

# Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 in konventionellen und nuklearen Anlagen

**Dr. Magnus Langenstein**, BTB-Jansky GmbH Leonberg

**Dr. Bernd Laipple**, BTB-Jansky GmbH Leonberg

**Dipl. Ing. Frank Schmid**, BTB-Jansky GmbH Leonberg

## Zusammenfassung

Die Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 stellt den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik dar und wird in verfahrenstechnischen Prozessen zur

- Beurteilung von Abnahmemessungen,
- Prozessüberwachung,
- Komponentenüberwachung und
- zustandsorientierten Instandhaltung der Messketten

eingesetzt. Ist ein Validierungssystem wie VALI III nach VDI 2048 zertifiziert, können Kernkraftwerksbetreiber mittels einem externen Änderungsantrag und einer Begutachtung durch den TÜV die validierten Werte so nutzen, dass eine Leistungserhöhung resultieren kann. Des Weiteren können alle Regelgrößen genauer ermittelt und eingestellt werden, was zum Erreichen der maximalen Anlagenleistung beiträgt.

## 1. Einleitung

Liegen zur Beurteilung von verfahrenstechnischen Prozessen keine ausgeglichenen Prozessdaten vor, d. h. ist der „wahre“ Ist-Zustand des Prozesses nicht bekannt, ist eine **optimale** Prozessüberwachung nicht möglich. Eine gezielte Optimierung der Fahrweisen bestehender Anlagen oder aber das schärfere Anfahren anlagenbegrenzender Größen wie z.B. die thermische Reaktorleistung oder die Frischdampf Temperatur ist ebenfalls nicht möglich, da die gesuchten Verbesserungen in den Messwertunsicherheiten untergehen.

Um dieses Potenzial auszuschöpfen, ist eine Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 [1], [2] erforderlich. Die Validierungsergebnisse erfüllen nicht nur die Massen-, - Energie - und Stoffbilanzen, sondern liefern auch reduzierte Ergebnisunsicherheiten, was ein schärferes

Anfahren von anlagenbegrenzenden Größen ermöglicht. Darüber hinaus stellt die Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 die bestmögliche Qualitätskontrolle verfahrenstechnischer Prozesse [1] dar und wird unter anderem eingesetzt um

- Regelgrößen genauer einzustellen,
- Retrofitmaßnahmen genauer zu beurteilen,
- Wirkungsgradverbesserungspotenziale zu erkennen,
- Unzulässige Betriebszustände wie z.B. Ventilleckagen frühzeitig zu detektieren sowie
- Fernwärmeliefermengen genauer zu bestimmen.

In diesem Beitrag werden Beispiele und Möglichkeiten für nukleare und konventionelle Kraftwerke aufgezeigt, wie eine Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 mit der bestehenden Betriebsmessinstrumentierung zu einer Verbesserung sowohl der Wirtschaftlichkeit als auch der Sicherheit der Anlagen führen kann, vergleiche [3] bis [11]. Alle hier aufgeführten Beispiele wurden mit der nach VDI 2048 zertifizierten Validierungssoftware VALI III der Firma Belsim berechnet, siehe [12].

## **2. Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048**

Zur Beurteilung eines Kraftwerk-Prozesses werden genaue verfahrenstechnische Prozessdaten benötigt. Die Betriebsmessungen sind immer mit Fehlern behaftet und somit für geschlossene Prozessbilanzen nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund bietet sich als Ersatz für eine gerätetechnische Redundanz eine sog. funktionale Redundanz an. Damit kann die Güte der Betriebsmessungen überprüft werden. Diese Vorgehensweise wird Prozessdatenvalidierung genannt. Damit können genaue Prozessdaten (wahre Werte) über

- den Massen- und Energiefluss innerhalb der Anlage und
- den Zustand und das Verhalten der Messstellen/Messketten

gewonnen werden.

### **Theoretische Grundlagen**

Jeder Messwert wird durch vermeidbare, systematische und zufällige Fehler verfälscht (DIN 1319). Mit dem Ausgleichsprinzip nach Gauß unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen liegt seit über 200 Jahren ein Schätzverfahren im statistischen mathematischen Sinne vor, mit dem diese Messfehler erkannt werden können.

Der Grundgedanke dieses Verfahrens ist es, nicht nur die für eine Lösung benötigte Mindestmenge an Messgrößen zu verwenden, sondern darüber hinaus alle erreichbaren Messgrößen samt den zugehörigen Varianzen und Kovarianzen zu erfassen. Weiter müssen die wahren Werte der Messgrößen die Nebenbedingungen

- Massenbilanzen,
- Energiebilanzen und
- Stoffbilanzen (stöchiometrische Gesetze)

erfüllen.

Dieses Verfahren wird in der VDI 2048 [1] und [2] beschrieben und ist die bestmögliche Qualitätskontrolle zum Erkennen von groben Messfehlern. Mit dieser Methodik erhält man aus widersprüchlichen Messwerten widerspruchsfreie Schätzwerte für die wahren Werte der Messgrößen. Diese widerspruchsfreien Schätzwerte (validierte Messwerte) entsprechen mit einer 95%-igen Wahrscheinlichkeit den wahren Werten.

### Gauß'sches Ausgleichsprinzip

An den Messwerten  $x$  werden gemäß **GLEICHUNG 2.01** Verbesserungen  $v$  angebracht, sodass man Schätzwerte (validierte Messwerte)  $\bar{x}$  erhält.

$$\bar{x} = x + v \quad \text{(GL. 2.01)}$$

Die Verbesserungen  $v$  sind so zu bestimmen, dass die Fehlerquadratsumme

$$\xi_0 = v^T \cdot S_X^{-1} \cdot v \Rightarrow \text{Min} \quad \text{(GL. 2.02)}$$

$\xi_0$  ... Fehlerquadratsumme

$S_X^{-1}$  ... invertierte Kovarianzmatrix

zu einem Minimum wird. Die empirische Kovarianzmatrix  $S_X$  ist der Schätzwert für die Unsicherheit der Messgrößen  $x$ . Diese allgemeine Formulierung deckt auch das Vorhandensein von Kovarianzen, d. h. die Abhängigkeiten der Messstellen untereinander, ab. Für die in der Praxis überwiegend gegebene Unabhängigkeit der Messstellen untereinander lässt sich diese allgemeine Formulierung auf

$$\xi_0 = \sum_{i=1}^n \frac{v_i^2}{s_{X_i}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x}_i - x_i)^2}{s_{X_i}^2} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{x}_i - x_i}{s_{X_i}} \right)^2 \Rightarrow \text{Min} \quad \text{(GL. 2.03)}$$

reduzieren. In dieser Gleichung setzt sich die Fehlerquadratsumme  $\xi_0$  aus der Summe der mit den empirischen Varianzen  $s_{x_i}$  gewichteten Korrekturquadrate der Messgrößen  $x_i$  über alle  $n$  Messgrößen zusammen.

### Qualitätskontrolle

Die Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 verlangt als Qualitätskontrolle die Erfüllung zweier Kriterien. Zum einem muss die in GL. 2.03 enthaltene Fehlerquadratsumme  $\xi_0$  kleiner als  $\chi_{95\%}^2$  (95%-Quantil von CHI-Square) sein.

$$\text{VDI 2048 Kriterium 1:} \quad \xi_0 < \chi_{95\%}^2 \quad (\text{GL. 2.04})$$

Das 95%-Quantil von CHI-Square ist ein statistisches Maß für die Anzahl der Modell-Redundanzen (Freiheitsgrade) und ist z.B. in [13] in Tabellenform enthalten. Die Anzahl der Modell-Redundanzen ist abhängig von der Anzahl der im Modell enthaltenen Gleichungen sowie der Anzahl der eingebundenen Messwerte und spiegelt die Überbestimmtheit des Systems wieder. Das Verhältnis der Fehlerquadratsumme zu CHI-Square wird als Validierungsgüte bezeichnet, siehe GL. 2.05. Im Allgemeinen gilt: Je kleiner die Validierungsgüte, desto besser ist die Qualität des Modells / der Messwerte.

$$\text{Validierungsgüte} = \xi_0 / \chi_{95\%}^2 \quad (\text{GL. 2.05})$$

Des weiteren muss der Wert des Einzel-Penalties kleiner sein als die statistische Kennzahl  $1,96^2$ . Der Wert des Einzel-Penalties einer Messstelle ist das Verhältnis aus dem Quadrat der Verbesserung  $v_i$  zu der Differenz aus der geschätzten Unsicherheit des Messwerts  $s_{x,ii}$  und der errechneten Standardabweichung des validierten Messwerts  $s_{\bar{x},ii}$ , siehe **GL. 2.06**.

$$\text{VDI 2048 Kriterium 2:} \quad \frac{v_i^2}{s_{x,ii} - s_{\bar{x},ii}} = \frac{v_i^2}{s_{v,ii}} \leq 1,96^2 \quad (\text{GL. 2.06})$$

Dieses Kriterium muss für alle Messwerte  $i$  erfüllt sein. Bei Nichterfüllung liegt für die entsprechende Messstelle  $i$  oder den Schätzwert der zugehörigen Unsicherheit ein grober Fehler vor.

Der validierte Messwert sowie der Messwert selbst ist dann anzuzweifeln. Wenn beide oben genannten Kriterien erfüllt sind, entsprechen die validierten Messwerte  $\bar{x}$  mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit den wahren physikalischen Zustandsgrößen.

### 3. Anwendungen und Ergebnisse in konventionellen Anlagen

Der Nutzen einer Prozessdatenvalidierung für konventionellen Anlagen ist vielfältig. Im Folgenden werden einige Aspekte diskutiert, aufgezeigt und mit Ergebnissen belegt. Die Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 ermöglicht die

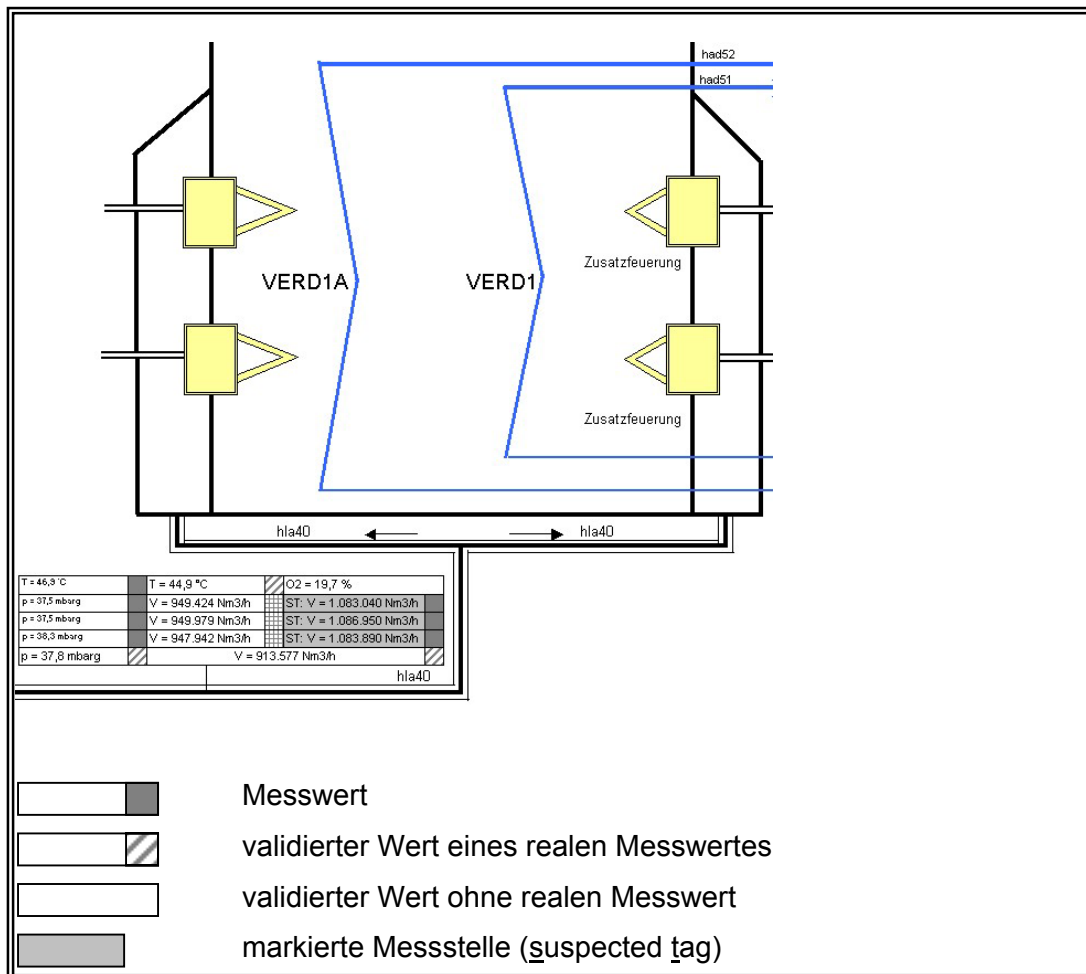
- Identifizierung und Korrektur fehlerhafter Messstellen und Regelgrößen,
- Erkennung von Wirkungsgradverbesserungen,
- genauere Bestimmung von absoluten Frischdampftemperaturen sowie die zugehörigen errechneten Ergebnisunsicherheiten,
- Erstellung von Wochen- und Monatwärmebilanzen mit ausgeglichenen Prozessdaten,
- Detektierung von ungewollten inneren Leckagen (z.B. Ventilleckagen),
- genauere Bestimmung von Fernwärmemengen,
- frühzeitige Erkennung ungewollter Betriebszustände sowie
- Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Berücksichtigung geschlossener Bilanzen.

Im Folgenden werden anhand eines bestehenden Validierungsmodells einer Kombi-Anlage einige Ergebnisse vorgestellt. Im Validierungsmodell sind 450 Messstellen integriert, 95 davon sind Regelgrößen.

#### Regelgrößen

Liegen bei Regelgrößen Abweichungen zwischen dem „wahren“ Wert und dem Messwert vor, kann die Anlage nicht optimal eingeregelt werden, was zu einer Wirkungsgradverschlechterung führt.

Nach der Umstellung von Gasturbinenbetrieb auf Frischluftbetrieb wurde ein deutlich reduzierter Anlagenwirkungsgrad festgestellt. Ursache hierfür war die direkt in die Regelgröße Brennstoff/Luftverhältnis einfließende gemessene und druckkompensierte Luftmenge, die einen zu hohen Wert anzeigte, siehe **Abbildung 1**. Der Grund dieses Fehlers wurde in der Druckkompensation des Messwertes ermittelt.



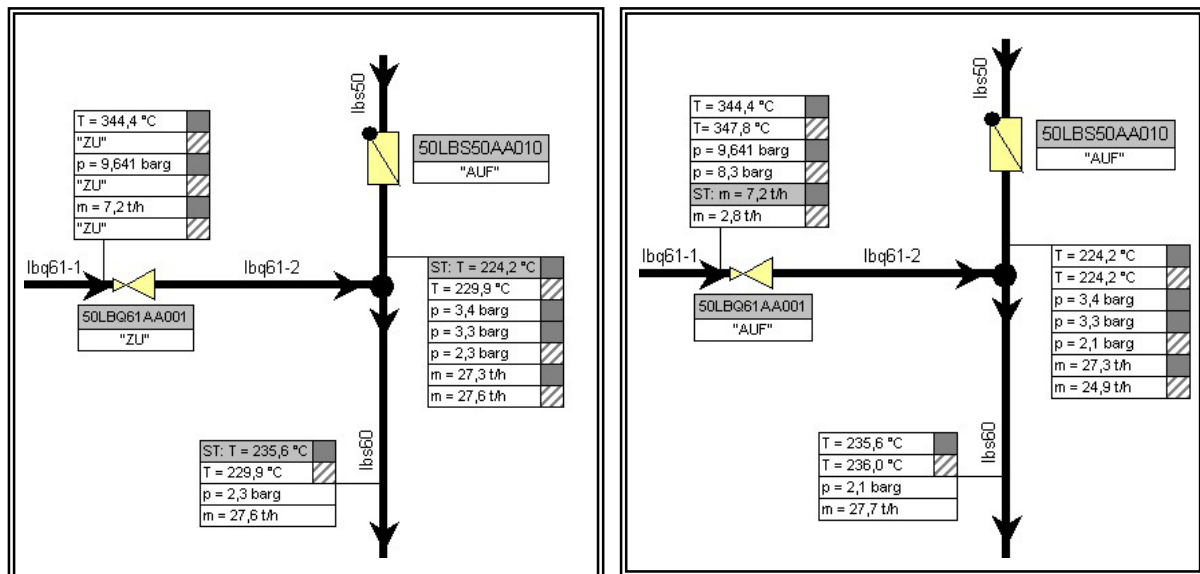
**Abbildung 1:** Fehlerhafte druckkompensierte Verbrennungsluftmenge bei Frischluftbetrieb

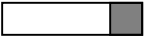
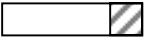
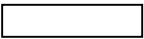

### Prozessüberwachung - Erkennen von nicht beabsichtigten Betriebszuständen

**Abbildung 2** zeigt einen Prozessausschnitt mit geschlossenem Ventil „50LBQ61AA001“ bei dem zwei Temperaturmessstellen als fehlerhaft markiert wurden. Aufgrund des Messwertes der Durchfluss-Messstelle von 7,2 t/h wurde vermutet, dass der Rohrleitungsabschnitt trotz geschlossenem Ventil durchströmt wurde.

Eine Vergleichsrechnung mit geöffnetem Ventil ergab, dass bei einer Leckagemenge von 2,8 t/h die Temperaturen vor und nach der Zusammenführung nicht mehr als fehlerhaft markiert wurden, siehe **Abbildung 3**. Gleichzeitig verbesserte sich die Validierungsgüte nach GL. 2.05 von 1,86 auf 1,76. Weitere Vergleichsrechnungen mit der Prozessdatenvalidierung bestätigten die Leckage.

Während der Revision wurde festgestellt, dass der Rohrleitungsabschnitt tatsächlich aufgrund einer Leckage durchströmt wurde.



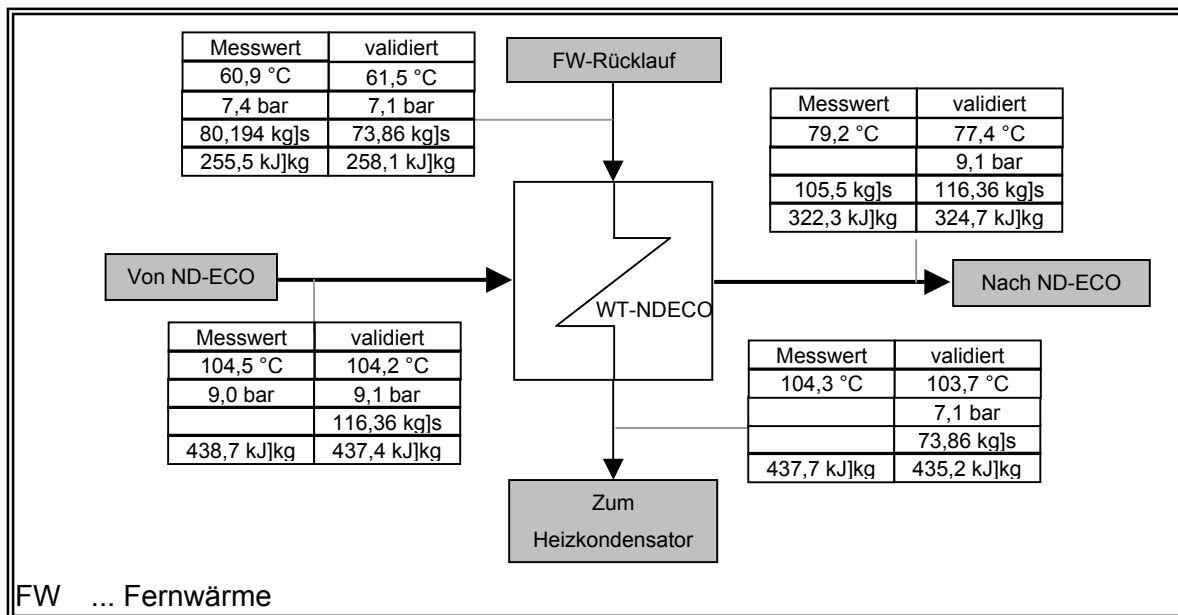
-  Messwert
-  validierter Wert eines realen Messwertes
-  validierter Wert ohne realen Messwert
-  markierte Messstelle (suspected tag)

**Abbildung 2:** Ventil 50LBQ61AA001 „ZU“

**Abbildung 3:** Ventil 50LBQ61AA001 „AUF“

### Fernwärme

Ein weiteres Beispiel für den Nutzen der Prozessdatenvalidierung ist die Berechnung der Vorwärmung des Fernwärme-Vorlaufs, siehe **Abbildung 4**. Die Primärseite des Wärmetauschers WT-NDECO ist mit dem ND-ECO des Abhitzekeessels verbunden. Die Sekundärseite dient der Vorwärmung des Fernwärmeverlaufs. Aufgrund der Rohmesswerte errechnet sich primärseitig eine Wärmeleistung von 12,3 MW<sub>th</sub> und sekundärseitig von 14,61 MW<sub>th</sub>. Die Prozessdatenvalidierung liefert durch die ausgeglichenen Daten in diesem Fall eine übertragene Wärmeleistung von 13,1 MW<sub>th</sub>.



**Abbildung 4:** Fernwärmeberechnung

#### 4. Anwendung der Prozessdatenvalidierung in nuklearen Anlagen

In nuklearen Anlagen gibt es eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten bzgl. der Prozessdatenvalidierung wie z.B.:

- Erhöhung der Sicherheitskultur in den Anlagen,
- Leistungserhöhung durch Korrektur von systematischen Messfehlern,
- Reduktion der Unsicherheiten,
- zustandsorientierte Instandhaltung der Messkreise,
- Prozessüberwachung (z.B. Erkennung von nicht beabsichtigten Betriebszuständen),
- Beurteilung von Retrofitmaßnahmen nach VDI 2048 (wie z.B. Turbinentausch, ND-Vorwärmerertüchtigungen oder Powersep-Einbau),
- Prozess- und Komponentenüberwachung sowie
- Entdeckung von inneren und äußeren Leckagen (z.B. undichte Ventile).

Im Folgenden werden beispielhaft einige Nutzungsmöglichkeiten und Ergebnisse der Prozessdatenvalidierung in nuklearen Anlagen aufgezeigt.

#### Auswirkungen auf die Sicherheitskultur in den Anlagen

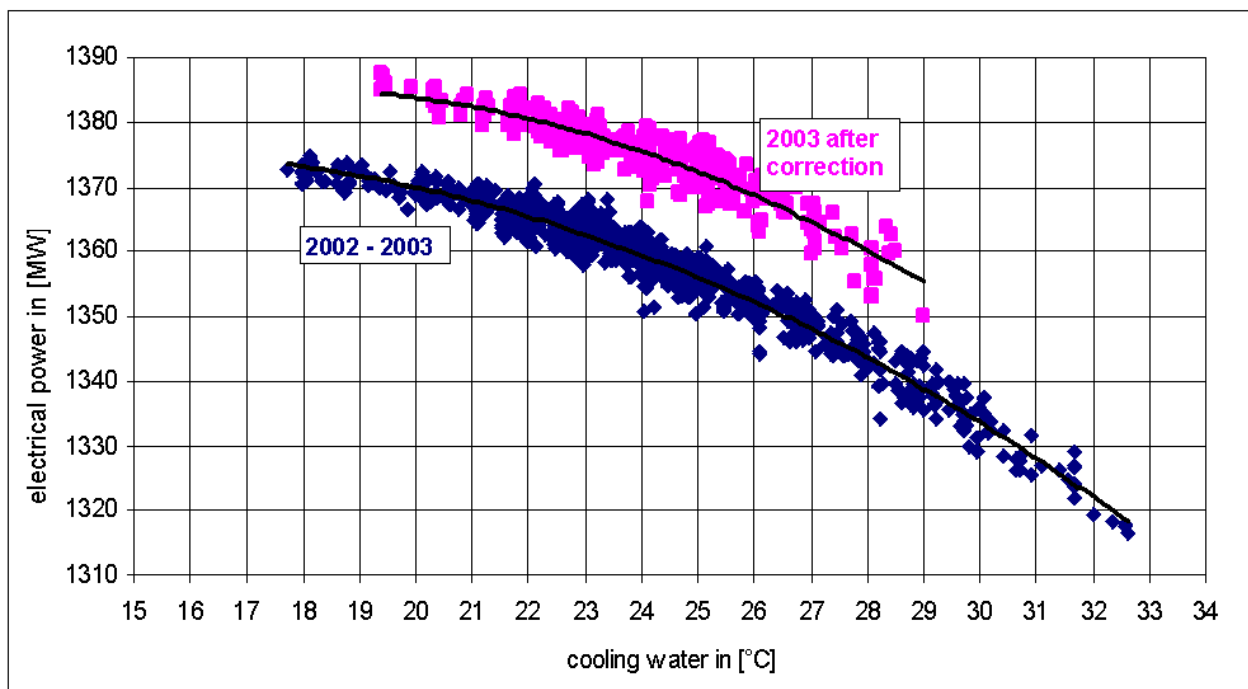
Die auf Basis geschlossener Massen-, Energie- und Stoffbilanzen errechneten validierten Werte stellen zu jedem Betriebszeitpunkt eine vergleichbare Datenbasis dar, welche in den Anlagen **jedem Mitarbeiter** zur Verfügung gestellt werden kann. Diese von uns sogenannte

“**Prozessdatendemokratisierung**” erlaubt es, über alle Schnittstellen hinaus (E-Technik, Leittechnik, Maschinentechnik, Betrieb) eine Diskussionsgrundlage zu schaffen, die zu einer Verbesserung der Sicherheitskultur in den Anlagen führt. Die Tatsache, dass die Daten allen im Betrieb zugänglich gemacht werden, führt zu einer Know-how-Verbesserung in einem erweiterten Personenkreis.

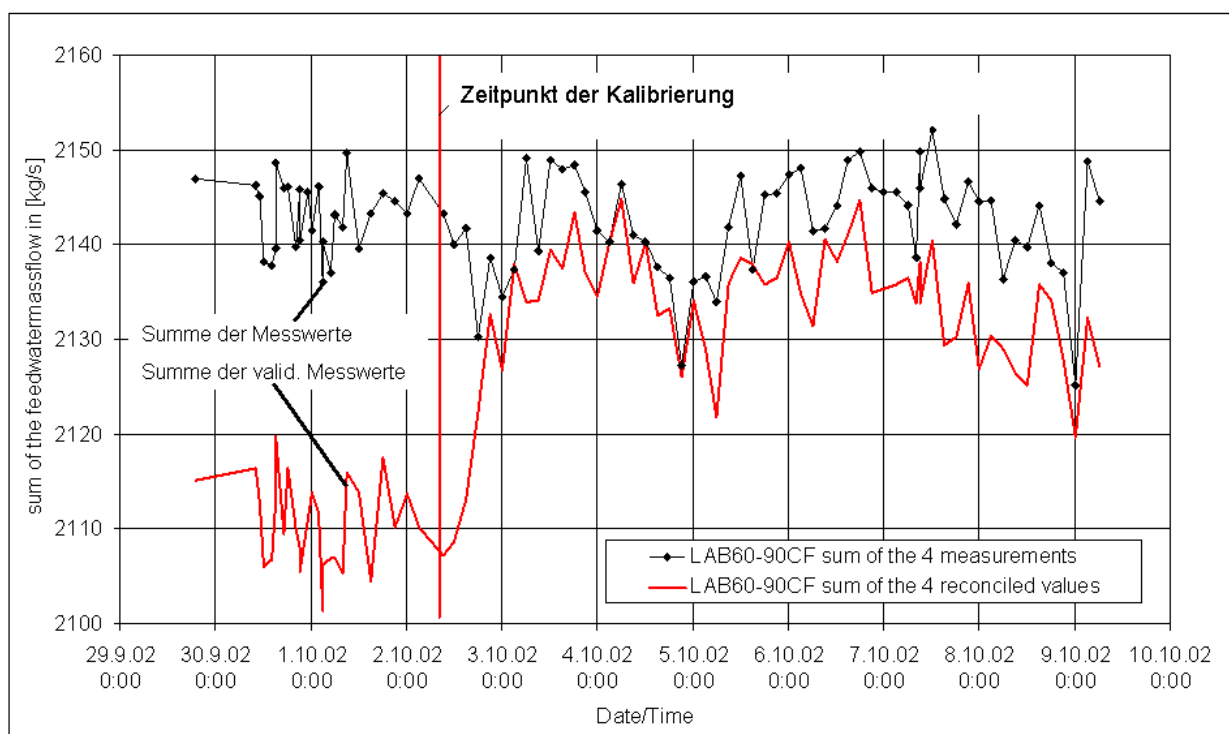
### **Leistungserhöhung durch Korrektur von systematischen Messfehlern**

Aufgrund der Justierung der Speisewassermengenmessungen mithilfe der Prozessdatenvalidierung konnte in einem deutschen Kernkraftwerk die Generatorleistung im Jahr 2002 um ca. 15 MW<sub>el</sub> erhöht werden. Dies war erst möglich, nachdem eine TÜV-Qualifizierung des Validierungssystems VALI III und des Validierungsmodells vorlag. In der TÜV-Qualifizierung wurde die Zustimmung erteilt, sowohl die Speisewassermengen als auch die mittlere Kühlmitteltemperatur (KMT) auf den validierten Wert zu justieren.

Nach der Justierung der einzelnen Speisewasser-Massenströme auf ihre validierten Werte sank die berechnete thermische Reaktorleistung. Die folgende Nachführung der thermischen Reaktorleistung auf ihren genehmigten Wert, durch die Erhöhung der Speisewassermenge erbrachte die höhere Generatorleistung, siehe **Abbildung 5**. Im **Abbildung 6** ist der Justiervorgang der Speisewasser-Massenströme dargestellt.



**Abbildung 5:** Anlagencharakteristik vor und nach der Justierung der Speisewasser-Massenströme

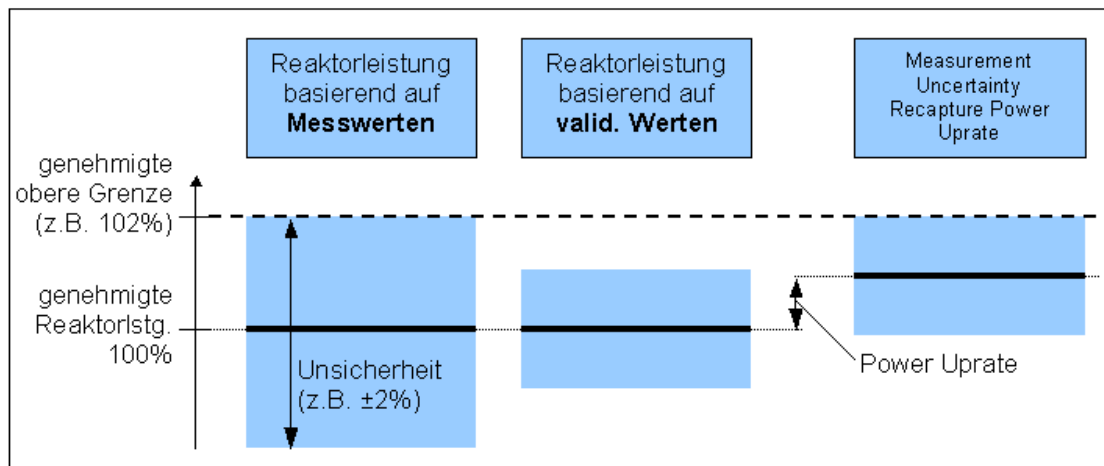


**Abbildung 6:** Justiervorgang der Speisewasser-Massenströme

### Reduzierung der Unsicherheiten

Verknüpft über die im Validierungsmodell enthaltenen Gleichungen stellen einzelne Messwerte nicht mehr eine singuläre Information dar, sondern sie stehen untereinander in einem funktionalen Zusammenhang. Aus diesem Grund sind die berechneten Unsicherheiten der validierten Werte gegenüber den ursprünglich geschätzten Unsicherheiten der Messwerte reduziert. Ebenso wird die Unsicherheit der berechneten thermischen Reaktorleistung basierend auf validierten Werten gegenüber der berechneten thermischen Reaktorleistung basierend auf Messwerten reduziert, siehe **Abbildung 7**.

In den USA nutzt das Measurement Uncertainty Recapture Power Uprate-Programm diesen Effekt, d.h. wird ein System installiert, welches nachweislich eine zum Ausgangszustand reduzierte Ergebnisunsicherheit liefert, ist eine entsprechende Leistungserhöhung möglich, vergleiche **Abbildung 7**.



**Abbildung 7:** Reduzierung der Unsicherheit der thermischen Reaktorleistung

### Zustandsorientierte Instandhaltung der Messketten

Die frühzeitige Erkennung von Messwertdrifts mithilfe der Prozessdatenvalidierung ermöglicht eine zustandsorientierte Instandhaltung der Messketten. Ein Beispiel hierfür ist der Drift des Thermoelements 0RF14T101.

Alle Messwerte, die das VDI-2048 Kriterium 2 (siehe GL.2.2.02) nicht erfüllen, werden automatisch im Prozessflussdiagramm rot markiert, siehe **Abbildung 8**. Aufgrund der durch die Modellgleichungen gegebenen Abhängigkeiten wurden außer dem driftenden Messwert noch weitere Messwerte angezweifelt.

Nach der Auswechslung des Thermoelements 0RF14T101 erfüllten alle Messwerte im betrachteten Prozessbereich das VDI-2048 Kriterium 2, siehe **Abbildung 9**. Im **Abbildung 10** ist der zeitliche Verlauf des Messwerts sowie der zugehörige Einzel-Penalty der Messstelle 0RF14T101 dargestellt.

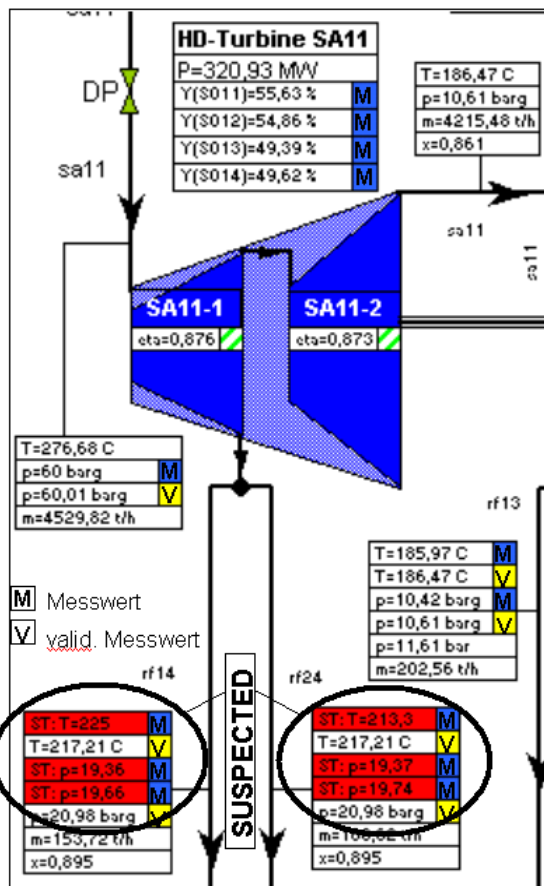


Abbildung 8: Anzuzweifelnde Messungen (Suspected Tags)

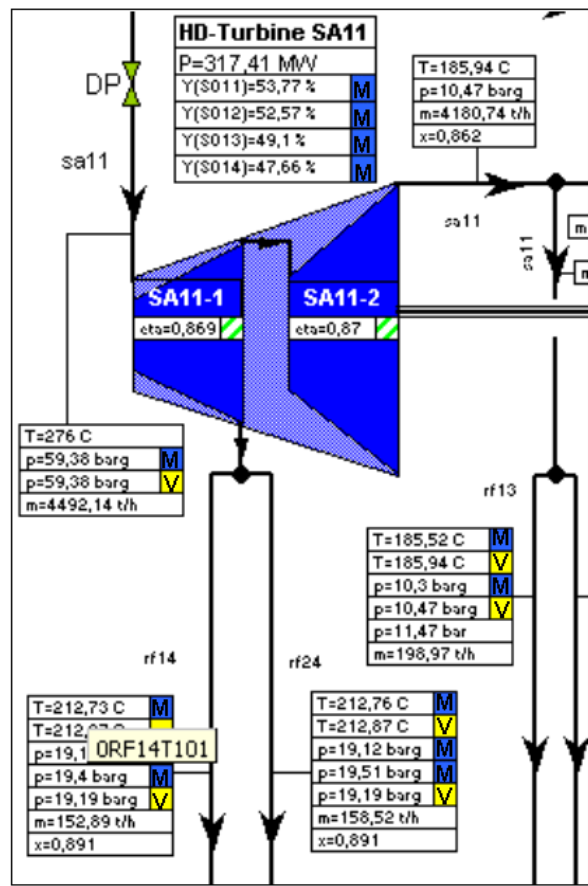
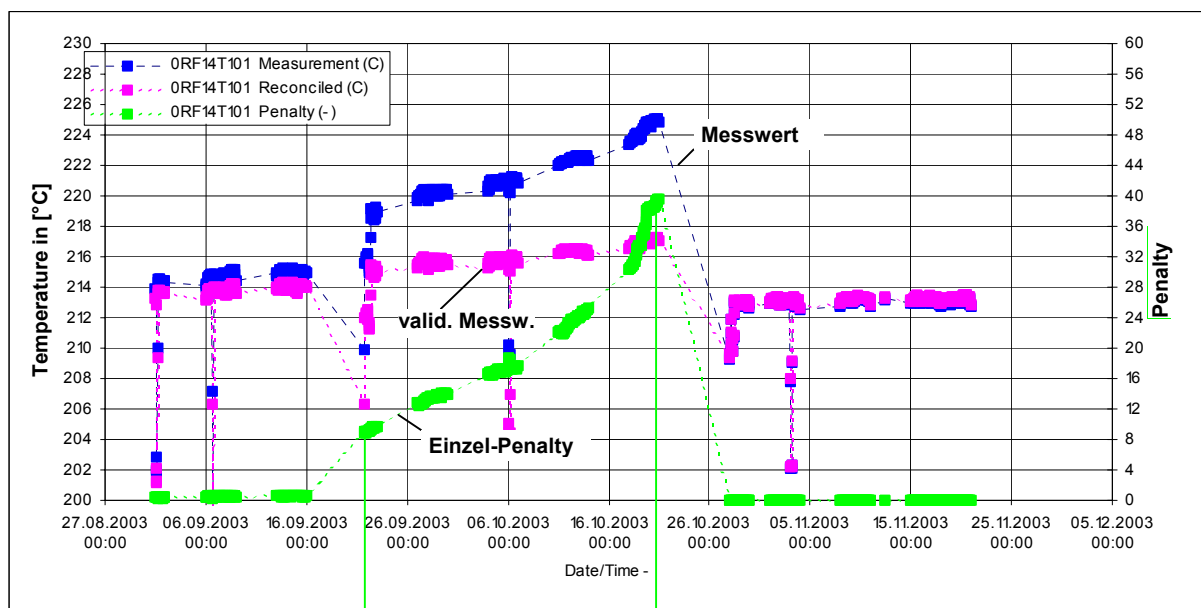


Abbildung 9: Nach Auswechslung des Thermoelements 0RF14T101



Ab diesem Zeitpunkt „suspected“ (rot markiert)

Auswechslung des Thermoelements

Abbildung 10: Verlauf des Messwerts und des zugehörigen Einzel-Penalties (RF14T101)

## **Prozessüberwachung - Erkennen von nicht beabsichtigten Betriebszuständen**

Nicht beabsichtigte Betriebszustände können mithilfe der Prozessdatenvalidierung frühzeitig erkannt werden. Im folgenden werden zwei Beispiele aus der Praxis erläutert.

### Beispiel „Innere Leckage“:

Eine gegenüber dem Normalbetrieb erhöhte Sperrwassermenge an einer Pumpe führte real zu einer Temperaturabsenkung des Mediums. Da im Validierungsmodell ein Sperrwassereintritt nicht modelliert war, konnten in diesem Prozessbereich die Energiebilanzen nur geschlossen werden, indem alle in diesem Bereich liegenden Temperaturmessungen stark korrigiert wurden, was zu „fehlerhaften“ Messstellen (sogenannte suspected Tags) führte. Durch die Analyse dieser Gegebenheit konnte auf eine erhöhte Sperrwassermenge an einer Pumpe geschlossen werden, welche umgehend korrigiert wurde.

### Beispiel „Ungenügende Vermischung des Kühlwassers“:

Bei Mischbetrieb des Kühlturms wird das Wasser vom Kühlturm mit kühlerem Flusswasser vermischt. An einer Anlage wurde ab einem gewissen Zeitpunkt stark unterschiedliche Temperaturen in den vier Kondensatorzuleitungen gemessen. Für die unterschiedlichen Temperaturmesswerte wurde genau ein validierter Wert errechnet, da im Validierungsmodell an diesem Punkt eine ideale Durchmischung vorausgesetzt wurde. Die Temperaturmessungen wurden aufgrund der Differenzen zwischen den einzelnen Messwerten und dem validierten Wert als „fehlerhaft“ markiert (sogenannte suspected Tags). Als Ursache für dieses Verhalten wurde eine unbeabsichtigte Schieberstellung im Kühlwassereinlauf detektiert, die sofort behoben wurde. Diese Maßnahme hob den Anlagenwirkungsgrad wieder auf normales Niveau an.

## **5. Weitere Vorteile und Ausblick**

Weitere Vorteile bei der Anwendung einer Prozessdatenvalidierung nach VDI 2048 sind:

- Ein Benchmarking zwischen Anlagen und Anlagenteile ist besser möglich, da eine vergleichbare Datenbasis vorliegt.
- Eine Ferndiagnose der momentanen Betriebszustände ist möglich.

Liegen validierte Daten von Teillastzuständen vor, können daraus für jeder Komponente Polynome erstellt werden, die das reale Teillastverhalten beschreiben, siehe **Abbildung 11**.

Mit diesem realen Teillastverhalten der Komponenten können dann auch Simulationsrechnungen durchgeführt werden, mit denen weitere Optimierungspotentiale bei Teillast aufgezeigt werden können.



**Abbildung 11:** Vorgehensweise bei Berücksichtigung von Teillastzuständen und Simulation

## 6. Literatur

- [1] Verein deutscher Ingenieure (VDI): "Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen – Grundlagen"; VDI 2048 Blatt 1; Oktober 2000
- [2] Verein deutscher Ingenieure (VDI): "Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen – Beispiele"; VDI 2048 Blatt 2; August 2003
- [3] Brockmeier U.: "Validierung von Prozeßdaten in Kraftwerken" VGB-Kraftwerkstechnik Issue 9/99 Pages 61-66.
- [4] Grauf E., J. Jansky, M. Langenstein; Investigation of the real process data on basis of closed mass and energy balances in nuclear power plants (NPP); SERA-Vol. 9, Safety Engineering and Risk Analysis - 1999, Pages 23-40; edited by J.L. Boccio; ASME 1999.
- [5] Grauf E., Jansky, J., Langenstein, M.: Reconciliation of process data in nuclear power plants (NPPs), 8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) April 2-8, 2000 Baltimore, MD USA.
- [6] Langenstein M., J. Jansky: Process data validation in CCGT and nuclear power plants, Paper # O03/2, SmiRT 16, Washington DC, August 2001.
- [7] Langenstein M.: Process Data Reconciliation in Nuclear Power Plants, EPRI Nuclear Power Performance Improvement Seminar, July 15-16, 2002; Saratoga Springs.
- [8] H. Eitschberger, M. Neuhauser: 10 Years Experience with Process Data Reconciliation at KKL, EPRI Nuclear Power Performance Improvement Seminar, July 15-16, 2002; Saratoga Springs.
- [9] Langenstein M., Jansky J., Laipple B., Eitschberger H., Grauf E., Schalk H.: "Finding Megawatts in Nuclear Power Plants With Process Data Reconciliation" 12th International Conference on Nuclear Engineering, Arlington (Virginia), USA, April 2004.
- [10] JM. Favennec, A. Viette, P. Ambos, S. Szaleniec: "Improving power plant performance with process data reconciliation" ISA POWID, Colorado Springs, USA, June 2004.
- [11] JM. Favennec, J. Veau: "The Use of Data Reconciliation on Feedwater Flowrate measurement monitoring" EPRI/NPPI Seminar, Austin (Texas), USA, June 2004.
- [12] "VALI III USER's GUIDE Vers. 11.32"; BELSIM S.A., B-4031 Liege, Belgium
- [13] Bronstein I.: „Taschenbuch der Mathematik“, Verlag Harri Deutsch, 1993.