \frac{1}{T_{ECO}} u_6 && - \frac{1}{T_{ECO}} x_3 u_5 \\
 \dot{x}_4 &= -\frac{1}{T_B} x_4 + \frac{H_B}{T_B} u_7 \\
 \dot{x}_5 &= \frac{1}{T_{Tr,lev}} u_4
 \end{aligned}$$

⏟
⏟

lineare Terme
bilineare Terme

$$\begin{aligned}
y_1 &= u_1 x_1 \\
y_2 &= w_h u_3 x_2 \\
y_3 &= w_p x_2 \\
y_4 &= w_g x_2 \\
y_5 &= x_5
\end{aligned} \tag{6/3}$$

$$\text{mit } \underline{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{m}_{FD} \\ \dot{Q}_E \\ \dot{m}_{Tr\,aus} \\ \Delta \dot{m}_{Tr} \\ \dot{m}_W \\ \dot{Q}_W \\ \dot{m}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{m}_{FD} \\ h_{Spw}(p_{Spw}, \vartheta_{Spw}) \cdot (\dot{m}_{E1} + \dot{m}_{E2}) \\ \dot{m}_{FD} - \dot{m}_{E1} - \dot{m}_{E2} \\ \dot{m}_{Spw} - \dot{m}_{FD} \\ \dot{m}_{Spw} - \dot{m}_{E1} - \dot{m}_{E2} \\ h_{Spw}(p_{Spw}, \vartheta_{Spw}) \cdot (\dot{m}_{Spw} - \dot{m}_{E1} - \dot{m}_{E2}) \\ \dot{m}_B \end{pmatrix} \tag{6/4}.$$

Das Differentialgleichungssystem enthält in den bilinearen Termen sowie bei der Berechnung der Ausgangsgrößen y_{2-4} die „Übertragungsfaktoren“ w_h (für die Sattdampf-Enthalpie), w_p (für den Sattdampf-Druck) und w_g (für die Sattdampf-Temperatur) der Wasserdampf-tafel. Ihre Berechnung erfolgt zu diskreten Zeitpunkten k :

$$w_h(k) = f(x_2(k)) = \frac{h''_{Tr}(x_2(k))}{x_2(k)} = \frac{h''_{Tr}(h'_{Tr}(k))}{h'_{Tr}(k)} \tag{6/5}$$

$$w_p(k) = f(x_2(k)) = \frac{p_{Tr}(x_2(k))}{x_2(k)} = \frac{p_{Tr}(h'_{Tr}(k))}{h'_{Tr}(k)} \tag{6/6}$$

$$w_g(k) = f(x_2(k)) = \frac{\vartheta_{Tr}(x_2(k))}{x_2(k)} = \frac{\vartheta_{Tr}(h'_{Tr}(k))}{h'_{Tr}(k)} \tag{6/7}.$$

Die in der kontinuierlichen bilinearen Zustandsraumdarstellung (6/2) enthaltenen Matrizen werden aus dem obigen Differentialgleichungssystem (6/3) abgeleitet, vgl. /23/:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\eta_{DE} k_{\dot{U}H}}{T_{\dot{U}H}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\eta_{DE} k_{VD}}{T_{Tr/VD}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\eta_{DE} k_{ECO}}{T_{ECO}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6/8), \quad \underline{\underline{B}} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{T_{\dot{U}H}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ECO}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_B}{T_B} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Tr,lev}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6/9),$$

$$\underline{\underline{C}} = \begin{pmatrix} u_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_h(k) \cdot u_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_p(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_g(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6/10), \quad \underline{\underline{D}} = \underline{\underline{0}} \quad (6/11).$$

$$\underline{\underline{N}}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_{\dot{U}H}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{N}}_3 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{w_h(k)}{T_{\dot{U}H}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{w_h(k)}{T_{Tr/VD}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{N}}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{Tr/VD}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{N}}_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{Tr/VD}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ECO}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{N}}_2 = \underline{\underline{N}}_6 = \underline{\underline{N}}_7 = \underline{\underline{0}}$$

(6/12).

Aus den obigen kontinuierlichen Matrizen werden gemäß /12/ und /22/ die diskreten Matrizen $\underline{\underline{A}}_d(k)$, $\underline{\underline{B}}_d(k)$ und $\underline{\underline{C}}_d(k)$ für jeden Zeitpunkt k neu berechnet:

$$\underline{\underline{A}}_d(k) = e^{\left(\underline{\underline{A}} + \sum \underline{\underline{N}}_i(k) u_i(k)\right) T} = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\left(\underline{\underline{A}} + \sum \underline{\underline{N}}_i(k) u_i(k)\right)^{\mu} \cdot T^{\mu}}{\mu!} \quad (6/13)$$

$$\underline{\underline{B}}_d(k) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\left(\underline{\underline{A}} + \sum \underline{\underline{N}}_i(k) u_i(k)\right)^{\mu} T^{\mu}}{(\mu+1)!} T^{\mu+1} \underline{\underline{B}} \quad (6/14)$$

$$\underline{\underline{C}}_d(k) = \underline{\underline{C}}(k) \quad (6/15).$$

Damit ergibt sich die diskrete bilineare Zustandsraumdarstellung zu:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{\underline{A}}_d(k) \underline{x}(k) + \underline{\underline{B}}_d(k) \underline{u}(k) \quad (6/16)$$

$$\underline{y}(k) = \underline{\underline{C}}_d(k) \underline{x}(k) + \underline{\underline{D}}_d \underline{u}(k) \quad (6/17).$$

6.3 Parameteridentifikation

Im Folgenden werden die im Dynamikmodell des Dampferzeugers, vgl. Bild 6/3, enthaltenen Parameter, d.h. die Zeitkonstanten T_i , der Wirkungsgrad η_{DE} sowie die Brennstoffwärmestrom-Aufteilungsparameter k_i , identifiziert.

6.3.1 Identifizierung der Economiser-, Trommel/Verdampfer- und Überhitzerzeitkonstante

Allgemein folgt aus der Bilanz für die in einem Heizflächenbereich gespeicherte Energie:

$$h = \frac{1}{m} \int \Delta \dot{Q} dt + h(t=0) \quad (6/18).$$

Beim Übergang zu bezogenen Größen

$$\frac{h}{h_0} = \frac{\dot{Q}_0}{m \cdot h_0} \int \frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}_0} dt + \frac{h(t=0)}{h_0} \quad (6/19)$$

$$h^* = \underbrace{\frac{\dot{Q}_0}{m \cdot h_0}}_{1/T_i} \int \Delta \dot{Q}^* dt + h^*(t=0) \quad (6/20)$$

ergibt sich für die Zeitkonstante mit der Beziehung $\dot{Q}_0 = \dot{m}_0 \cdot h_0$ zu:

$$T_i = \frac{m_i \cdot h_0}{\dot{Q}_0} = \frac{m_i}{\dot{m}_0} \quad (6/21).$$

Um die Masse des Fluids im Economiser, Verdampfer und Überhitzer zu berechnen, werden die jeweiligen Innen-Volumina benötigt. Diese ergeben sich laut /24/ zu:

Economiser:	3,2 m ³
Trommel:	15,2 m ³
Fallrohre:	2,9 m ³
Verdampferheizflächenrohre:	10,5 m ³
Überhitzer:	3,8 m ³
Frischdampfleitung:	0,1 m ³

Im Economiser beträgt bei Nennbetrieb die mittlere Temperatur 236°C und der mittlere Druck 79 bar. Damit berechnet sich die im Economiser gespeicherte Wassermasse unter Verwendung der Wasserdampf tafel aus /25/ wie folgt:

$$m_{ECO} = \frac{V_{ECO}}{v(79 \text{ bar}, 236^\circ\text{C})} = \frac{3,2 \text{ m}^3}{1,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}} = 2,64 \cdot 10^3 \text{ kg} \quad (6/22).$$

Daraus ergibt sich die Economiser-Zeitkonstante zu:

$$T_{ECO} = \frac{m_{ECO}}{\dot{m}_0} = \frac{2,64 \cdot 10^3 \text{ kg}}{17,78 \text{ kg/s}} \approx 150\text{s} \quad (6/23).$$

Mit der Annahme halber Füllung der Trommel und der Verdampferheizflächenrohre mit gesättigtem Wasser ergibt sich das Volumen des gesamten Wassers in der Trommel und im Verdampfer zu $V_{Wasser} = 15,75 \text{ m}^3$. Die Masse des Wassers ist

abhängig vom Sattdampf-Druck in der Trommel $p_{Tr\text{ satt}}$, der bei Nennbetrieb bei 76 bar liegt:

$$m_{\text{Wasser}} = \frac{V_{\text{Wasser}}}{v'(76\text{ bar})} = \frac{15,75\text{ m}^3}{1,37 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3/\text{kg}} = 11,5 \cdot 10^3\text{ kg} \quad (6/24).$$

Die Trommel/Verdampfer-Zeitkonstante $T_{Tr/VD}$ berechnet sich mithilfe der obigen berechneten Wassermasse m_{Wasser} zu:

$$T_{Tr/VD} = \frac{m_{\text{Wasser}}}{\dot{m}_0} = \frac{11,5 \cdot 10^3\text{ kg}}{17,78\text{ kg/s}} \approx 647\text{ s} \approx 11\text{ min} \quad (6/25).$$

Bei Nennbetrieb mit einer Überhitzer-Durchschnittstemperatur von 407°C und einem Durchschnittsdruck von 75 bar sowie halber Trommelfüllung mit gesättigtem Dampf berechnet sich die Dampfmasse wie folgt:

$$\begin{aligned} m_{\text{Dampf}} &= \frac{0,5 \cdot V_{Tr}}{v''(76\text{ bar})} + \frac{V_{\text{ÜH}}}{v(75\text{ bar}, 407^\circ\text{C})} + \frac{V_{\text{FD-Leit.}}}{v(74\text{ bar}, 524^\circ\text{C})} \\ &= \frac{0,5 \cdot 15,2\text{ m}^3}{0,0246\text{ m}^3/\text{kg}} + \frac{3,8\text{ m}^3}{0,0370\text{ m}^3/\text{kg}} + \frac{0,1\text{ m}^3}{0,0464\text{ m}^3/\text{kg}} = 413,8\text{ kg} \quad (6/26). \end{aligned}$$

Damit berechnet sich die Überhitzerzeitkonstante zu:

$$T_{\text{ÜH}} = \frac{m_{\text{Dampf}}}{\dot{m}_0} = \frac{413,8\text{ kg}}{17,78\text{ kg/s}} \approx 23\text{ s} \quad (6/27).$$

Alle obigen Annahmen für Drücke und Temperaturen werden bei der Berechnung in Kapitel 6.4 wenn möglich durch berechnete, ansonsten von gemessenen Werten ersetzt.

Die Volumina des in der Trommel eingespeicherten Wassers bzw. Dampfes ist abhängig vom Trommellevel. Diese Abhängigkeit wird bei der Berechnung der Trommel/Verdampfer- und Überhitzer-Zeitkonstanten berücksichtigt, s. Anhang A4.

Die Zeitkonstante T_B für die Wärmestromentbindung in der Brennkammer ist, speziell bei einer hier vorhandenen Gasfeuerung, im unteren Sekundenbereich anzusiedeln, vgl. /26/. Da die Verdampferzeitkonstante $T_{Tr/VD} \approx 11\text{ min}$ beträgt und

somit ein vielfaches größer ist als die Verzögerung der Wärmestromentbindung, wird sie im Folgenden vernachlässigt.

6.3.2 Identifizierung der Trommellevel-Zeitkonstante

Ausgehend von der Gleichung für die in der Trommel gespeicherten Wassermasse und der Einführung von bezogenen Größen ergibt sich der Trommellevel l_{Tr}^* zu:

$$l_{Tr} = \frac{v}{A} \int \Delta \dot{m} dt + l(t=0) \quad (6/28)$$

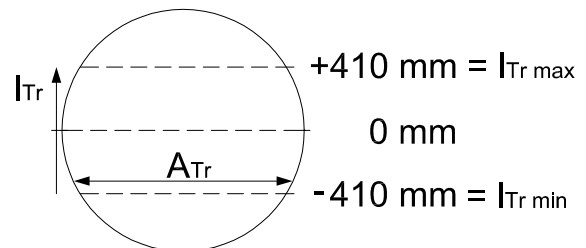
$$\frac{l_{Tr}}{l_{Tr0}} = \frac{v \cdot \dot{m}_0}{A \cdot l_{Tr0}} \int \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}_0} dt + \frac{l_{Tr}(t=0)}{l_{Tr0}} \quad (6/29)$$

$$l_{Tr}^* = \underbrace{\frac{v \cdot \dot{m}_0}{A \cdot l_{Tr0}}}_{1/T_{Lev}} \int \Delta \dot{m}^* dt + l_{Tr}^*(t=0) \quad (6/30).$$

Die Trommelwasser-Oberfläche A_{Tr} ist abhängig vom Trommellevel l_{Tr} , d.h. von der Krümmung der Trommel:

$$A_{Tr} = f(l_{Tr}) = L_{Tr} \cdot 2 \cdot \sqrt{r_{Tr}^2 - l_{Tr}^2} \quad (6/31)$$

mit: Trommellänge $L_{Tr} = 5,97 \text{ m}$
 Trommelradius $r_{Tr} = 0,9 \text{ m}$



Die Funktion $A_{Tr} = f(l_{Tr})$ ist im Bild 6/5 dargestellt:

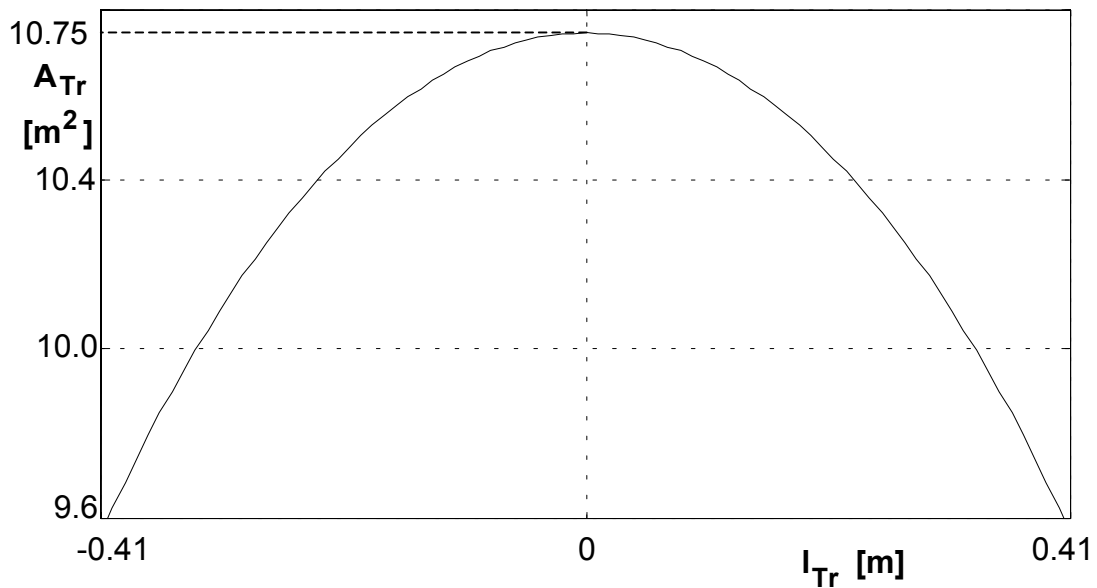


Bild 6/5: Abhängigkeit der Trommelwasser-Oberfläche A_{Tr} vom Trommellevel l_{Tr}

Bei Füllung der Trommel zur Hälfte mit Wasser ($l_{Tr} = 0\text{m}$) ergibt sich die Trommellevel-Zeitkonstante T_{Lev} zu, vgl. Gl.(6/30):

$$T_{Lev} = \frac{A_{Tr}(l_{Tr} = 0) \cdot l_{Tr 0}}{v(p_{Tr \text{ satt}}) \cdot \dot{m}_0} = \frac{10,75 \text{ m}^2 \cdot 0,82 \text{ m}}{1,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot 17,78 \text{ kg/s}} \approx 362 \text{ s} \approx 6 \text{ min} \quad (6/32).$$

6.3.3 Identifizierung des Dampferzeuger-Wirkungsgrades

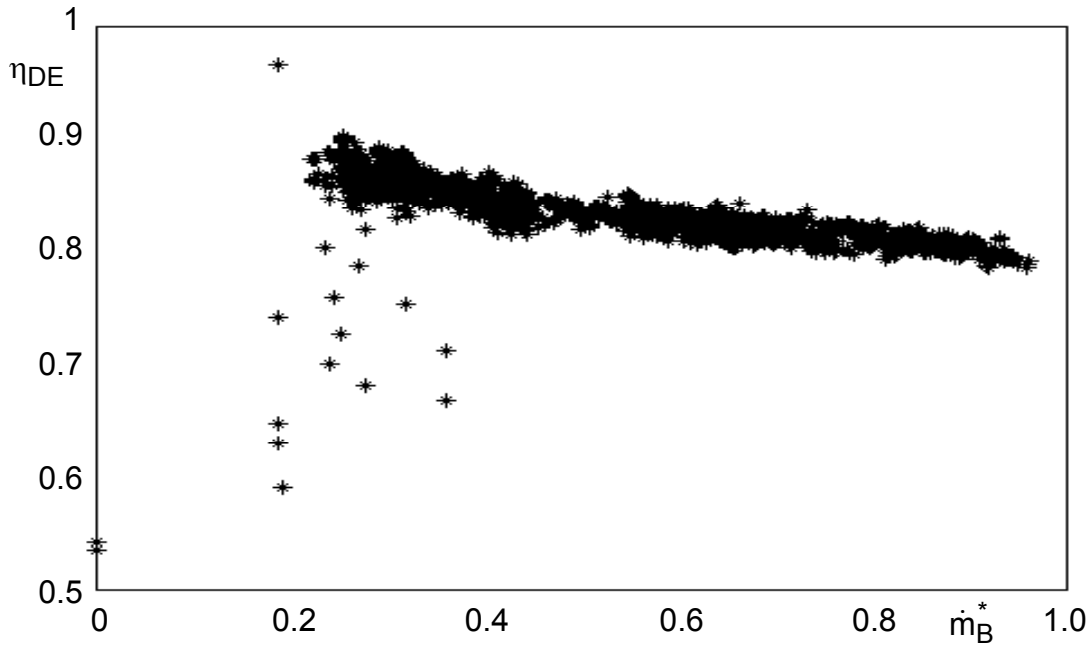
Der Dampferzeuger-Wirkungsgrad wird mithilfe der Gleichung

$$\eta_{DE} = \frac{\dot{Q}_{FD} - \dot{Q}_{Spw}}{\dot{Q}_{B \text{ Gas}}} \quad (6/33)$$

bestimmt. Hierzu dient eine Langzeitauswertung unter Berücksichtigung von insgesamt 3000 Messdatensätzen stationärer Betriebszustände. Die Vielzahl der Parameterwerte für η_{DE} ist im Bild 6/6 a in Abhängigkeit vom Brennstoffmassenstrom dargestellt. Dabei ist die Zuverlässigkeit der Werte erst oberhalb von $\dot{m}_B^* = 25\%$ gewährleistet. Bild 6/6 b enthält den gemittelten Verlauf. Es fällt auf, dass der Wirkungsgrad des Dampferzeugers mit Brennstoffzunahme leicht abnimmt. Das beruht darauf, dass bei steigender Blocklast auch die Grädigkeiten der Heizkondensatoren zunehmen. Dies hat für den Dampferzeuger eine verminderte

Kühlleistung zur Folge. Die daraus resultierende Erhöhung der Speisewassertemperatur und damit des dem Dampferzeuger zugeführtem Wärmestroms \dot{Q}_{Spw} ist der Grund für das Absinken des Dampferzeuger-Wirkungsgrades mit Erhöhung der Brennstoffzufuhr.

a) Einzelauswertungen



b) gemittelter Verlauf

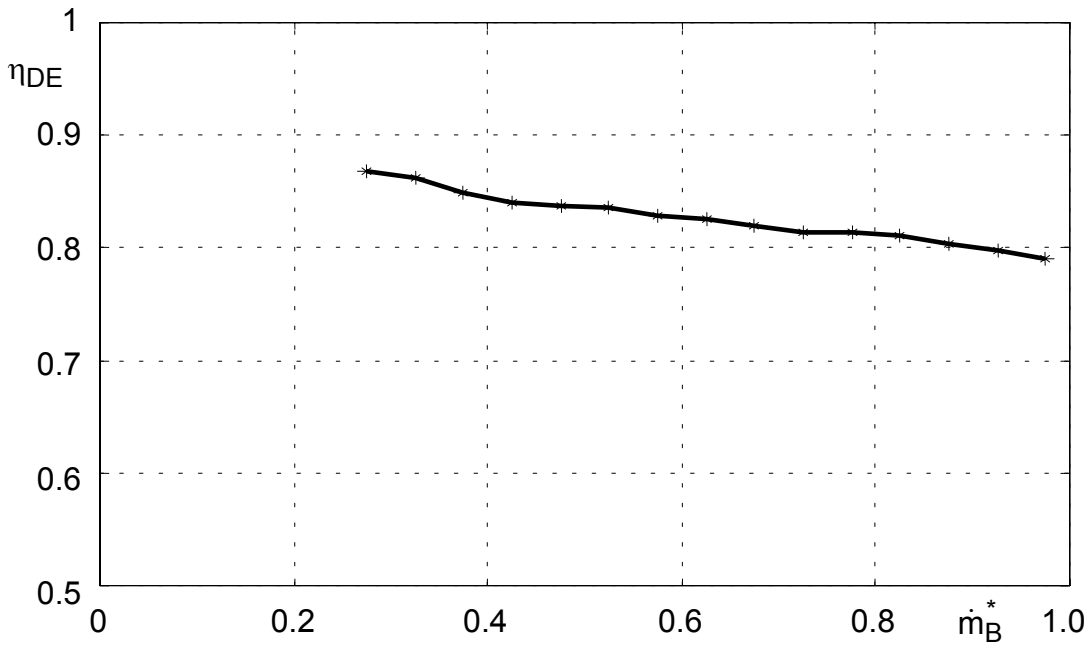


Bild 6/6: Dampferzeuger-Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Brennstoff-Massenstroms

6.3.4 Identifizierung der Brennstoffwärmestrom-Aufteilung

Die Parameter k_{ECO} , k_{VD} und $k_{ÜH}$ teilen den Brennstoff-Wärmestrom auf die Bereiche Economiser, Verdampfer und Überhitzer auf. Sie werden mithilfe einer Parameteradaptation ermittelt, wobei die Bedingung $k_{ECO} + k_{VD} + k_{ÜH} = 1$ berücksichtigt werden muss.

Ausgehend von einem Startwertvektor $\underline{\beta}_0$ und anschließender Variation um $\Delta\beta$ bei einem der drei zu adaptierenden Parametern wird iterativ die Minimierung des nachfolgend beschriebenen Gütekriteriums angestrebt. Das Flussdiagramm der Parameteradaptation ist im Anhang A5 dargestellt, vgl. /27/.

Das Gütekriterium für die hier angewendete Parameteridentifikation beinhaltet den gewichteten Vergleich von realen Messgrößen (M) mit berechneten Größen (R) wie Trommeldruck p_{Tr} , Trommeltemperatur ϑ_{Tr} , Trommelausgangs- $\dot{Q}_{Tr\text{aus}}$ und Frischdampf-Wärmestrom \dot{Q}_{FD} .

a) Berechnung des Gütekriteriums

Das Ensemble der je Messgröße $X_i(t)$ erfassten Messwerte $X_i(j)$ wird zu dem Messvektor

$$\underline{X}_i^{(M)} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}_i^{(M)} \quad (6/34).$$

zusammengefasst.

Je Messdaten-Ensemble ergeben sich die Abweichungen ΔX_i zwischen Messung

und Rechnung zu:

$$\Delta X_1 = \underline{p}_{Tr}^{(M)} - \underline{p}_{Tr}^{(R)}$$

$$\Delta X_2 = \underline{\vartheta}_{Tr}^{(M)} - \underline{\vartheta}_{Tr}^{(R)}$$

$$\Delta X_3 = \underline{\dot{Q}}_{Tr\text{aus}}^{(M)} - \underline{\dot{Q}}_{Tr\text{aus}}^{(R)}$$

$$\Delta X_4 = \dot{Q}_{FD}^{(M)} - \dot{Q}_{FD}^{(R)} \quad (6/35).$$

Die Auswertung des Gütekriteriums erfolgt nach der Root-Mean-Square-Methode:

$$G^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{iM} \cdot \Delta X_{j i}^2} \Rightarrow \min \quad (6/36)$$

mit: $j = 1 \dots n$ Anzahl der Messdaten pro Messdaten-Ensemble,
 $i = 1 \dots m$ Anzahl der Messdaten-Ensembles, hier $m = 4$,
 und g_{iM} Gewichtung der Abweichungen.

Mittels der Gewichtungen g_{iM} wird die Messgenauigkeit jedes einzelnen Messdaten-Ensembles berücksichtigt, Einzelheiten s. Kapitel 4.3.3.

b) Parameteridentifikation

Das Konvergenzverhalten der Parameter für die Brennstoffwärmestrom-Aufteilung sowie das des Gütekriteriums sind im unteren Bild 6/7 a-d dargestellt. Wie zu ersehen, erreicht das Gütekriterium nach 19 Iterationsdurchläufen sein Minimum. Da die Parameterwerte bei weiteren Iterationsverläufen dort verharren, ist die Identifizierung abgeschlossen. Als Ergebnis ergibt sich:

$$k_{ECO} = 0,211 \quad k_{VD} = 0,541 \quad k_{ÜH} = 0,248 .$$

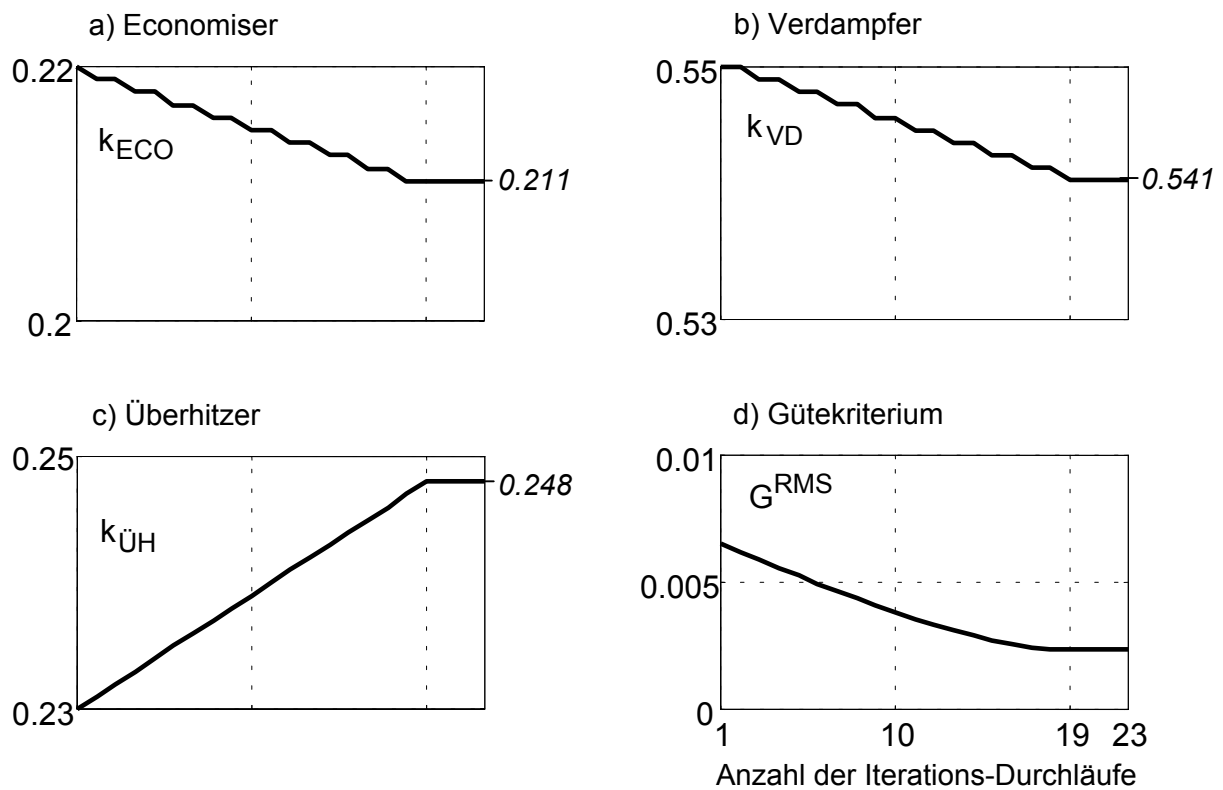


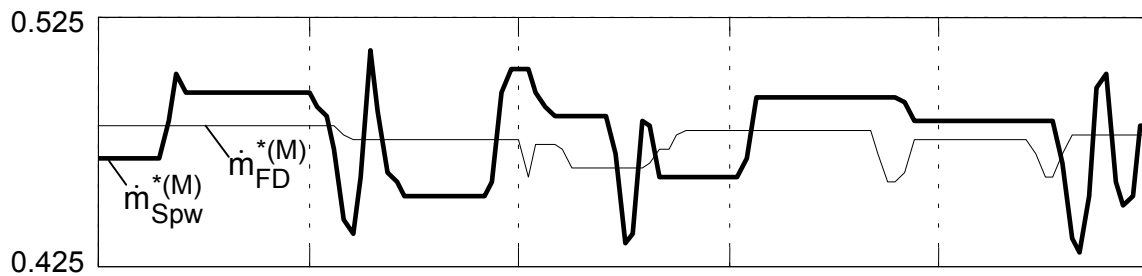
Bild 6/7: Konvergenzverhalten der Parameter für die Brennstoffwärme-Aufteilung sowie des Gütekriteriums G^{RMS}

6.4 Vergleich von Messung und Rechnung

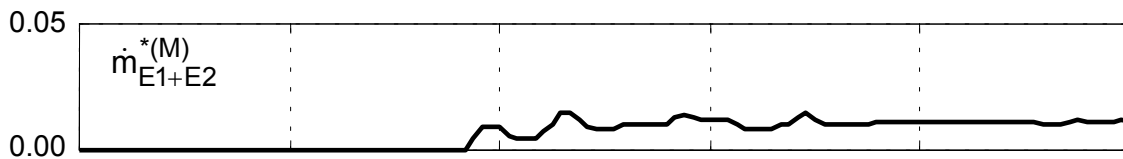
Als Modelleingangsgrößen wird der Messdatensatz vom Mittwoch, den 12.04.02 von 07:20 - 07:30 h verwendet, vgl. Kapitel 5.

Im folgenden Bild 6/8 sind die Modell-Eingangsgrößenverläufe, d.h. die Original-Messverläufe, jeweils bezogen im gleichem Maßstab dargestellt.

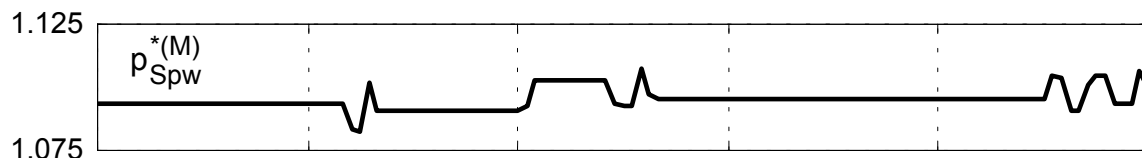
a) Frischdampf- und Speisewasser-Massenstrom



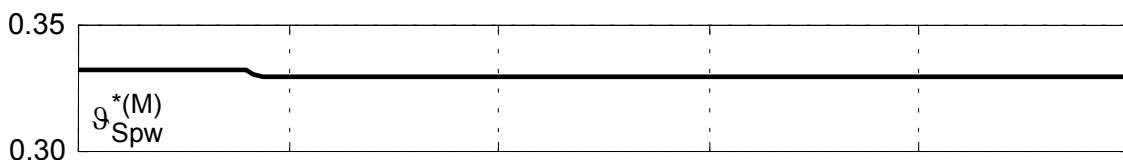
b) Summe der Einspritz-Massenströme



c) Speisewasserdruck



d) Speisewassertemperatur



e) Brennstoff-Massenstrom

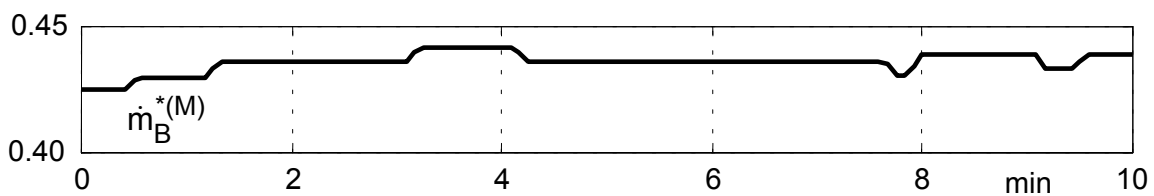


Bild 6/8: Modell-Eingangsrößen (Original-Messverläufe)

⇒ **Darstellung in bezogenen Größen mit jeweils gleichem Maßstab**

Die Wärmeströme \dot{Q}_{FD} und \dot{Q}_{Traus} werden nicht explizit gemessen. Sie werden aus gemessenen Größen abgeleitet und im Folgenden mit \hat{M} gekennzeichnet:

$$\dot{Q}_{FD}^{(\hat{M})} = h \underbrace{(p_{FD}, \vartheta_{FD})}_{\text{Messwerte}} \cdot \dot{m}_{FD} \quad (6/37)$$

$$\dot{Q}_{Tr\text{aus}}^{(\hat{M})} = h'' \underbrace{(p_{Tr})}_{\text{Messwerte}} \cdot [\dot{m}_{FD} - \dot{m}_E] \quad (6/38)$$

Der Vergleich mit den im Modell berechneten Wärmeströmen ist im Bild 6/9 a und b dargestellt. Im gleichem Maßstab sind im Bild 6/9 c bis e die zusätzlich berechneten Ausgangsgrößen Trommeldruck p_{Tr} , Trommeltemperatur ϑ_{Tr} und Trommellevel l_{Tr} zusammen mit den zugehörigen Messverläufen veranschaulicht.

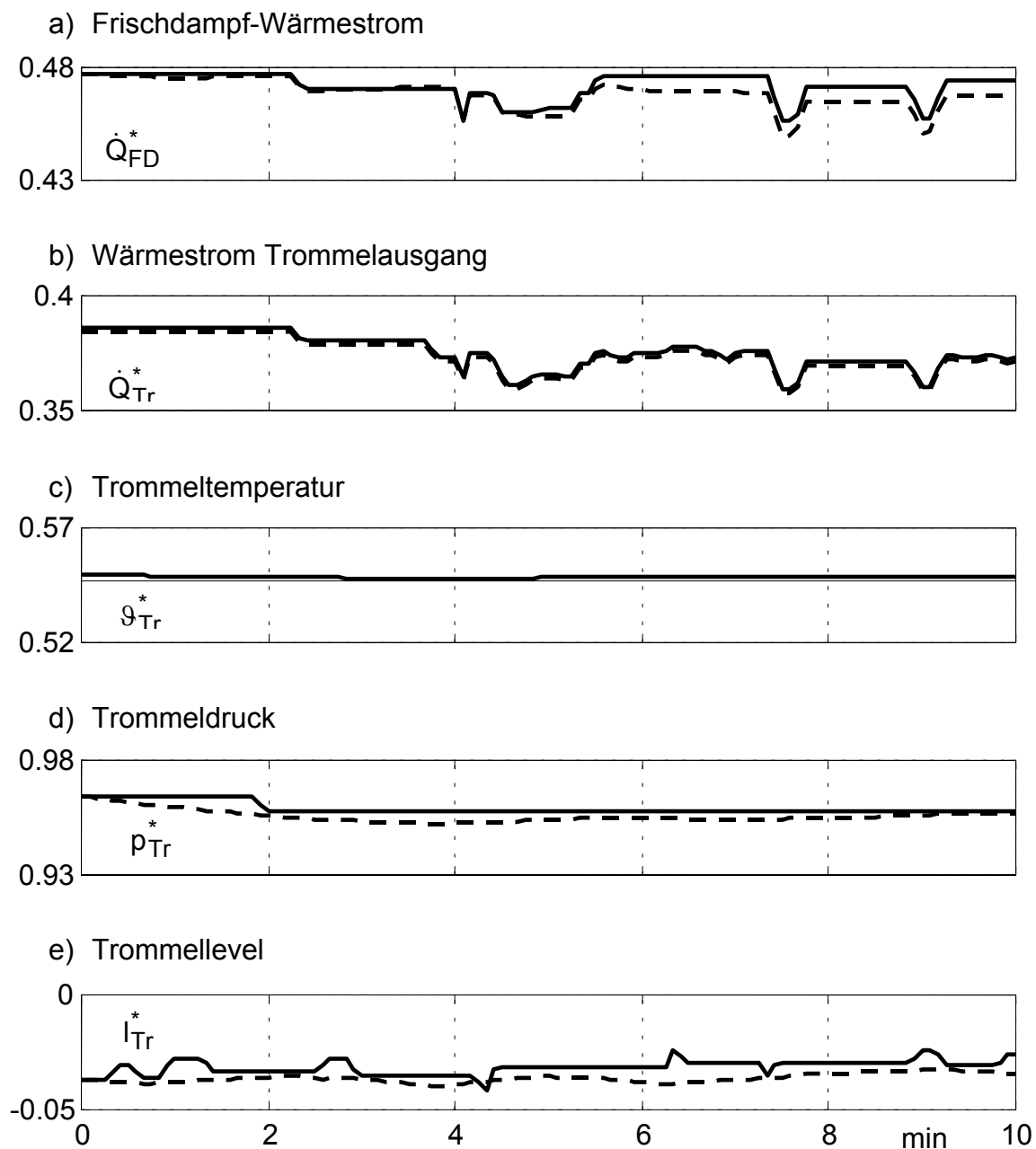


Bild 6/9: Vergleich von Messung und Rechnung
 ⇒ Darstellung in bezogenen Größen mit jeweils gleichem Maßstab

Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Signalverläufen in den Teilbildern a bis e zeigt eine gute Übereinstimmung von realem und modelliertem Anlagenverhalten, was für eine spätere Validierung von entscheidender Bedeutung ist.

Eine weitere Verbesserung lässt sich bei der Trommellevel-Berechnung durch eine detailliertere Nachbildung des Verdampfungsvorganges innerhalb von Trommel und Verdampfer erzielen. Dieser Sachverhalt wird im folgenden Kapitel 6.5 erläutert.

6.5 Detaillierung der Trommellevel-Berechnung

Im Folgenden wird in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3502 /28/ bei der Trommellevel-Berechnung zusätzlich der Einfluss des Trommeldrucks sowie des zugeführtem Verdampfer-Wärmestroms berücksichtigt, vgl. Bild 6/10. Dadurch wird die Übereinstimmung des berechneten Signalverlauf mit dem Original-Messverlaufes aus Bild 6/9 e weiter verbessert.

1) Einfluss des Trommeldrucks p_{Tr}

Das in der Trommel siedende Medium ist ein Gemisch aus Wasser und Wasserdampf. Infolgedessen ist das Volumen des Fluids druck- und temperaturabhängig. Da entlang der Siedekennlinie Druck und Temperatur streng miteinander gekoppelt sind, genügt es die Einflüsse des Trommeldrucks bei der Berechnung des Trommellevels zu betrachten.

So hat bei angenommener konstanter Speisewasserzufuhr eine fiktive sprungförmige Erhöhung der Dampferzeugung \dot{m}_{FD} , z.B. durch weiteres Öffnen des Frischdampfventils, einen Druckabfall im Dampferzeuger zur Folge. Dieser Druckabfall bewirkt durch verstärkte Dampfblasenbildung ein vorübergehendes „Anschwellen“ des in der Trommel gespeicherten Wassers und damit ein kurzfristiges Ansteigen des Trommellevels, vgl. verzögertes D-Verhalten (1) in Bild 6/10. Längerfristig fällt der Trommellevel selbstverständlich integral ab, bedingt durch das zugrundegelegte Ungleichgewicht zwischen erhöhter Dampferzeugung und konstanter Speisewasserzufuhr.

2) Einfluss des zugeführten Verdampfer-Wärmestroms \dot{Q}_{VDzu}

Eine Veränderung der Lage der Verdampfungszone in den Steigrohren des Verdampfers wirkt sich ebenfalls auf den Trommellevel aus. Beispielsweise führt eine fiktive sprungförmige Erhöhung des dem Verdampfer zugeführten Wärmestroms \dot{Q}_{VDzu} zu einer erhöhten Dampfblasenbildung in den Steigrohren. Dies bedingt zum einen eine proportional wirkende Verlagerung der Verdampfungszone nach unten, zum anderen drängen die zusätzlich entstehenden Dampfblasen das Wasser in die Trommel zurück, was ein Ansteigen des Trommellevels zur Folge hat, vgl. das um ΔI_{Tr} angehobene Verhalten (2) in Bild 6/10. Des Weiteren bewirkt die Erhöhung des dem Verdampfer zugeführten Wärmestroms \dot{Q}_{VDzu} eine vorübergehende Erhöhung des Frischdampfmassenstroms, was eine integral wirkende Absenkung des Trommellevels zur Folge hat.

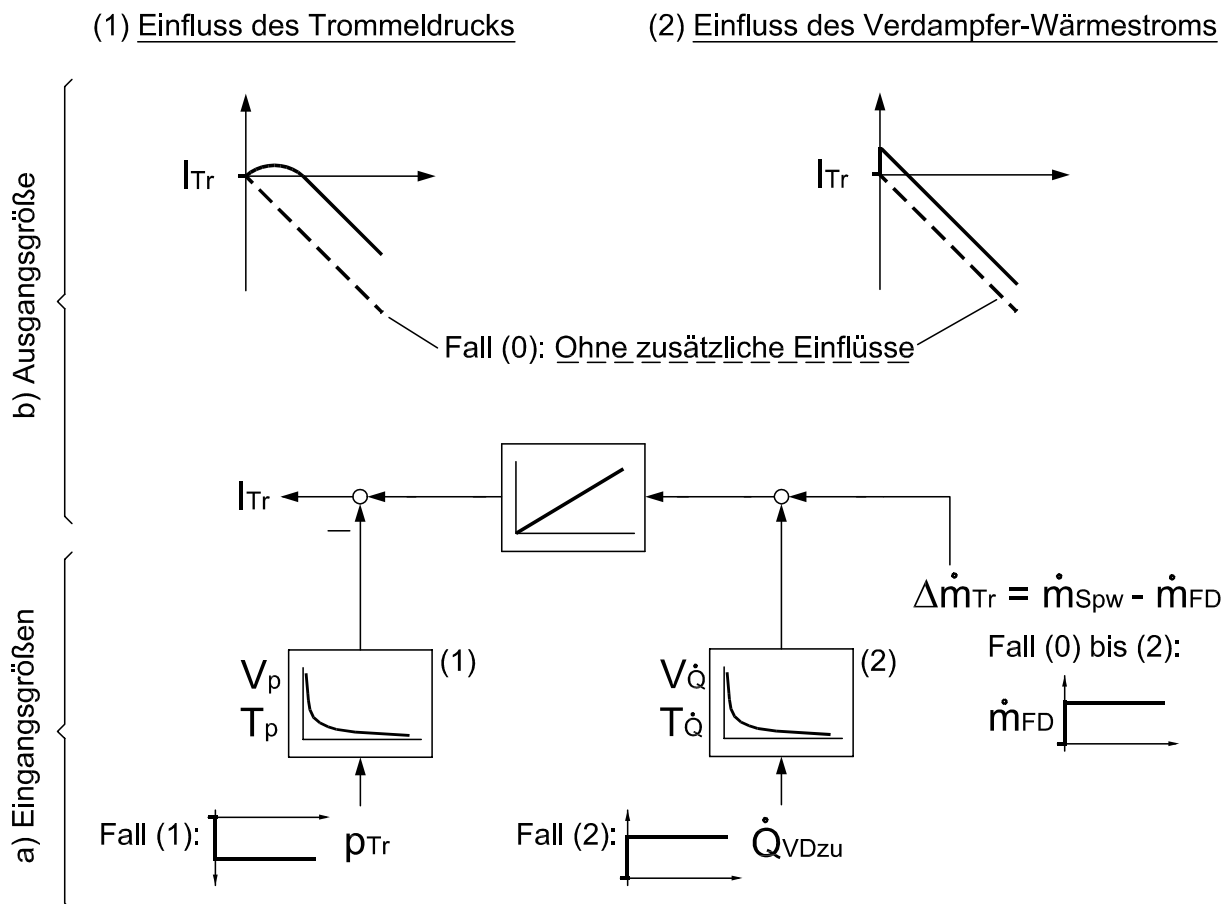


Bild 6/10: Detaillierte Trommellevel-Berechnung

Die Werte der zusätzlichen Parameter $V_p, T_p, V_{\dot{Q}}$ und $T_{\dot{Q}}$ werden mithilfe einer Parameteradaption wie im Anhang A5 beschrieben identifiziert. Ihre Werte sind im Bild 6/12 mit enthalten.

Im Bild 6/11 sind der Original-Messverlauf $I_{Tr}^{*(M)}$, der detailliert berechnete Verlauf $I_{Tr\ det.}^{*(R)}$ sowie der vereinfacht berechnete Verlauf $I_{Tr}^{*(R)}$, d.h. ohne Berücksichtigung der oben beschriebenen Zusatz-Einflüsse, dargestellt. Um den Vergleich der verschiedenen Verläufe besser zu veranschaulichen, wurde die Auflösung in Ordinate-Richtung um den Faktor 8 gegenüber Teilbild 6/9 e erhöht. Wie zu erkennen, konnte die Übereinstimmung zwischen Modell- und realen Anlagen-Verhalten durch die detaillierte Trommellevel-Berechnung noch verbessert werden.

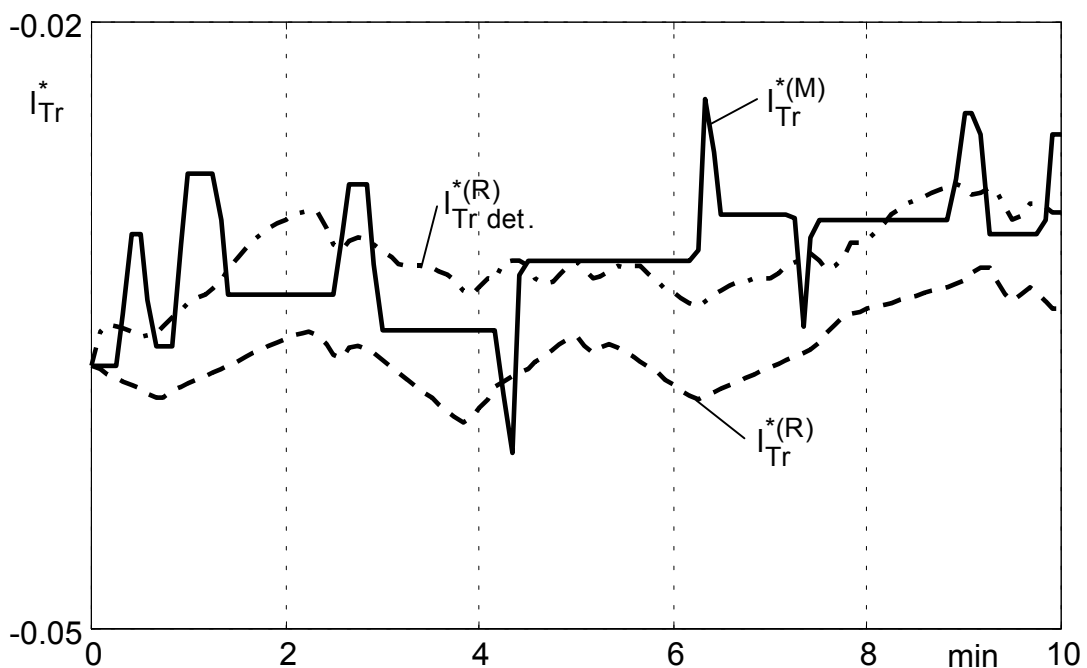


Bild 6/11: Original Messverlauf $I_{Tr}^{*(M)}$, detaillierte Trommellevel-Berechnung $I_{Tr\ det.}^{*(R)}$ sowie vereinfachte Trommellevel-Berechnung $I_{Tr}^{*(R)}$ nach Bild 6/9 e

6.6 Dynamische Validierung

Grundlage für die dynamische Validierung nach Kapitel 2.2.3 ist das in Bild 6/12 dargestellte Blockschaltbild. Dieses ist ausgehend vom ursprünglichen Blockschaltbild 6/3 um die detaillierte Trommellevel-Berechnung erweitert. Zudem sind die identifizierten Parameter mit eingetragen.

Die dynamisch zu validierenden Ein- und Ausgangsgrößen sind im Bild 6/12 durch \odot bzw. \otimes gekennzeichnet.

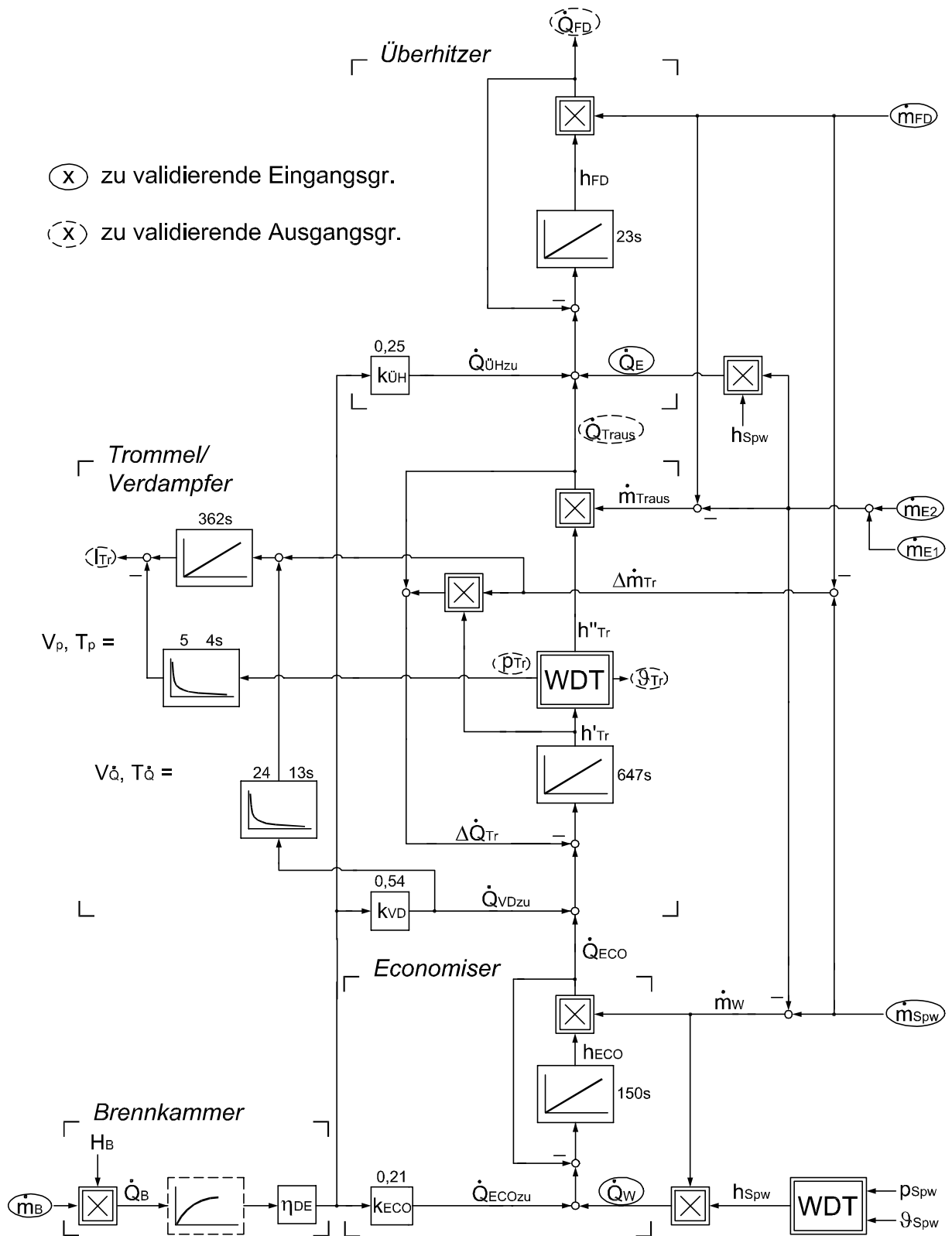


Bild 6/12: Modifiziertes Blockschaltbild

6.6.1 Linearisierung

Die bilinearen diskreten Zustandsraumdarstellung aus Kap. 6.3.1 eignet sich gut für die Berechnung der Prozess-Ausgangsgrößen über einen längeren Zeitraum, vgl. Bild 6/9. Wie im Folgenden näher erläutert, ist diese Form der Zustandsdarstellung jedoch für die dynamische Validierung nicht geeignet.

Bei der bilinearen Diskretisierung

$$\underline{\underline{A}}_{d \text{ bilin.}}(k) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\left(\underline{\underline{A}} + \sum \underline{\underline{N}}_i(k) u_i(k)\right)^{\mu} \cdot T^{\mu}}{\mu!} \quad (6/39)$$

$$\underline{\underline{B}}_{d \text{ bilin.}}(k) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{\left(\underline{\underline{A}} + \sum \underline{\underline{N}}_i(k) u_i(k)\right)^{\mu} T^{\mu}}{(\mu+1)!} T^{\mu+1} \underline{\underline{B}} \quad (6/40)$$

enthalten die Matrizen $\underline{\underline{A}}_{d \text{ bilin.}}$ und $\underline{\underline{B}}_{d \text{ bilin.}}$ die Nichtlinearitäten über das Produkt $\sum \underline{\underline{N}}_i(k) \cdot u_i(k)$. Somit sind sie abhängig von den nichtlinear ins System einfließenden Eingangsgrößen \underline{u} :

$$\underline{\underline{A}}_{d \text{ bilin.}} = f(\underline{u}), \quad \underline{\underline{B}}_{d \text{ bilin.}} = f(\underline{u}) \quad (6/41).$$

Die impliziten Nebenbedingungen für den dynamischen Validierungs-Algorithmus

$$\underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, \underline{x}) = \begin{pmatrix} \underline{y}(k) - \underline{\underline{C}}_d \underline{\underline{A}}_d^2 \underline{x}(k-2) - \underline{\underline{C}}_d \underline{\underline{A}}_d \underline{\underline{B}}_d \underline{u}(k-2) - \underline{\underline{C}}_d \underline{\underline{B}}_d \underline{u}(k-1) \\ \underline{y}(k-1) - \underline{\underline{C}}_d \underline{\underline{A}}_d \underline{x}(k-2) - \underline{\underline{C}}_d \underline{\underline{B}}_d \underline{u}(k-2) \end{pmatrix} \quad (6/42)$$

müssen jedoch nach den zu validierenden Aus- bzw. Eingangsgrößen analytisch aufgelöst werden, vgl. Gl.(2/36). Dies ist nach der oben aufgezeigten Bildung der bilinearen diskreten Matrizen $\underline{\underline{A}}_{d \text{ bilin.}}$ und $\underline{\underline{B}}_{d \text{ bilin.}}$ nicht möglich. Aus diesem Grund wird eine Linearisierung der bilinearen Zusatzgleichungen erforderlich.

a) Beschreibung der Linearisierung am Beispiel eines Terms

Durch die Multiplikation der Frischdampf-Enthalpie ($h_{FD} = x_1$) mit dem Frischdampf-Massenstrom ($\dot{m}_{FD} = u_1$) ergibt sich folgender nichtlinearer Term, vgl. Gl.(6/3):

$$-\frac{1}{T_{\ddot{U}H}} x_1(t) u_1(t). \quad (6/43).$$

Durch die Beziehungen

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1(t=0) + \Delta x_1(t) = x_{10} + \Delta x_1 \\ u_1(t) &= u_1(t=0) + \Delta u_1(t) = u_{10} + \Delta u_1 \end{aligned} \quad (6/44)$$

gilt:

$$-\frac{1}{T_{\ddot{U}H}} (x_{10} + \Delta x_1) \cdot (u_{10} + \Delta u_1). \quad (6/45).$$

Durch teilweises Ausmultiplizieren erhält man

$$-\frac{1}{T_{\ddot{U}H}} \left[\underbrace{(x_{10} + \Delta x_1)}_{=x_1} \cdot u_{10} + x_{10} \Delta u_1 + \underbrace{\Delta x_1 \Delta u_1}_{\rightarrow 0} \right] \quad (6/46)$$

und mit $x_{10} + \Delta x_1 = x_1$ sowie $\Delta x_1 \cdot \Delta u_1 \rightarrow 0$ ergibt sich schließlich:

$$-\frac{1}{T_{\ddot{U}H}} [u_{10} x_1 + x_{10} \Delta u_1] \quad (6/47).$$

b) Linearisierung aller Terme

Durch die Anwendung obiger Vorgehensweise auf das gesamte nichtlineare Differentialgleichungssystem (6/3) erhält man das für die dynamische Validierung notwendige folgendes lineare Differentialgleichungssystem:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{\eta_{DE} k_{\ddot{U}H}}{T_{\ddot{U}H}} x_4 + \frac{w_h}{T_{\ddot{U}H}} (u_{10} - u_{20}) x_2 - \frac{1}{T_{\ddot{U}H}} u_{10} x_1 + \frac{1}{T_{\ddot{U}H}} u_5 + \frac{w_h}{T_{\ddot{U}H}} x_{20} (\Delta u_1 - \Delta u_2) \\ &\quad - \frac{1}{T_{\ddot{U}H}} x_{10} \Delta u_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{\eta_{DE} k_{VD}}{T_{Tr/VD}} x_4 + \frac{1}{T_{Tr/VD}} (u_{30} - u_{20}) x_3 - \frac{w_h}{T_{Tr/VD}} (u_{10} - u_{20}) x_2 \\ &\quad - \frac{1}{T_{Tr/VD}} (u_{30} - u_{10}) x_2 + \frac{1}{T_{Tr/VD}} x_{30} (\Delta u_3 - \Delta u_2) - \frac{w_h}{T_{Tr/VD}} x_{20} (\Delta u_1 - \Delta u_2) \\ &\quad - \frac{1}{T_{Tr/VD}} x_{20} (\Delta u_3 - \Delta u_1) \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\eta_{DE} k_{ECO}}{T_{ECO}} x_4 - \frac{1}{T_{ECO}} (u_{30} - u_{20}) x_3 - \frac{1}{T_{ECO}} x_{30} (\Delta u_3 - \Delta u_2) + \frac{1}{T_{ECO}} u_6$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{T_B} x_4 + \frac{H_B}{T_B} u_4$$

$$\dot{x}_5 = \frac{\eta_{DE} k_{VD} V_{\dot{Q}}}{T_{Tr.lev}} x_4 - \frac{1}{T_{Tr.lev}} x_7 + \frac{1}{T_{Tr.lev}} (\Delta u_3 - \Delta u_1)$$

$$\dot{x}_6 = -\frac{1}{T_p} x_6 + \frac{w_p V_p}{T_p} x_2$$

$$\dot{x}_7 = -\frac{1}{T_{\dot{Q}}} x_7 + \frac{\eta_{DE} k_{VD} V_{\dot{Q}}}{T_{\dot{Q}}} x_4$$

$$y_1 = (\Delta u_1 + u_{10}) x_1$$

$$y_2 = w_h [\Delta u_1 + u_{10} - (\Delta u_2 + u_{20})] x_2$$

$$y_3 = w_p x_2$$

$$y_4 = w_g x_2$$

$$y_5 = x_5 + x_6 - w_p V_p x_2 + \frac{1}{T_{Tr.lev}} (u_{30} - u_{10})$$

$$\text{mit } \underline{u} = \begin{pmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \dot{m}_{FD} \\ \Delta \dot{m}_{E1+E2} \\ \Delta \dot{m}_{Spw} \\ \dot{m}_B \\ \dot{Q}_E \\ \dot{Q}_W \end{pmatrix}$$

(6/48).

Aus obigem Differentialgleichungssystem können die kontinuierlichen Matrizen $\underline{\underline{A}}$, $\underline{\underline{B}}$ und $\underline{\underline{C}}$ hergeleitet und anschließend wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben die für die dynamische Validierung notwendigen diskreten Matrizen $\underline{\underline{A}}_d$, $\underline{\underline{B}}_d$ und $\underline{\underline{C}}_d$ berechnet werden.

6.6.2 Beschreibung der dynamischen Validierung

Der dynamischen Validierungsalgorithmus aus Kap. 2.2.3 besitzt als Eingang den zu validierenden Vektor \underline{M} , vgl. Gl.(2/25):

$$\underline{M} = \left\{ \begin{array}{l} \underline{M}_y(k) \\ \underline{M}_y(k-1) \\ \underline{M}_u(k-1) \\ \underline{M}_u(k-2) \\ \underline{x}(k-2) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{zu validierende Ausgangsgrößen} \\ \text{zu validierende Eingangsgrößen} \\ \text{zu validierende Zustandsgrößen} \end{array}$$

Dabei setzen sich seine einzelnen Komponenten für die dynamische Validierung des Dampferzeugers wie folgt zusammen:

$$\text{zu validierende Ausgangsgr.: } \underline{M}_y = \left\{ \begin{array}{l} \vartheta_{Tr} \\ p_{Tr} \\ l_{Tr} \end{array} \right\} \text{ Messgrößen}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{FD} \\ \dot{Q}_{Tr} \end{array} \right\} \text{ indirekt aus Messgrößen berechnet}$$

$$\text{zu validierende Eingangsgr.: } \underline{M}_u = \left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{FD} \\ \dot{m}_E = \dot{m}_{E1} + \dot{m}_{E2} \\ \dot{m}_{Spw} \\ \dot{m}_B \end{array} \right\} \text{ Messgrößen}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_E \\ \dot{Q}_W \end{array} \right\} \text{ indirekt aus Messgrößen berechnet}$$

$$\text{zu validierende Zustandsgr.: } \underline{x} = \left\{ \begin{array}{l} x_1 : h_{FD} \\ x_2 : h_{Tr} \\ x_3 : h_{ECO} \\ x_4 : \text{Brennstoffwärmestrom-Entbindung} \\ x_5 : \text{Trommellevel-Integration} \\ x_6 : \text{Einfluss } p_{Tr} \text{ auf } l_{Tr} \\ x_7 : \text{Einfluss } \dot{Q}_{VDzu} \text{ auf } l_{Tr} \end{array} \right.$$

Die Berechnung der Gewichtungen für die zu validierenden Messgrößen wurde analog zum Kap. 4.3.3 mithilfe der entsprechenden Fehlergrenzen durchgeführt. Die Gewichtungen für die indirekt aus Messgrößen berechneten Ausgangs- und Zustandsgrößen sind aus den bekannten Gewichtungen der Messstellen abgeleitet.

So wird zum Beispiel die Gewichtung $g_{\dot{Q}_{FD}}$ für den indirekt aus Messgrößen berechneten Frischdampf-Wärmestrom \dot{Q}_{FD} aus den bekannten Gewichtungen $g_{\dot{m}_{FD}}$, $g_{p_{FD}}$ und $g_{\vartheta_{FD}}$ wie folgt berechnet:

$$g_{\dot{Q}_{FD}} = \sqrt{g_{\dot{m}_{FD}}^2 + g_{p_{FD}}^2 + g_{\vartheta_{FD}}^2} \quad (6/49).$$

6.6.3 Validierungsergebnisse

Die in den Bildern 6/13–14 dargestellten Signalverläufe beziehen sich auf den Echt-Zeitbereich von 7:20 – 7:30h am 12.04.2002. Um Abweichungen zwischen den Original- und validierten Messverläufen direkt vergleichen zu können, erstrecken sich in allen Teilbildern die Ordinaten über 10% der jeweils bezogen dargestellten Größe.

Im Bild 6/13 sind die Original- und die validierten Messverläufe der Modelleingangsgrößen und im Bild 6/14 der Modellausgangsgrößen veranschaulicht. Die validierten Signalverläufe weisen im betrachteten realem Anwendungsfall nahezu keine Abweichungen gegenüber den Original-Messverläufen auf. Dies spricht für die Qualität der Messwerte sowie für die ausreichende Genauigkeit des dynamischen Prozessmodells, welches der Validierung zugrunde liegt.

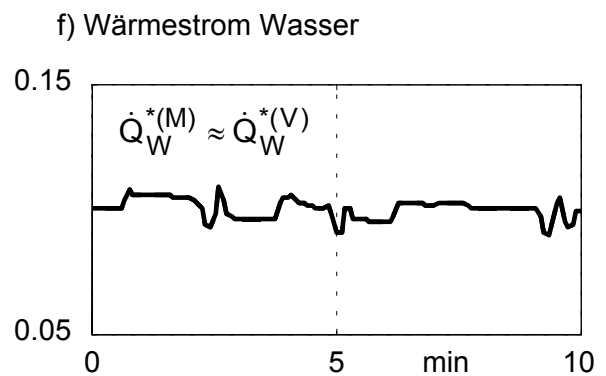
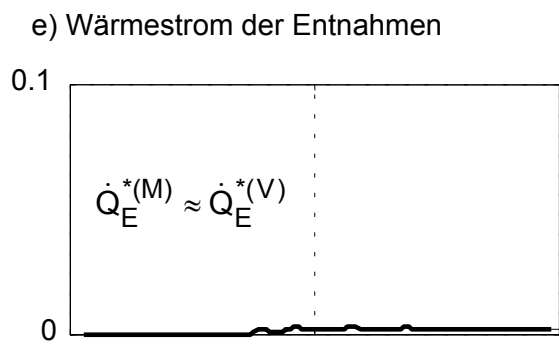
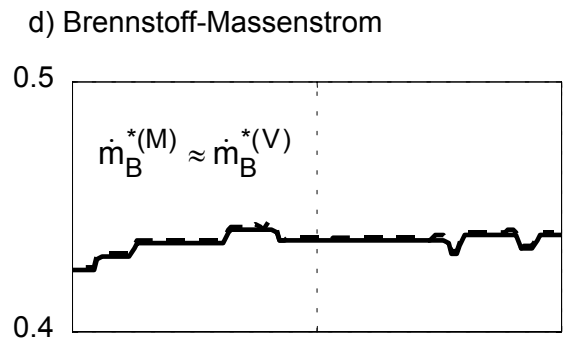
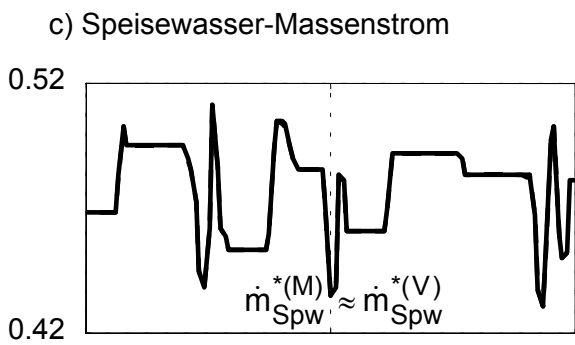
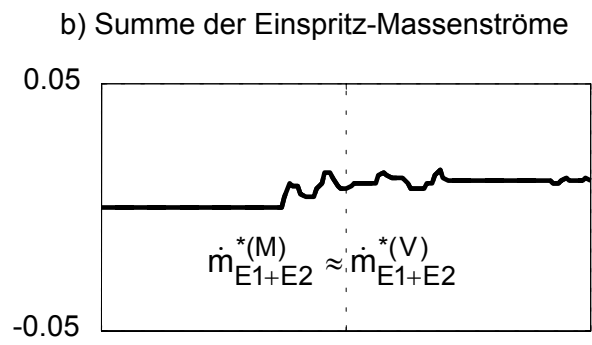
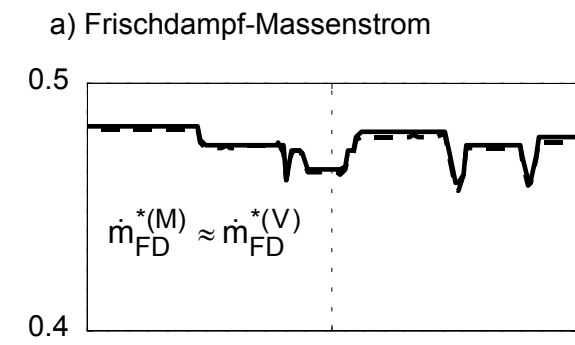


Bild 6/13: Modelleingangsgrößen

⇒ Vergleich von Original- und validierten Messverläufen

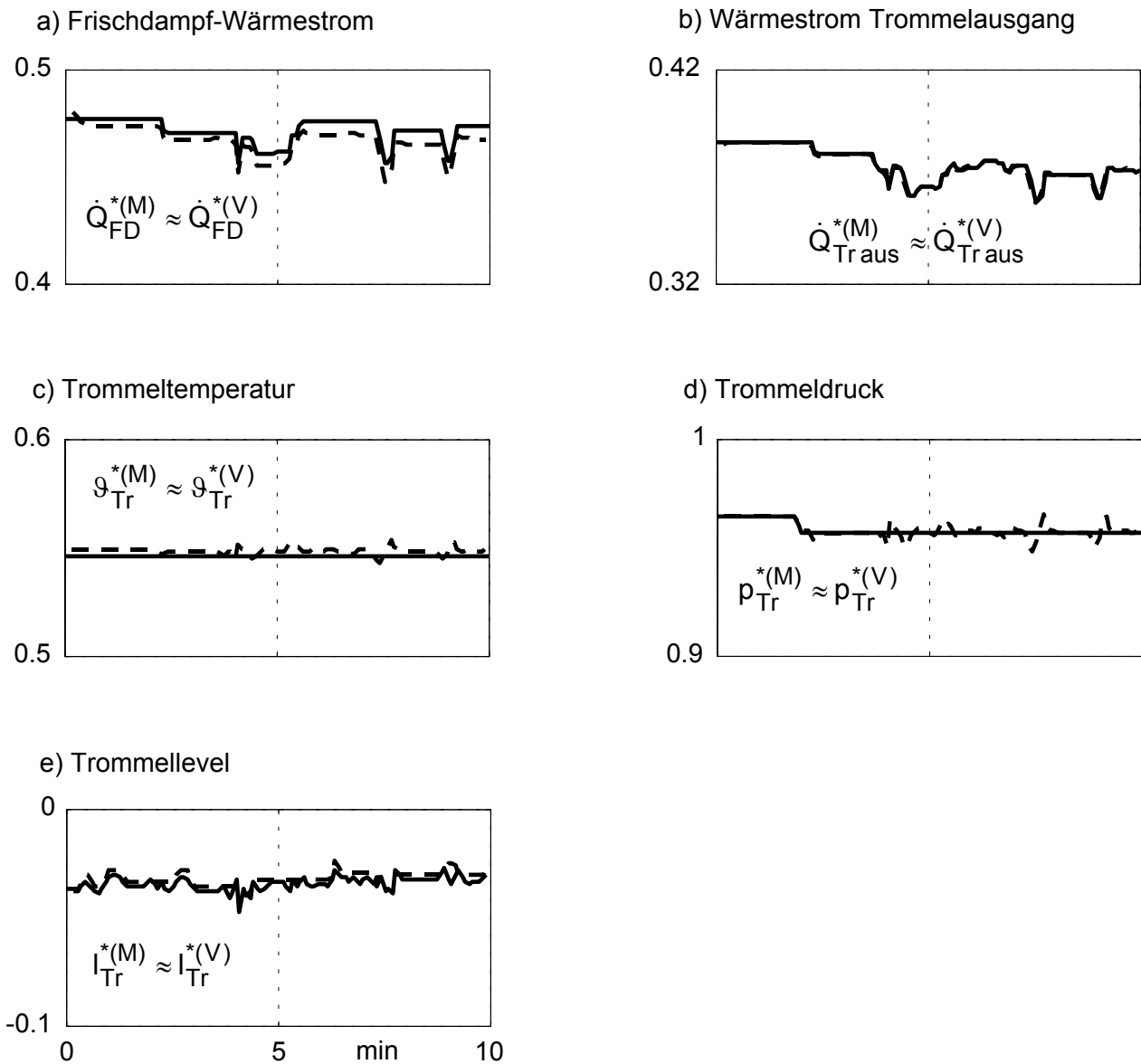


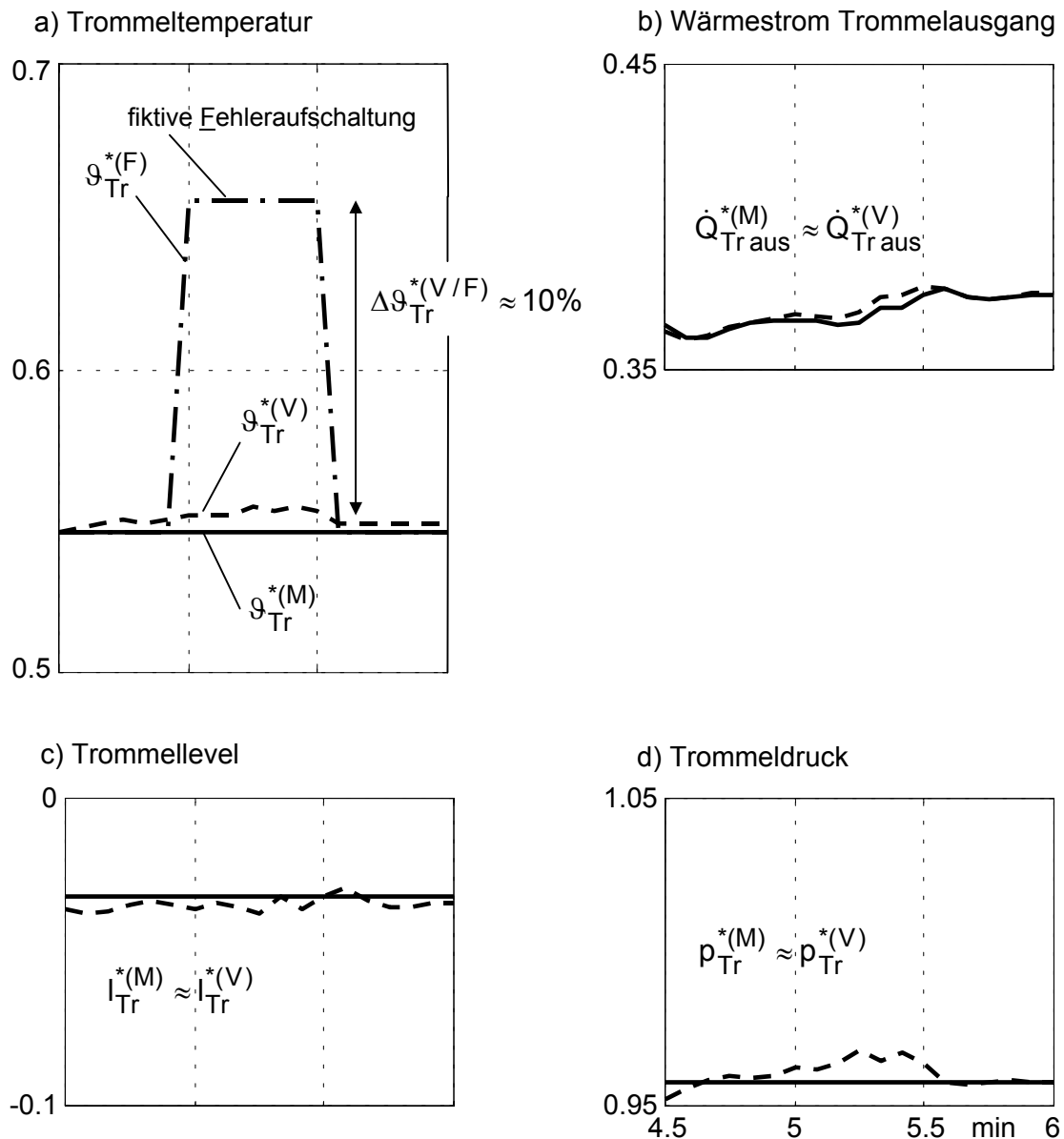
Bild 6/14: Modellausgangsgrößen

⇒ Vergleich von Original- und validierten Messverläufen

Um die Wirksamkeit der dynamischen Validierung zu überprüfen, wird ein künstlicher Messfehler der Trommeltemperatur aufgeschaltet:

$$g_{Tr}^{(F)} = 1,2 \cdot g_{Tr}^{(M)} \quad \text{für } t = 5,0 - 5,5 \text{ min.}$$

Der dynamischen Validierung wird anstelle des Original-Messverlaufes der Trommeltemperatur der fehlerbehaftete $g_{Tr}^{(F)}$ zugeführt. Der Original-, der fehlerbehaftete und der resultierende validierte Messverlauf der Trommeltemperatur ist im Bild 6/15 a dargestellt.



**Bild 6/15: Validierung im Falle einer fiktiven Fehleraufschaltung auf den gemessenen Trommeltemperatur-Verlauf
 ⇒ Wirksamkeit der dynamischen Validierung**

Wie zu erkennen, korrigiert die dynamische Validierung den Messfehler. Zusätzlich sind im Bild 6/15 b–d jene Größen dargestellt, die über das dynamische Modell eng mit der Trommeltemperatur gekoppelt sind. Ihre Original- und validierten Messverläufe unterscheiden sich nur unwesentlich. Somit kann anhand der relativ großen Abweichung ($\Delta\vartheta_{Tr}^{(V/F)} \approx 10\%$) zwischen dem validierten $\vartheta_{Tr}^{(V)}$ und dem fehlerbehafteten $\vartheta_{Tr}^{(F)}$ Messverlauf die „gestörte“ Messstelle identifiziert werden, vgl. Bild 6/15 a.

7 Verbesserung/Überprüfung des Lastprognose-, Bilanzierungs- und Optimierungssystems

Für die tägliche Vorausberechnung der lastabhängigen optimalen Betriebsweise des Heizkraftwerkes der Universität Stuttgart ist ein Lastprognose- Bilanzierungs- und Optimierungs-System entwickelt worden /29/. Dieses LBO-System befindet sich seit mehreren Jahren erfolgreich im Einsatz und soll nun um die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Module „Prozess-Validierung und Parameteridentifikation“ erweitert werden, s. Bild 7/1. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, das der Optimierung zugrundeliegende Bilanzierungsmodell zu überprüfen und im Falle von Veränderungen des Prozessverhaltens – bedingt durch

- Heizflächen-Verschmutzungen,
- Rohrablagerungen,
- Driften von Messwertgebern,
- Alterungserscheinungen,
- etc. –

neu anzupassen.

7.1 Beschreibung des LBO-Systems

Innerhalb des LBO-Systems wird aus den prognostizierten Daten bezüglich der minimalen Außentemperatur $\vartheta_{A_{\min}}^p$ am frühen Morgen und der maximalen Außentemperatur $\vartheta_{A_{\max}}^p$ am Mittag des jeweils bevorstehenden Tages der erwartete Soll-Tagestemperaturverlauf $\vartheta_{A(\tau)}^{pLBO}$ ermittelt, vgl. Bild 7/1. Die daran anschließende Lastprognose berechnet – aus dem oben beschriebenen prognostizierten Tagestemperaturverlauf $\vartheta_{A(\tau)}^{pLBO}$ und typischen gemittelten Lastgang-Messverläufen $\bar{P}_{V(\tau-d)}^{(M)}$, $\bar{Q}_{V(\tau-d)}^{(M)}$ zurückliegender Tage „d“ – den innerhalb des Versorgungsgebietes tageszeitabhängigen Gesamtverbrauch an elektrischer Leistung $P_{V(\tau)}^{pLBO}$ sowie Wärmeleistung $\dot{Q}_{V(\tau)}^{pLBO}$, und dies abhängig vom jeweiligen Nutzungsgrad des

Universitätsgeländes, wie z. B. Vorlesungs-/Vorlesungsfreiem Betrieb bzw. an Werk-/Wochenendtagen.

Die Tageseinsatzoptimierung ermittelt aus den Lastprognosen mithilfe des Bilanzierungssystems den kostengünstigsten Blockeinsatzplan. Innerhalb des Bilanzierungssystems werden die Betriebsbereiche der verschiedenen Entnahme-Kondensations-Blöcke anhand von P \dot{Q} -Diagrammen vorgegeben und die für die möglichen Einsatzpunkte resultierenden Betriebskosten berechnet. Das überlagerte Optimierungssystem berücksichtigt bei der Berechnung des optimalen Einsatzes der einzelnen Kraftwerksblöcke zudem die Möglichkeit, dass auch elektrische Leistung aus dem Verbundnetz bezogen bzw. dorthin exportiert werden kann. Das Ergebnis der Tageseinsatzoptimierung sind die für jede Stunde τ der tageszeitabhängigen Lastgänge ermittelten optimalen elektrischen Sollleistungen $\underline{P}_{GSoll}^{LBO}(\tau)$ und Wärme-Sollleistungen $\underline{\dot{Q}}_{HSoll}^{LBO}(\tau)$ der einzelnen Kraftwerksblöcke, sowie die jeweilige Soll-Bezugs- bzw. Exportleistung, Einzelheiten s. /29-30/.

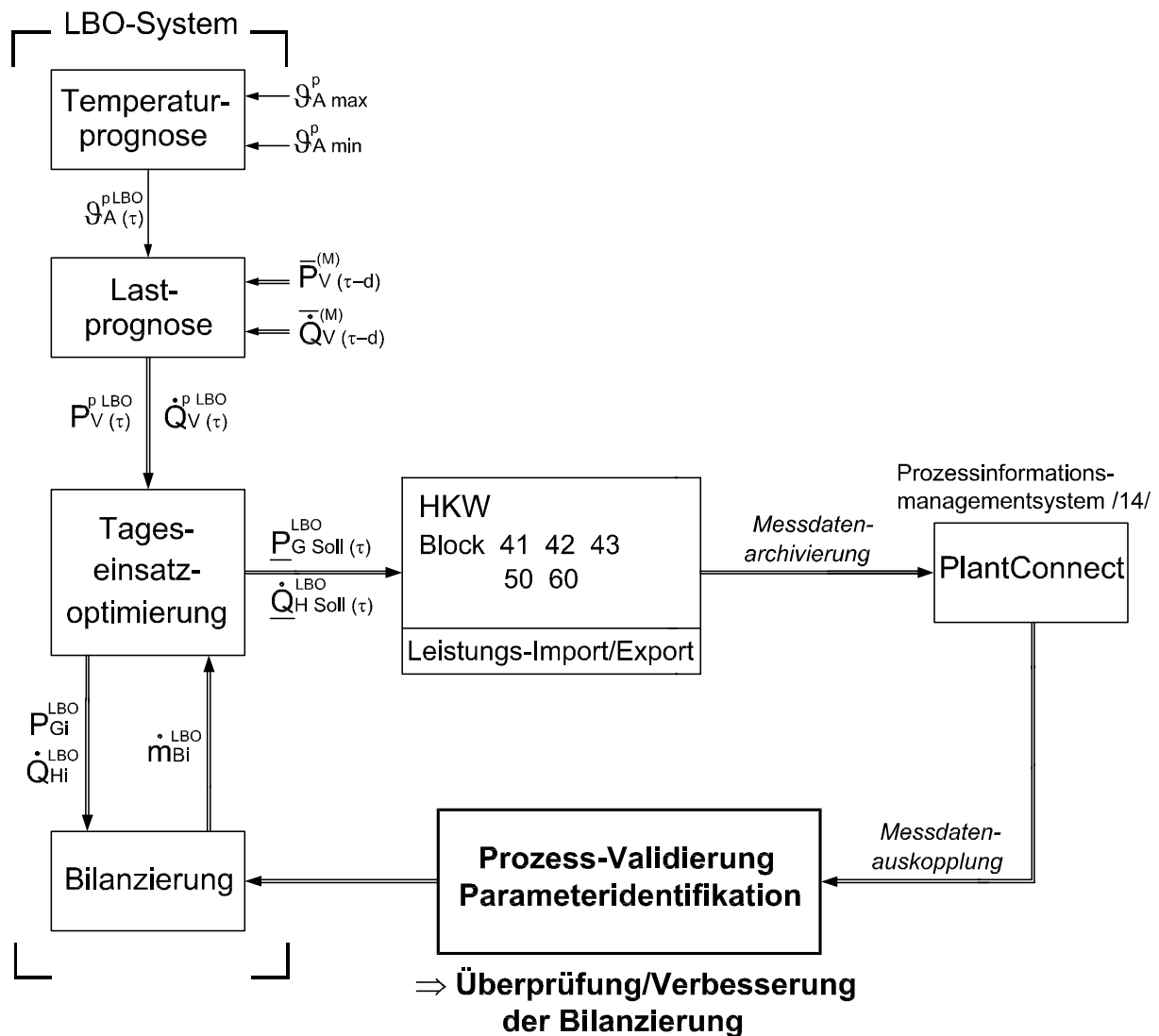


Bild 7/1: Einsatz des LBO-Systems im Heizkraftwerk

Im Bild 7/2 ist die Vernetzung des in der HKW-Warte installierten aktiven LBO-Systems sowie des redundant eingesetzten LBO-Systems mit der bereits in Kapitel 3 beschriebenen Messdatenerfassung mittels des Leittechniksystems *Contronic P* dargestellt. An der Entwicklungsumgebung des redundanten LBO-Systems (*PC 4*) am sogenannten Wartennebenplatz, hier ca. 1km entfernt innerhalb der Abteilung S/A, werden die durch die Validierung, Parameteridentifikation und Langzeitauswertung gewonnenen Erkenntnisse implementiert und getestet. Nach gegebenenfalls erfolgter Modifikation der Bilanzierung kann die adaptierte Version des Test-LBO-Systems auf die für das Betriebspersonal vorgesehene Arbeitsumgebung des aktiven LBO-Systems (*PC 3*) übertragen werden.

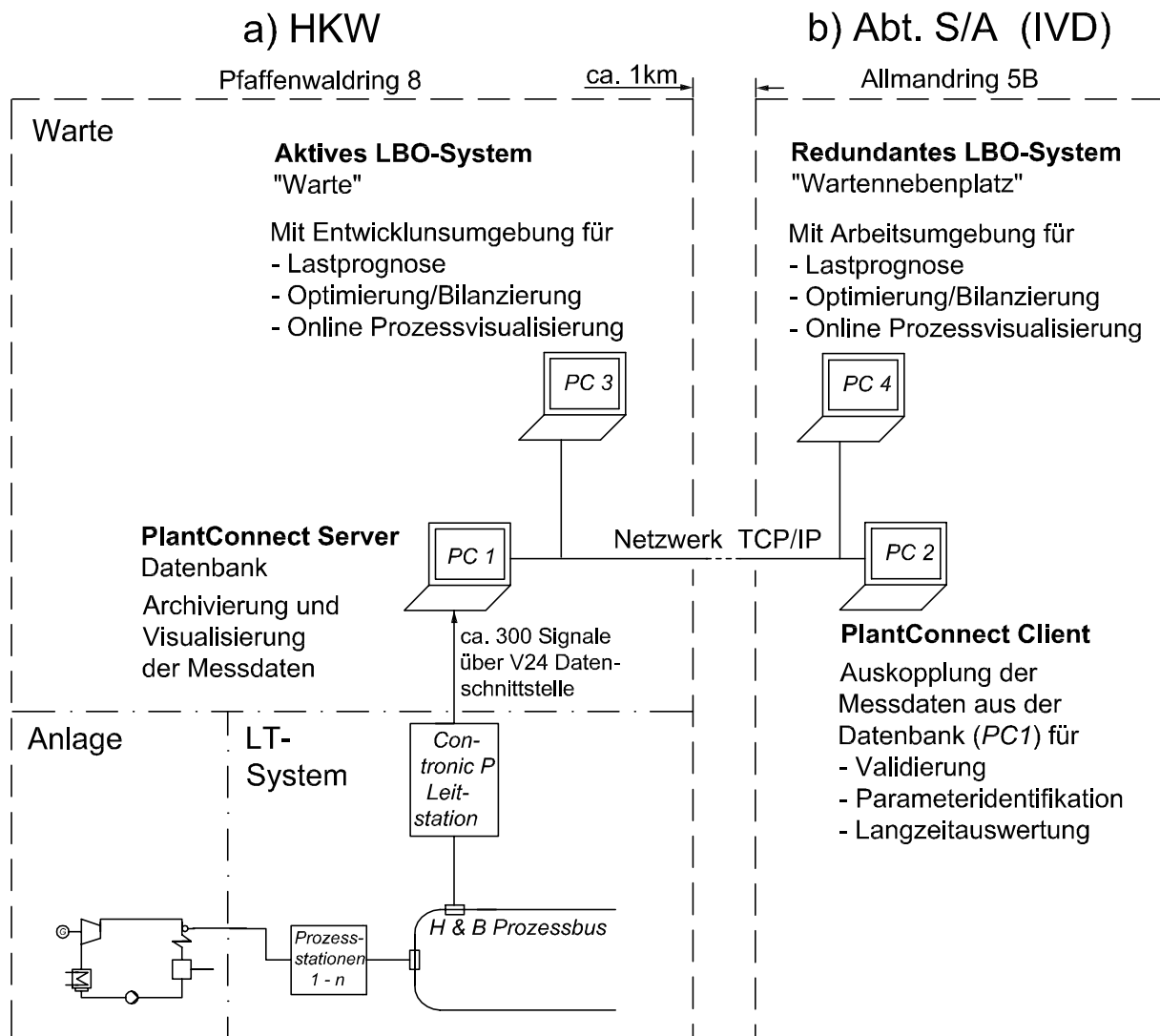


Bild 7/2: Vernetzung von aktivem und redundantem LBO-System mit dem Leittechnik-System Con- tronic P

7.2 Auswirkungen der Prozess-Validierung auf das LBO-System

Die vom LBO-System prognostizierte Wärmelast stützt sich außer auf den prognostizierten Außentemperaturverlauf $\vartheta_{A(\tau)}^{pLBO}$ auf typische Wärmelastverläufe $\dot{Q}_{V(\tau-d)}^{(M)}$ vergangener Tage. Die Untersuchung mehrerer derartiger Messdatensätze, die an verschiedenen Tagen erfasst wurden, ergab stets einen höheren Gesamt-Wärmestrom $\overline{\dot{Q}}_{Hn}^{(M)}$ an der Messstelle „HKW-Ausgang/Heiznetz-Eingang“ gegenüber der Summe der von den einzelnen Blöcken ausgekoppelten Wärmeströme $\sum \overline{\dot{Q}}_{Hi}^{(M)}$,

vgl. Tabelle 4/3. Aufgrund der durch die Messungenauigkeiten falsch prognostizierten Wärmelast werden in Grenzfällen, bei denen der Einsatz von i Blöcken gerade zur Deckung der Wärmelast ausreichen würde, vom LBO-System $i+1$ Blöcke eingesetzt. Dies bedeutet einen Mehraufwand an Kosten, wie nachfolgend beispielhaft an einem leicht überschaubaren Fall gezeigt wird.

In Tabelle 7/1 ist ein solcher Grenzfall dargestellt. Im Fall a beträgt die Wärmelast-Prognose $Q_V^{pLBO} = 564$ MWh. Dieser Wert entspricht dem Tagesverbrauch an einem Wintertag zur Vorlesungszeit mit den Außentemperaturwerten $\vartheta_{Amax}^p = 12^\circ\text{C}$ und $\vartheta_{Amin}^p = -2^\circ\text{C}$. Zur Deckung der Wärmelast muss zusätzlich zu Block 50 in den frühen Morgenstunden Block 60 eingesetzt werden.

Bei einer in praxi um 5% verminderten Wärmelast und gleicher elektrischer Last wird nur Block 50 zur Wärmezeugung eingesetzt, s. Fall b. Dies führt im Fall b zu Kosteneinsparungen von über 1000 €/d, und zwar vorwiegend dadurch, dass die in Fall a zusätzlich auftretenden An- und Abfahrkosten für Block 60 entfallen.

Fall	Q_V^{pLBO} [MWh]	Blockeinsatzplan				
		41	42	43	50	60
a	564 (100%)				X	X
b	536 (95%)				X	

Tabelle 7/1: Blockeinsatzplan bei veränderter Wärmelast

7.3 Verbesserung der Bilanzierung durch Parameteridentifikation

Die Erkenntnisse der in dieser Arbeit in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Prozessvalidierung und Parameteridentifikation können für das LBO-System genutzt werden. Im Folgenden werden am Beispiel des in Abschnitt 5.2 mithilfe der Validierung identifizierten Turbine/Generator-Gesamtwirkungsgrades η_{TG} die Auswirkungen auf die Bilanzierung aufgezeigt.

Der im LBO-System bisher einheitlich vorgegebene Turbine/Generator-Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{TG}^{LBO} = 92\%$ des Blockes 50 wird durch den aktuellen Wert von $\eta_{TG}^V = 88\%$ ersetzt, welcher per Validierung an mehreren Datensätzen identifiziert wurde. Die dadurch bedingten Unterschiede bei der Betriebskostenberechnung des LBO-Systems und die möglichen Auswirkungen auf den per Optimierung ermittelten Blockeinsatzplan werden im Folgendem beispielhaft an einem leicht überschaubaren Fall erläutert.

Aufgrund des niedrigeren Turbine/Generator-Gesamtwirkungsgrad bei Block 50 $\Delta\eta_{TG}$ um 4% entstehen höhere Betriebskosten ΔK_B^* von 1,25%, vgl. Tabelle 7/2.

Der zugrundegelegte Lastfall entspricht dem Fall b aus Tabelle 7/1.

In Grenzfällen, bei denen aufgrund der höheren Betriebskosten für Block 50 der vom LBO-System ermittelte Blockeinsatzplan anstelle des tatsächlich teureren Blockes 50 nun die kostengünstigeren Blöcke 41, 42 und/oder 43 vorsieht, können Kosten von bis zu 1,25 % eingespart werden.

Turbine/Generator-Gesamtwirkungsgrad Block 50	Betriebskosten Block 50
$\eta_{TG}^{LBO} = 92\%$	$K_B^{*LBO} = 100\%$
$\eta_{TG}^V = 88\%$	$K_B^{*V} = 101,25\%$
$\Delta\eta_{TG} = 4\%$	$\Delta K_B^* = 1,25\%$

Tabelle 7/2: Auswirkungen von Unschärfen bzgl. des Turbine/Generator-Gesamtwirkungsgrades auf den Blockeinsatz und damit auf die Betriebskosten

8 Zusammenfassung

Für die Validierung transienter Prozessverläufe sind zwei Methoden, nämlich die „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ und die „Dynamische Validierung“ entwickelt und erprobt worden, s. Kap. 2. Der anhand einfacher Beispielfälle durchgeführte Vergleich zwischen den beiden neu entwickelten dynamischen Validierungs-Algorithmen und den bisherigen stationären Validierungs-Algorithmen zeigt die Notwendigkeit einer dynamischen Validierung bei transienten Prozessverläufen.

Die praktische Anwendung der beiden neu entwickelten dynamischen Validierungsmethoden ist an transienten Prozessverläufen des Heizkraftwerkes Stuttgart-Vaihingen durchgeführt worden, und zwar abschnittsweise für die Prozessbereiche „HKW-Ausgang/Heiznetz“, „Turbine/Heizkondensatoren“ sowie „Dampferzeuger“. Dabei ist generell wie folgt vorgegangen worden:

- Dynamische Modellbildung und Parameteridentifikation der zu validierenden Prozessbereiche. Die derart erstellten dynamischen Modellgleichungen sind bei der dynamischen Validierung in Form von Nebenbedingungen zu erfüllen.
- Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für die einzelnen zu validierenden Messgrößen, und zwar durch Bezug auf die je Messkette resultierenden Ungenauigkeiten, bzgl. Messwertgeber, Umformer und Übertragungseinrichtung, vgl. Kap. 4.3.3.
- Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die Nebenbedingungen. Um die Konsistenz in den Nebenbedingungen in hohem Maße zu gewährleisten, wurden diese wesentlich stärker gewichtet als die jeweiligen Messgrößen.

Bezüglich der Messdatenvalidierung der einzelnen Prozessbereiche ist wie folgt vorgegangen worden.

Die dynamische Validierung im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“ ist nach der Methode „Validierung nach Elimination der Prozessdynamik“ durchgeführt worden, vgl. Kap. 4. Dabei ist die Laufzeit des strömenden Heizwassers im Vorlaufzweig zwischen den Wärmestrom-Messstellen „HKW-Ausgang“ und „Heiznetz“ iterativ ermittelt worden. Anhand des Vergleiches zwischen dynamisch und stationär

validierten Messverläufen ist die Notwendigkeit der dynamischen Validierung bei diesem Prozessbereich deutlich zu ersehen.

Das Modell des Prozessbereiches „Turbine/Heizkondensatoren“ von Block 50 ist mit dem dynamischen Modell des Prozessbereiches „HKW-Ausgang/Heiznetz“ aus Kapitel 4 gekoppelt worden. Die Gesamtvalidierung beider Bereiche ermöglicht

- die Erzeugung validierter Messverläufe, welche Konsistenz bezüglich der Modellgleichungen aufweisen, sowie
- die Berechnung messtechnisch nicht erfasster Prozessgrößen wie Entnahme-Massenströme, Turbinen-Teilleistungen und
- die Identifizierung von Parametern wie z.B. von Wirkungsgraden und Grädigkeiten.

Die Modellbildung des Naturumlauf-Dampferzeugers von Block 50 ist mithilfe der bilinearen Betrachtungsweise unter Berücksichtigung der wesentlichen dynamisch wirksamen Wärmespeicher durchgeführt worden, s. Kap. 6. Dabei lässt die bilineare Betrachtung die multiplikative Verknüpfung von Modell-Eingangsgößen zu, wie im vorliegenden Fall von Massenströmen und Enthalpien. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Signalverläufen zeigt eine gute Übereinstimmung von realem und modelliertem Anlagenverhalten, was für die spätere dynamische Validierung von entscheidender Bedeutung ist. Bei der Berechnung des Trommellevels konnte durch zusätzliche Berücksichtigung der Abhängigkeit vom Trommeldruck und zugeführtem Wärmestrom eine weitere Verbesserung erzielt werden.

Die Methode der „Dynamischen Validierung“ konnte erfolgreich auf diesen Prozessbereich angewendet werden und ermöglicht durch die Erkennung großer Unterschiede zwischen dynamisch validierten und Original-Messverläufen die Identifizierung gestörter Messverläufe bzw. ungenauer Messstellen.

Abschließend sind die Auswirkungen der durchgeführten Validierungen und Parameteridentifikationen auf das in /29/ entwickelte und im Heizkraftwerk eingesetzte Lastprognose-, Bilanzierungs- und Optimierungssystem untersucht worden. Anhand leicht überschaubarer Fallbeispiele ist aufgezeigt worden, wie sich Bilanzierungsungenauigkeiten ungünstig auf den optimalen Blockeinsatz auswirken

können und wie mittels dynamischer Validierung erhöhte Betriebskosten vermieden werden können.

9 Literaturverzeichnis

- /1/ *Welfonder E.*: **“Nahtloser Übergang von der Prozeßführung zur Betriebsführung, von Leittechnik- zu Betriebsführungssystemen”**, VGB Kraftwerks Technik, Ausgabe 11, 1998, (S. 65-76).
- /2/ *VDI-Richtlinie 2048*: **“Meßunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen”**, Okt. 2000.
- /3/ *Streit, S.*: **“Meßunsicherheiten und Verträglichkeitsprüfungen: Beispiele und Vergleich mit herkömmlichen Verfahren”**, VDI Berichte, Nr. 1210, 1998, S. 79-104.
- /4/ *Reins G.*: **“Was ist und was leistet Validierung”**, Brennstoff Wärme Kraft, Nr. 10 , 1995, S. 412-415.
- /5/ *Reins G.*: **“Datenvalidierung erhöht die Qualität der Prozeßdaten”**, Brennstoff Wärme Kraft, Nr. 7/8 , 1997, S. 50-51.
- /6/ *Grauf E., M.Langenstein*: **“Datenvalidierung als Instrument zur Effizienzsteigerung in Kernkraftwerken (KKW)”**, VDI Berichte, Nr. 1451, 1998, S. 121-139.
- /7/ *Braun H.-H., K.Eckwert, G.Reins*: **“Validierung nutzt Reserven im Industriekraftwerk”**, Brennstoff Wärme Kraft, Nr. 7/8 , 1993, S. 359-361.
- /8/ *Hainmann M.*: **“Online-Datenvalidierung im Kraftwerk - Erforderlicher Aufwand und betrieblicher Nutzen”**, VDI Berichte, Nr. 1451, 1998, S. 63-71.
- /9/ *Brockmeier, U.*: **“Validierung von Prozeßdaten in Kraftwerken”**, VGB KraftwerksTechnik, Ausgabe 9, 1999.
- /10/ *Tenner J., P.Klaus, E.Schulze*: **“Erfahrungen bei der Erstellung und dem Einsatz eines Datenvalidierungsmodells zur Prozeß-Überwachung und Optimierung im Kernkraftwerk Isar 2”**, VGB KraftwerksTechnik, Ausgabe 4, 1998, (S 43-49).
- /11/ *Laipple B., K.Pitscheider, E.Welfonder*: **“Implementierung und Test eines Validierungsalgorithmus für energietechnische Prozesse”**, Interner Bericht Universität Stuttgart, IVD Abt. S/A, 1998.
- /12/ *Welfonder E.*: **“Diskrete Regelsysteme”**, Vorlesung an der Universität Stuttgart.
- /13/ *Welfonder E., P.Kocher, K.Wendelberger*: **„Mathematische Verfahren zur systemdynamischen Behandlung von Echtzeit-Simulationssystemen“**, Kompakt-Kurs Universität Stuttgart, 1991.
- /14/ *Hartmann & Braun*: **„Benutzerhandbuch Prozess-Informationsmanagement-system PlantConnent“**, 1998.

- /15/ VGB Richtlinie 123 C/1.9: „**Messanordnungen und Messeinrichtungen von Prozessmessgrößen**“, 1998.
- /16/ Menny K.: „**Strömungsmaschinen**“, 3.Auflage, Teubner Verlag, 2000.
- /17/ Wendelberger K.: „**Entwicklung eines Verfahrens zur schnellen Berechnung von Kreislaufprozessen**“, Dissertation Universität Stuttgart, 1998.
- /18/ Eitschenberger H.: „**Abnahmemessung von Niederdruckturbinen in einem 1000 MW Kraftwerk mit Hilfe von validierten Prozeßdaten**“, Bericht KKW Leibstadt (Schweiz).
- /19/ Dettinger R.: „**Entwurf einer optimalen Regelung für komplizierte Mehrgrößensysteme und Erprobung am Beispiel eines Dampferzeugers**“, Dissertation Universität Stuttgart, 1976.
- /20/ Doležal R.: „**Dampferzeugung – Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger**“, Springer-Verlag, 1985.
- /21/ Klefenz G.: „**Automatic Control of Steam Power Plants**“, Bibliographisches Institut Zürich, Wissenschaftsverlag, 1986.
- /22/ Schwarz H.: „**Nichtlineare Regelungssysteme: Systemtheoretische Grundlagen**“, Oldenbourg Verlag, 1991.
- /23/ Isermann R.: „**Identifikation dynamischer Systeme**“, Band 1, Springer-Verlag, 1988.
- /24/ Dentler A.: „**Lehrpfad durch das HKW Pfaffenwald der Universität Stuttgart**“, Studienarbeit am IVD, Universität Stuttgart, 1975.
- /25/ Stephan K., F.Mayingen: „**Thermodynamik 1, Einstoffsysteme**“, Springer-Verlag, 14. Auflage, 1992.
- /26/ Welfonder E.: „**Regelung von Kraftwerken und Netzen**“, Vorlesung an der Universität Stuttgart.
- /27/ Welfonder E., P.Kocher: „**Nonlinear Dynamic Models for the Power Behaviour of Nuclear Power Plants**“, 9th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation. 8-12 July, 1991, Budapest, Hungary.
- /28/ VDI-Richtlinie 3502: „**Trommelwasserstands-Regelung in konventionellen Dampfkraftwerken**“, September 1996.
- /29/ Welfonder E., P.Hönig, B.Meerbeek, R.Neifer, K.Pitscheider: „**Online-Minimierung von Kraft-Wärme-Anlagen**“, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Interner Bericht Universität Stuttgart, IVD Abt. S/A, 1997.

- /30/ *Hönig P.*: „**Mehrstufiges Vefahren zur Tagedeinsatzoptimierung großer kraft-wärme-gekoppelter Energieversorgungssysteme**“, Dissertation Universität Stuttgart, 2000.
- /31/ *VGB Richtlinie 123 C/1.6*: „**Temperaturmessungen mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern; Einsatzkriterien und Fehlergrenzen-ermittlung**“, 1989.
- /32/ *Mannesmann / Hartmann&Braun*: „**Messumformer AVA 500 für Durchfluss, Gebrauchsanweisung 41/15-1242-6**“.
- /33/ *Danfoss*: „**SONOFLO data sheet, Ultrasonic flowmeters, Sensortype SONO 3300, DIN 25 – DN 4000**“.
- /34/ *Bronstein I.*: „**Taschenbuch der Mathematik**“, Verlag Harri Deutsch, 1993.

10 Anhang

A1	Iterative Laufzeitberechnung	106
A1.1	Übergang zu diskreten Messwerten	106
A1.2	Berücksichtigung von zurückliegenden Massenstromänderungen	107
A2	Ermittlung der Fehlergrenzen	110
A2.1	Temperaturmessstellen	110
A2.2	Massenstrommessstellen	110
A2.3	Wärmeströme	111
A3	Zusammenstellung der Messstellen-Kenngrößen im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“	112
A4	Abhängigkeit des Trommelwasser-Volumens vom Trommellevel	114
A5	Flussdiagramm zur Parameteradaption	115

A1 Iterative Laufzeitberechnung

⇒ Anhang zu Kapitel 4.2

A1.1 Übergang zu diskreten Messwerten

Die Messungen erfolgen zu diskreten Zeitpunkten k:

Zeitpunkt	Messgr. X_1	...	Messgr. X_n
\vdots	\vdots		\vdots
t_{k-1}	1.0		1.0
t_k	2.0		1.0
t_{k+1}	2.0		2.0
\vdots	\vdots		\vdots

Messwertsatz zum Zeitpunkt t_{k-1}

Messwert $X_n(t_k)$
Kurzschreibweise: X_{nk}

Bild A1/1: Diskrete Messwerte

Damit geht die subkontinuierliche Gleichung

$$T_{\text{Lauf}}(t) = \frac{m}{\dot{m}(t)} \quad (\text{A1/1})$$

für die Berechnung der massenstromabhängigen Laufzeit über in die zeitdiskrete Beziehung:

$$T_{\text{Lauf}_k} = \frac{m}{\dot{m}_k} \quad (\text{A1/2}).$$

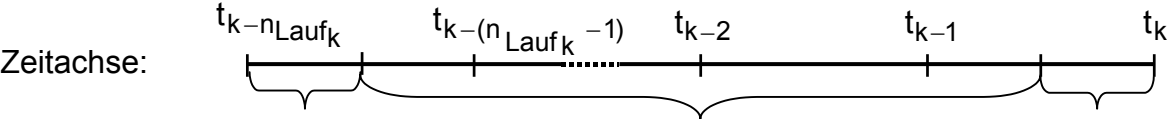
Da der zeitliche Abstand T zwischen zwei Messwertsätzen konstant ist, kann aus der Laufzeit T_{Lauf_k} bei ganzzahliger Rundung auf die entsprechende Anzahl von Messwerten n_{Lauf_k} geschlossen werden:

$$n_{\text{Lauf}_k} = \text{round}\left(\frac{T_{\text{Lauf}_k}}{T}\right) \quad (\text{A1/3})$$

A1.2 Berücksichtigung von zurückliegenden Massenstromänderungen

Die Gleichung (A1/2) gilt im Falle eines konstanten Massenstroms. Zeitlich relevante zurückliegende Massenstromänderungen müssen aber bei der Berechnung der Laufzeit berücksichtigt werden. Dies erfolgt iterativ.

Als Startwert der Iteration wird der zeitliche Versatz n_{Lauf_k} zuerst gemäß Gleichung (A1/3) ausschließlich in Abhängigkeit vom Massenstrom des k -ten Messwertsatzes \dot{m}_k gebildet. Mithilfe dieser Startlösung für n_{Lauf_k} kann nun der tatsächliche Durchschnittliche Massenstrom $\dot{m}_{\text{DS}}(n_{\text{Lauf}_k})$ in dem zurückliegenden Zeitintervall $[t_{k-n_{\text{Lauf}_k}}, t_k]$ berechnet werden:



$$\dot{m}_{\text{DS}}(n_{\text{Lauf}_k}) = \frac{1}{n_{\text{Lauf}_k}} \left(\frac{\dot{m}_{k-n_{\text{Lauf}_k}}}{2} + \sum_{i=1}^{n_{\text{Lauf}_k}-1} \dot{m}_{k-i} + \frac{\dot{m}_k}{2} \right) \quad (\text{A1/4})$$

Bild A1/2: Berechnung des Durchschnittlichen Massenstroms

Eine zeitlich zurückliegende eventuelle Massenstromänderung ist im Durchschnittsmassenstrom $\dot{m}_{\text{DS}}(n_{\text{Lauf}_k})$ enthalten. Mit ihm kann wie folgt eine neue Messwertsatzdifferenz $n_{\text{Lauf}_{2k}}$ berechnet werden:

$$T_{\text{Lauf}_{2k}} = \frac{m}{\dot{m}_{\text{DS}}(n_{\text{Lauf}_k})} \quad (\text{A1/5})$$

$$n_{\text{Lauf}_{2k}} = \text{round}\left(\frac{T_{\text{Lauf}_{2k}}}{T}\right) \quad (\text{A1/6})$$

Der Iterationsablauf ist im Bild A1/3 anhand eines Flussdiagramms veranschaulicht. Dabei gilt:

- a) Mit der Annahme dass keine zeitlich zurückliegende Massenstromänderung vorliegt, ist der Durchschnittsmassenstrom $\dot{m}_{DS}(n_{\text{Lauf}_k})$ gleich dem Massenstrom des k-ten Messwertsatzes \dot{m}_k . Die mithilfe des Durchschnittsmassenstrom $\dot{m}_{DS}(n_{\text{Lauf}_k})$ berechnete Messwertsatzdifferenz n_{Lauf_2k} ist somit gleich n_{Lauf_k} . Die Berechnung der Messwertsatzdifferenz n_{Lauf_k} ist abgeschlossen.
- b) Im Falle dass in der zeitlich relevanten Vergangenheit eine Massenstrom-Abnahme/Zunahme vorliegt, ist der Durchschnittsmassenstrom $\dot{m}_{DS}(n_{\text{Lauf}_k})$ größer/kleiner als der Massenstrom \dot{m}_k . Die mithilfe des Durchschnittsmassenstroms $\dot{m}_{DS}(n_{\text{Lauf}_k})$ berechnete Messwertsatzdifferenz n_{Lauf_2k} ist kleiner/größer als n_{Lauf_k} . Die Messwertsatzdifferenz n_{Lauf_k} muss somit erniedrigt/erhöht werden. Eine Wiederholung der Berechnung ab Gleichung (A1/6) ist notwendig, bis ein zutreffendes n_{Lauf_k} gefunden wird, das identisch ist mit dem anschließend berechneten n_{Lauf_2k} .

Ein verklemmen des Iterationsalgorithmus innerhalb von b) wird durch entsprechendes setzen von Hilfsvariablen verhindert.

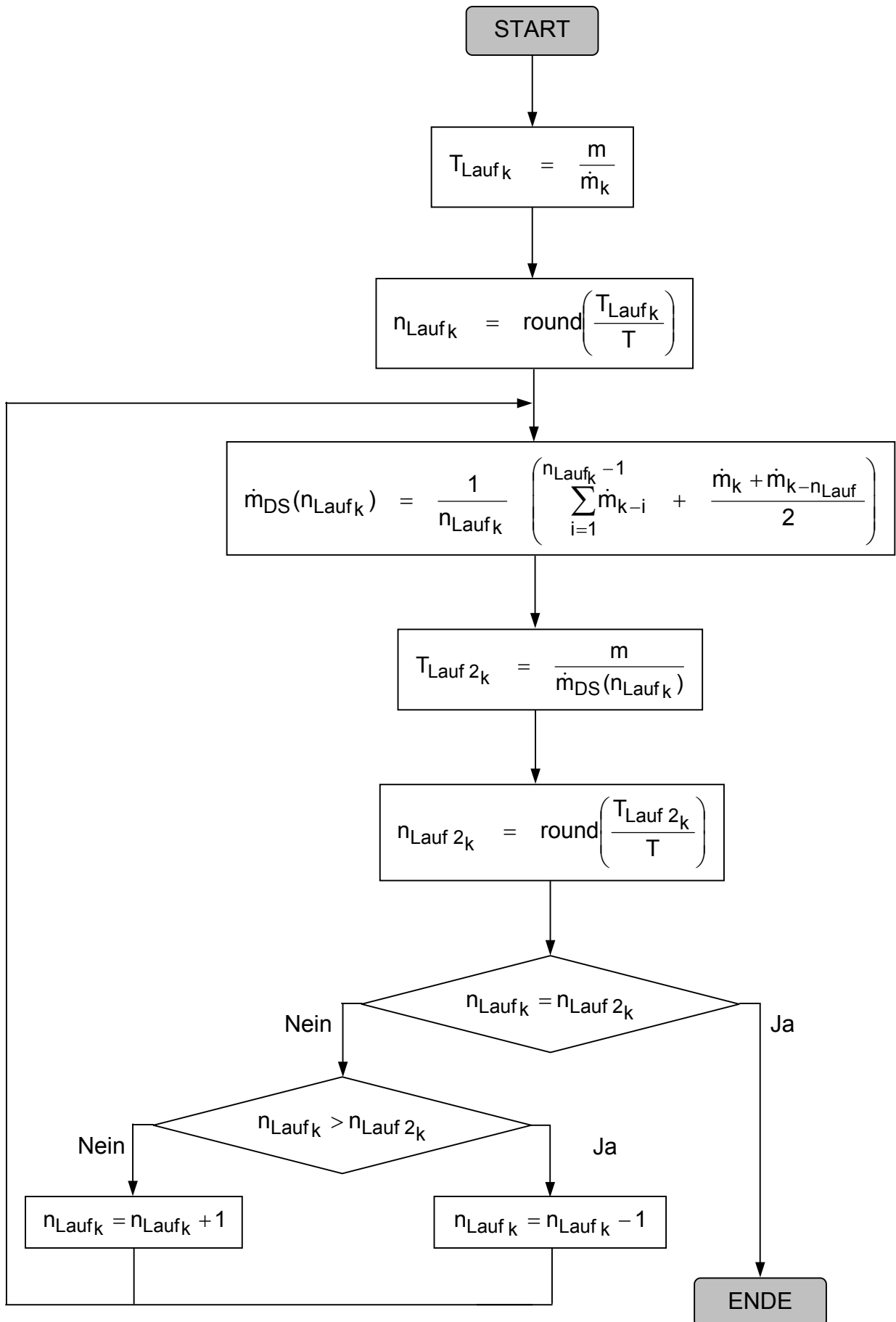


Bild A1/3: Flussdiagramm zur iterativen Laufzeitberechnung T_{Lauf}

A2 Ermittlung der Fehlergrenzen

⇒ Anhang zu Kapitel 4.3.3

A2.1 Temperaturmessstellen

Die Temperaturmessungen im Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen erfolgen mittels Widerstandstemperturgebern PT100 der Klasse A (4-Leiterschaltung) und der Klasse B (2-Leiterschaltungen).

Die Berechnung der Grenzabweichung ist abhängig vom jeweiligen Messwert ϑ_{ist} .

Mit der Annahme $\vartheta_{\text{ist}} = \vartheta_0 = 100 \text{ °C}$ ergibt sich nach DIN IEC 751, s. /31/:

Klasse A: $\Delta\vartheta_A = 0,15 + 0,002 \cdot \vartheta_{\text{ist}} = 0,35 \text{ °C} \Rightarrow 0,23 \text{ %}$ vom jeweiligen Messbereich

Klasse B: $\Delta\vartheta_B = 0,3 + 0,005 \cdot \vartheta_{\text{ist}} = 0,8 \text{ °C} \Rightarrow 0,53 \text{ %}$ vom jeweiligen Messbereich.

Die Fehlergrenze der verwendeten Leittechnikerkfassungskarte PEA07 beträgt 0.03% vom Messbereich. Bei der Klasse B wird noch ein Messumformer mit der Fehlergrenze von 0,5% v.M. benötigt. Somit berechnet sich die gesamte Fehlergrenze der Messkette lt. /31/ wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Klasse A: } \Delta x_{Fg\vartheta_A\text{ges}} &= \sqrt{\Delta x_{Fg\vartheta_A}^2 + \Delta x_{FgPEA07}^2} \\ &= \sqrt{0,23\%^2 + 0,03\%^2} \approx 0,23\% \text{ v.M.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Klasse B: } \Delta x_{Fg\vartheta_B\text{ges}} &= \sqrt{\Delta x_{Fgl\vartheta_B}^2 + \Delta x_{FgPEA07}^2 + \Delta x_{FgMu}^2} \\ &= \sqrt{0,53\%^2 + 0,03\%^2 + 0,5\%^2} \approx 0,73\% \text{ v.M.} \end{aligned}$$

A2.2 Massenstrommessstellen

Im Heizkraftwerk Stuttgart-Vaihingen werden für Massenstrommessungen die Durchfluss-Messumformer AVA 500 eingesetzt /32/. Der Gerätehersteller Schoppe &

Faeser¹ gibt für diesen Typ eine Fehlergrenze von 0,6% v.M. an. Die verwendeten Leittechnikerkfassungskarten PEA01 bzw. PEA02 besitzen eine Fehlergrenze von 0,25% v.M. Daraus ergibt sich die gesamte Fehlergrenze der Messkette zu:

$$\Delta x_{Fg\dot{m}_{ges}} = \sqrt{\Delta x_{Fg\dot{m}}^2 + \Delta x_{FgPEA01/2}^2} = \sqrt{0,6\%^2 + 0,25\%^2} = 0,65\% \text{ v.M.}$$

A2.3 Wärmeströme

Ein Wärmestrom wird im Leittechniksystem aus zwei Temperaturmessungen und einer Massenstrommessung berechnet. Somit ergeben sich für die zwei unterschiedlichen Klassen der Temperaturmessstellen auch zwei unterschiedliche Wärmestrom-Fehlergrenzen:

$$\Delta x_{Fg\dot{Q}_A} = \sqrt{2 \cdot \Delta x_{Fg\vartheta_A}^2 + \Delta x_{Fg\dot{m}}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,23\%^2 + 0,65\%^2} \approx 0,73\% \text{ v.M.}$$

$$\Delta x_{Fg\dot{Q}_B} = \sqrt{2 \cdot \Delta x_{Fg\vartheta_B}^2 + \Delta x_{Fg\dot{m}}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,73\%^2 + 0,65\%^2} \approx 1,22\% \text{ v.M.}$$

Der Gesamtwärmestrom \dot{Q}_{Hn} ist ein Sonderfall. Der Messwert wird nicht im Leittechnik-System berechnet, sondern vorort aus einer Ultraschall-Massenstrommessung (Typ Sono 3300, Hersteller Danfoss, s. /33/) mit einer Fehlergrenze von 0,5% v.M. und zwei Temperaturmessungen der Klasse A. Das zur Berechnung verwendete Elektronikbauteil (Typ Calec MB, Hersteller aqua metro) besitzt eine Fehlergrenze von 0,5% v.M. Die verwendete Leittechnikerkfassungskarte ist vom Typ PEA 01 (Fehlergrenze 0,25% v.M.). Die Gesamte Fehlergrenze der Messkette beträgt somit

$$\begin{aligned} \Delta x_{Fg\dot{Q}_{Hn}} &= \sqrt{2 \cdot \Delta x_{Fg\vartheta_A}^2 + \Delta x_{Fg\dot{m}_{Us}}^2 + \Delta x_{FgEb}^2 + \Delta x_{FgPEA01}^2} \\ &= \sqrt{2 \cdot 0,23\%^2 + 0,5\%^2 + 0,5\%^2 + 0,25\%^2} \approx 0,82\% \text{ v.M.} \end{aligned}$$

¹ Gehörte früher zu Hartmann&Braun, heute zu ABB.

A3 Zusammenstellung der Messstellen-Kenngrößen im Bereich „HKW-Ausgang/Heiznetz“

⇒ Anhang zu Kapitel 4.3.3

In Tabelle A3/1 sind in den ersten drei Spalten die bei der Validierung verwendeten Messgrößen (Messstellen) sowie zugehörige Messbereiche und Bezugswerte aufgelistet.

Es folgen in Spalte 4 die in Anhang A2 ermittelten Fehlergrenzen sowie in Spalte 6 die Gewichtungsfaktoren g_{M_i} gemäß Gleichung (4/17). Da innerhalb der Fehlerausgleichsfunktion die jeweiligen Messdatenabweichungen $(V_i - M_i)^2$ mit g_{M_i} gewichtet werden, sind in Spalte 5 zusätzlich die Werte $\sqrt{g_{M_i}}$ aufgelistet, mit der die jeweiligen Messdatenabweichungen $(V_i - M_i)$ gewichtet werden.

1 Messstelle	2 Messbereich	3 Bezugswert	4 Fehlergrenze	5 Gewichtung für $(V_i - M_i)$ $\sqrt{g_{M_i}} = \frac{100}{\sigma_i [\%]}$	6 Gewichtung für $(V_i - M_i)^2$ g_{M_i}
X_i	$X_{\text{messber. } i}$	X_{0_i}	Δx_{Fg_i}	$\sqrt{g_{M_i}} = \frac{100}{\sigma_i [\%]}$	g_{M_i}
\dot{Q}_{Hn}	0...80 MW	117 MW	0,82%	100 / 0,56	$3,2 \cdot 10^4$
\dot{Q}_{H40}	0...100	117 MW	0,73%	100 / 0,62	$2,6 \cdot 10^4$
\dot{Q}_{H41}	0...5 MW	117 MW	0,73%	100 / 0,03	$1,0 \cdot 10^7$
\dot{Q}_{H42}	0...5 MW	117 MW	0,73%	100 / 0,03	$1,0 \cdot 10^7$
\dot{Q}_{H50}	0...100	117 MW	1,22%	100 / 1,04	$9,2 \cdot 10^3$
\dot{Q}_{H60}	0...100	117 MW	1,22%	100 / 1,04	$9,2 \cdot 10^3$
\dot{m}_{Hn}	0...1600 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 1,04	$9,2 \cdot 10^3$
\dot{m}_{VL40}	0...400 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 0,26	$1,5 \cdot 10^5$
\dot{m}_{nB41}	0...120 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 0,08	$1,6 \cdot 10^6$
\dot{m}_{nB42}	0...120 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 0,08	$1,6 \cdot 10^6$
\dot{m}_{VL50}	0...1000 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 0,65	$2,4 \cdot 10^4$
\dot{m}_{VL60}	0...1000 t/h	1000 t/h	0,65%	100 / 0,65	$2,4 \cdot 10^4$
ϑ_{VL40} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{RL40} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{nB41} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{vB41} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{nB42} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{vB42} (Kl.A)	0...150°C	100°C	0,24%	100 / 0,36	$7,7 \cdot 10^4$
ϑ_{VL50} (Kl.B)	0...150°C	100°C	0,73%	100 / 1,10	$8,3 \cdot 10^3$
ϑ_{RL50} (Kl.B)	0...150°C	100°C	0,73%	100 / 1,10	$8,3 \cdot 10^3$
ϑ_{VL60} (Kl.B)	0...150°C	100°C	0,73%	100 / 1,10	$8,3 \cdot 10^3$
ϑ_{RL60} (Kl.B)	0...150°C	100°C	0,73%	100 / 1,10	$8,3 \cdot 10^3$

Tabelle A3/1: Messstellen-Kenngrößen

A4 Abhängigkeit des Trommelwasser-Volumens vom Trommellevel

⇒ Anhang zu Kapitel 6.3.2

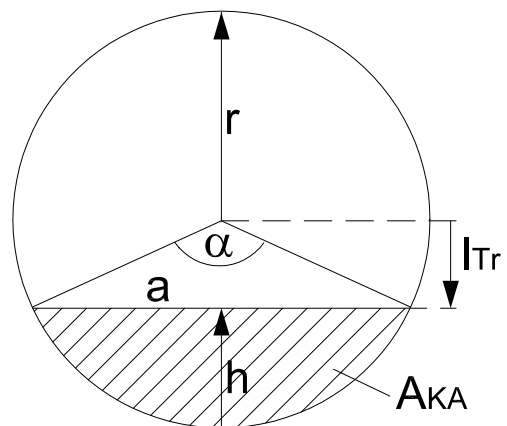
Um die Abhängigkeit des Volumens des in der Trommel eingespeicherten Wassers vom Trommellevel zu ermitteln, ist es zunächst erforderlich die entsprechende Kreisabschnittsfläche A_{KA} zu berechnen, vgl. /34/:

$$h = r + l_{Tr} \quad (A4/1)$$

$$a = 2 \cdot \sqrt{2hr - h^2} \quad (A4/2)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \frac{a}{2r} \quad (A4/3)$$

$$A_{KA} = \frac{r^2}{2} (\alpha - \sin \alpha) \quad (A4/4)$$



Die Kreisabschnittsfläche multipliziert mit der Trommellänge $L_{Tr} = 5,97 \text{ m}$ ergibt das Trommelwasser-Volumen:

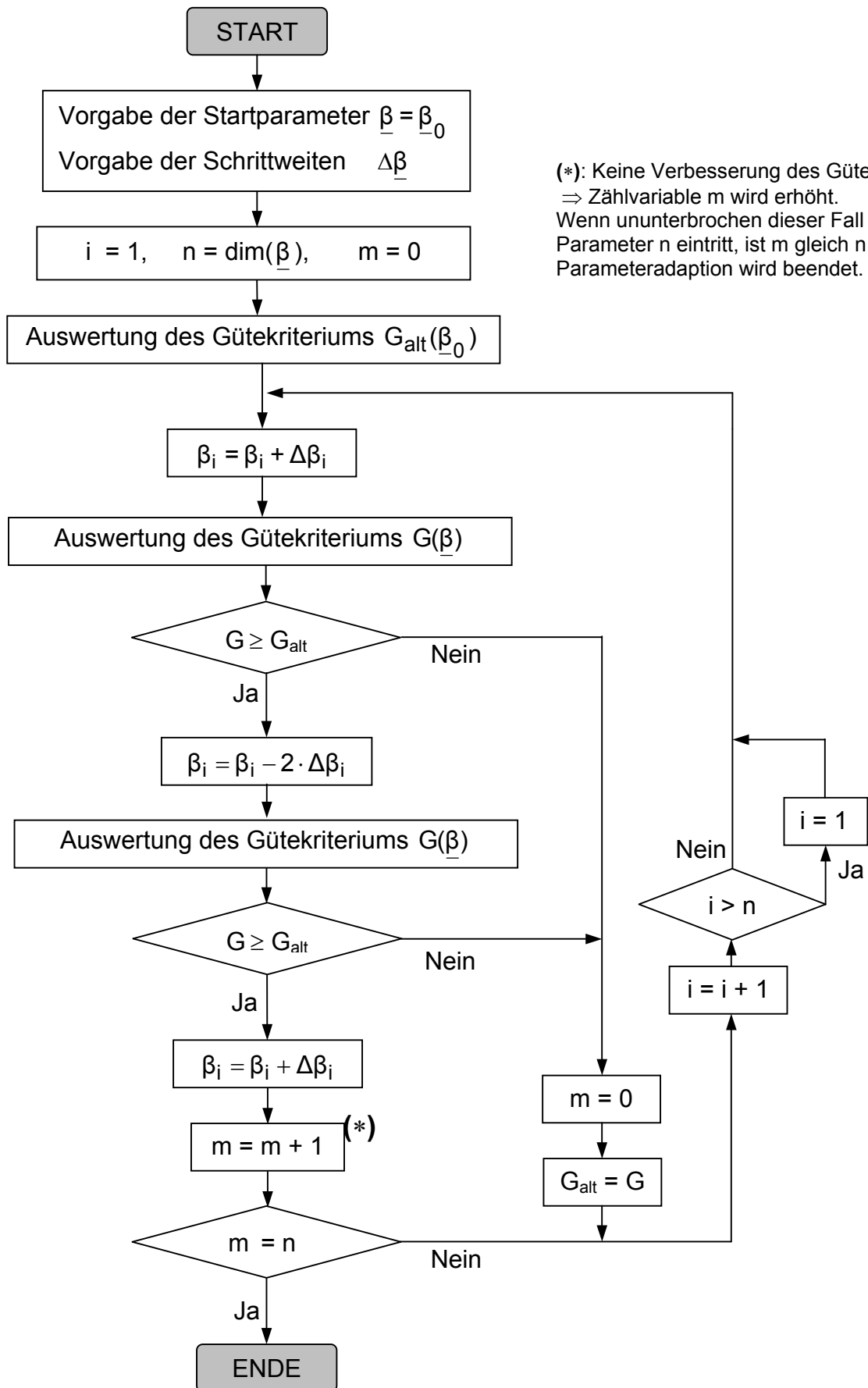
$$V_{Tr \text{ Wasser}} = f(l_{Tr}) = A_{KA} \cdot L_{Tr} \quad (A4/5)$$

Das Volumen des in der Trommel eingespeicherten Dampfes ist das Gesamtvolumen der Trommel V_{Tr} abzüglich des oben berechneten Trommelwasser-Volumens:

$$V_{Tr \text{ Dampf}} = f(l_{Tr}) = V_{Tr} - V_{Tr \text{ Wasser}} \quad (A4/6)$$

A5 Flussdiagramm zur Parameteradaption

⇒ Anhang zu Kapitel 6.3.7 und 6.5, vgl. /27/.



Lebenslauf

Persönliche Daten

Bernd Laipple

geboren am 20.04.1972 in Waiblingen, Rems-Murr-Kreis

Schulbildung und Zivildienst

1979 – 1983	Grundschule in Fellbach
1983 – 1989	Realschule in Fellbach
1989 – 1992	Technisches Gymnasium in Waiblingen
1992 – 1993	Zivildienst beim Evangelischen Verein in Fellbach

Studium

10/1993 – 04/1999	Studium Technische Kybernetik an der Universität Stuttgart Hauptfach: Energietechnik
04/1999	Diplom

Wissenschaftliche Tätigkeit

05/1999 – 10/2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik Leitung: Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder
-------------------	---

Berufstätigkeit

seit 11/2002	Angestellt bei BTB Jansky GmbH, Leonberg Beratung für Technik und Management
--------------	---