

Wie (un-)genau sind prozesstechnische KPIs, die als Entscheidungshilfe für die Betriebsführung und Instandhaltung von Kraftwerken verwendet werden?

Frank Schulze, Andreas Knieschke und Christian Lösche

1.	Einleitung	2
2.	Grundlagen	2
2.1.	Prozessgüteüberwachung	2
2.2.	Messunsicherheitsbestimmung nach VDI 2048	3
2.3.	Monte-Carlo-Methode zur Unsicherheitsberechnung.....	4
3.	Vorgehen am Beispiel eines Braunkohlekraftwerkes.....	5
3.1.	Sensitivitätsanalyse	6
3.2.	Abschätzung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen	7
3.3.	Realisierung der Monte-Carlo-Berechnung mittels Epsilon und Excel	7
3.4.	Ergebnisse der Monte-Carlo-Berechnungen.....	8
4.	Ergebnisdiskussion	9
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	10
6.	Quellen.....	11

1. Einleitung

Zur kontinuierlichen Überwachung und Optimierung der technischen Prozesse sind moderne Energieerzeugungsanlagen zunehmend mit speziellen Monitoring- und Expertensystemen ausgestattet, die direkt mit dem Leitsystem der Anlage verbunden oder dort bereits integriert sind und die Betriebsmessdaten weiterverarbeiten. Da jeder der eingehenden Messwerte mit einer Messunsicherheit behaftet ist, sind auch die Ergebnisse der übergeordneten Datenverarbeitungssysteme (KPIs wie z. B. Wirkungsgrade, Gütegrade, Verbrauchskennzahlen) mehr oder weniger ungenau. Während die aus den Messwerten abgeleiteten KPIs selbst häufig mit einer hohen Stellenanzahl angegeben werden und damit eine entsprechend hohe Genauigkeit suggerieren, sind die tatsächlichen Ergebnisunsicherheiten der KPIs oft völlig unbekannt; sie werden praktisch ignoriert.

Mit der sog. Monte-Carlo-Simulation, einer stochastischen Methode, ist es vergleichsweise einfach möglich, die Ergebnisunsicherheiten auch bei komplexen Datenverarbeitungssystemen mit vielen Variablen und nichtlinearen Zusammenhängen zu ermitteln. Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist entsprechend leistungsfähige Hard- und Software.

Anhand eines Beispiels (Prozessgüteüberwachungssystem eines Braunkohlekraftwerks) wird im vorliegenden Beitrag gezeigt, wie mit relativ geringem Aufwand die Ergebnisunsicherheiten von KPIs ermittelt werden können.

Die Kenntnis und bewusste Berücksichtigung dieser Unsicherheiten ermöglicht es dem Betreiber- bzw. Instandhaltungspersonal, belastbare Entscheidungen als Reaktion auf angezeigte Veränderungen von KPIs zu treffen.

2. Grundlagen

2.1. Prozessgüteüberwachung

Als Prozessgüteüberwachung wird die kontinuierliche Bewertung der Qualität des Kraftwerksprozesses mithilfe von modellgestützten Systemen bezeichnet. Überwiegend werden thermodynamische Modelle eingesetzt, die den Prozess mittels Kreisprozess-Software physikalisch nachbilden. Andere Systeme verwenden auch mathematische, statistische oder KI-Modelle bzw. Kombinationen dieser Möglichkeiten. Viele praxisbezogene Hinweise und Erläuterungen dazu finden sich im VGB-Standard S-012 [1].

Es wird der gegenwärtige Anlagenzustand thermodynamisch berechnet und somit werden die Kennzahlen des aktuellen Anlagenbetriebes bestimmt. Es schließt sich die *What-If*-Berechnung an. Hier wird der derzeitige mögliche Anlagenzustand basierend auf den gegebenen Randbedingungen, wie Umgebungsbedingungen und Anlagenschaltung, aus den vorgegebenen Referenzkurven des Modells errechnet. Die Referenzkurven repräsentieren die Anlage zu einem definierten Zeitpunkt mit dem möglichen besten Verhalten, so zum Beispiel nach einer Hauptrevision der Anlage. Im nächsten Schritt werden verschiedene Prozessparameter, einzeln und nacheinander, in der *What-If*-Betrachtung von Referenzwert auf den realen Wert eingestellt. Dies ermöglicht die Berechnung der

Auswirkung dieser Parameterabweichung auf den gesamten Energiewandlungsprozess. Mögliche zu betrachtende Parameter sind in [1] dargestellt.

Schließlich werden die interessierenden Kennziffern (KPI – Key Performance Indicator), wie Gütegrade, Verluste oder Brennstoffmehrverbräuche, berechnet und die Ergebniswerte in ein zentrales Datenmanagement überführt.

Gütegrade (GG) werden gemäß VGB-Standards (S-012 [1], S-002 [2]) wie folgt definiert:

$$\text{Gleichung 1: } GG = \frac{x_{ist}}{x_{soll}}$$

Dabei steht x für die jeweilige Kenngröße wie beispielsweise Wirkungsgrad oder Wärmeübergang (kA).

Für die Berechnungen wurde im vorliegenden Fall das Programm EpsilonProfessional genutzt, welches thermodynamische Simulationen ermöglicht. Abbildung 1 zeigt die grundlegende Topologie des als Beispiel ausgewählten Kraftwerksmodells. Die nähere Funktionsweise zum programmtechnischen Ablauf ist in [3] dargestellt.

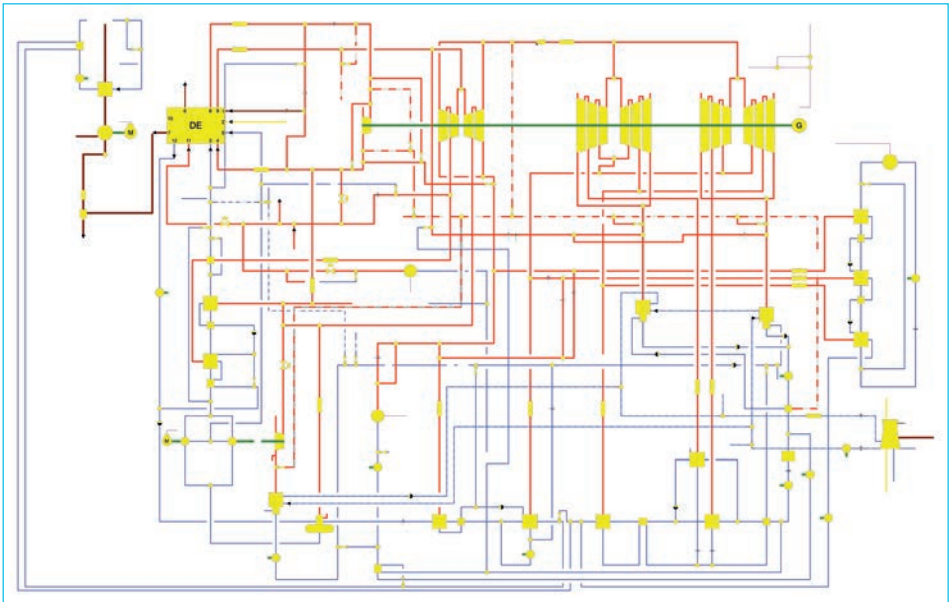


Abb. 1: Topologie des Beispielkraftwerks

2.2. Messunsicherheitsbestimmung nach VDI 2048

Aufgrund der Komplexität der Gleichungssysteme, die den Prozessmodellen von PGÜ-Systemen zugrunde liegen, ist die Ermittlung der Ergebnisunsicherheiten dieser Systeme nach der bekannten algorithmischen Methode (Anwendung des sog. Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes) nicht ohne Weiteres möglich.

In der VDI-Richtlinie 2048 [4] ist eine Methode beschrieben, die dieses Problem wiederum mithilfe eines thermodynamischen Modells löst. Diese als *Messdatenvalidierung* bezeichnete Methode setzt neben der korrekten Abbildung des Prozesses (Massen- und Energiebilanzen) auch sehr fundierte und detaillierte Angaben zu den eingehenden Mess- und Hilfwerten, ihren zugehörigen Messunsicherheiten (Konfidenzintervallen) und gegenseitigen Abhängigkeiten (Kovarianzen) voraus.

Als Ergebnis der Messdatenvalidierung wird der statistisch wahrscheinlichste Zustand des Prozesses berechnet, und gleichzeitig werden die Unsicherheiten aller beteiligten Mess- und Ergebnisgrößen minimiert.

Trotz dieses Vorteils verzichtet man bei vielen installierten PGÜ-Systemen auf die Anwendung der Messdatenvalidierung nach VDI 2048. Hauptgrund dafür ist der erheblich höhere Modellierungs- und Pflegeaufwand im Vergleich zu *normalen* PGÜ-Modellen, der benötigt wird, um die strengen Qualitätskriterien der VDI-Richtlinie einzuhalten und so nachvollziehbare und belastbare Ergebnisse zu erhalten.

2.3. Monte-Carlo-Methode zur Unsicherheitsberechnung

Alternativ zur algorithmischen Bestimmung nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz kann die Mess- bzw. Ergebnisunsicherheit mit ausreichender Genauigkeit auch experimentell, einfach ausgedrückt: durch zielgerichtetes Probieren, bestimmt werden.

Die sog. Monte-Carlo-Methode ist schon seit langem bekannt, allerdings bestehen insbesondere bei komplexen Gleichungssystemen hohe Anforderungen an die Rechenleistung, sodass diese Methode erst mit der Verfügbarkeit entsprechend leistungsfähiger Hard- und Software eine größere Verbreitung gefunden hat.

Das Prinzip ist recht einfach erklärt: Die gewünschte Ergebnisgröße wird nicht nur einmal, sondern sehr oft (in der Praxis viele tausend Male) berechnet, allerdings jedes Mal in einer leicht veränderten Form: Alle *unsicheren* Variablen des Gleichungssystems – dies sind die nicht exakt bestimmbar messbaren Messgrößen – werden zufällig variiert, und zwar bei jeder Berechnung neu.

Für ein sehr einfaches Beispiel – die Mittelwertbildung zweier Messwerte – ergibt sich folgendes Schema (Tabelle 1):

Tab. 1: Schematische Darstellung der Monte-Carlo-Methode

Originalrechnung	A	B	$C = (A + B) / 2$
1. Variation	$A + X_1$	$B + Y_1$	$C_1 = (A+X_1 + B+Y_1) / 2$
2. Variation	$A + X_2$	$B + Y_2$	$C_2 = (A+X_2 + B+Y_2) / 2$
3. Variation	$A + X_3$	$B + Y_3$	$C_3 = (A+X_3 + B+Y_3) / 2$
...
n. Variation	$A + X_n$	$B + Y_n$	$C_n = (A+X_n + B+Y_n) / 2$

A und B sind die gemessenen Werte, C ist der daraus abzuleitende Mittelwert.

Die Messwerte A und B haben unbekannte Messabweichungen (X bzw. Y), weshalb das Ergebnis C ebenfalls nicht genau angegeben werden kann.

Mit der Monte-Carlo-Methode wird nun *probiert*, zu welchen Ergebnisabweichungen zufällig angenommene Messabweichungen ($X_1 \dots X_n$ bzw. $Y_1 \dots Y_n$) führen würden. Mit der steigenden Anzahl von Versuchen (Anzahl der Zeilen in der obigen Tabelle 1) ergibt sich ein immer schärferes Bild, in welchem Bereich und mit welcher Verteilungsfunktion die erhaltenen Ergebnisse ($C_1 \dots C_n$) streuen.

Zusammengefasst:

Die vorzeichenbehaftete Zufallszahl X_i entspricht der unbekanntem Messabweichung der Messgröße A, die ebenfalls vorzeichenbehaftete Zufallszahl Y_i entspricht der unbekanntem Messabweichung der Messgröße B.

Die individuellen Variationsbereiche und die zugrunde liegenden Verteilungsfunktionen der Zufallszahlen X_i und Y_i ergeben sich aus den als bekannt vorauszusetzenden statistischen Unsicherheiten der Messgrößen A und B

Die Ergebnisspalte kann mit den üblichen statistischen Methoden ausgewertet werden. Neben der Zahlenangabe der Messunsicherheit des Ergebnisses C können auch die Verteilungsfunktion (über eine Klassierung) und ggf. weitere statistische Größen berechnet und visualisiert werden.

Wie eingangs erwähnt, wird zur Unsicherheitsbestimmung komplexer Gleichungssysteme mit der Monte-Carlos-Methode zwar eine recht hohe Rechenleistung benötigt, allerdings ist der Aufwand zur Erstellung einer solchen Berechnungsmatrix mit Standardtools wie Microsoft Excel vergleichsweise gering, deutlich geringer als z. B. die Erstellung eines Rechenmodells, das die Kriterien der VDI 2048 erfüllen muss. Bei einer entsprechend hohen Versuchsanzahl (Zeilenanzahl in Excel) ist die berechnete Ergebnisunsicherheit für die Praxis ausreichend genau, nachvollziehbar und belastbar.

3. Vorgehen am Beispiel eines Braunkohlekraftwerkes

Basis für das nachfolgend vorgestellte Beispiel ist ein Braunkohlekraftwerk mit ca. 800 MW Nennleistung. Zur anschaulichen Demonstration der Methodik wurde für diesen Beitrag der Gütegrad des Gesamtprozesses bezogen auf den Blockwirkungsgrad ausgewählt.

Der Datensatz, welcher für die Untersuchungen verwendet wurde, bildet den Prozess bei Nennleistung ab. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf diesen Datensatz, dazu zählen alle in das PGÜ-System importierten Messwerte aus der Leittechnik und das zugehörige Epsilon-Modell einschließlich der dort hinterlegten Parameter.

3.1. Sensitivitätsanalyse

Zur Beleuchtung der Auswirkungen möglicher Messabweichungen auf den Gütegrad wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der die individuellen Einflüsse aller relevanten Eingangsgrößen sowohl auf den Ist-Wirkungsgrad als auch auf den Soll-Wirkungsgrad betrachtet wurden. Hierzu wurden alle 177 Messwerte, die im vorliegenden Fall für die Modellrechnung notwendig sind, einzeln um einen Betrag von jeweils 1 % verändert. Für jeden einzelnen veränderten Messwert wurde eine Modellrechnung durchgeführt und auf diese Weise die resultierende Änderung des Wirkungsgrades berechnet.

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 2 ausschnittsweise dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich auf die Eingangsgrößen mit einer signifikanten Sensitivität.



Abb. 2: Sensitivitätsanalyse für den Ist-Bruttowirkungsgrad

Aus Abbildung 2 ist klar erkennbar, dass der Speisewassermassenstrom (CF_SPW_vor_DE) und die Generatorleistung (P_Klemme) den größten Einfluss auf den Ist-Wirkungsgrad aufweisen, gefolgt von den Parametern für den Frisch- und den Zwischendampf sowie den Anzapftemperaturen. Für den Referenzwirkungsgrad (Soll-Wirkungsgrad) stellen sich die Zusammenhänge noch einfacher dar: Aufgrund der hohen Abhängigkeit von erstellten Kennlinien, die wie konstante Parameter behandelt werden, ist der Soll-Wirkungsgrad praktisch nur von den äußeren Einflüssen (Umgebungsbedingungen) und der Klemmenleistung abhängig. Das entspricht auch der Definition und dem gewünschten Ziel der Referenzrechnung in Prozessgüteüberwachungssystemen. Der Speisewassermassenstrom ist hier keine unabhängige Eingangsgröße, da dieser

ausgehend von der Klemmenleistung im Modell berechnet wird. Somit hat der Speisewassermassenstrom im Gegensatz zum Ist-Wirkungsgrad keinen Einfluss auf den Soll-Wirkungsgrad.

3.2. Abschätzung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen

Als Vorbereitung für die Durchführung der Monte-Carlo-Berechnungen müssen die Messunsicherheiten aller einzelnen Messwerte ermittelt werden. Zur Demonstration der Methodik wurde im vorliegenden Fall eine einfache Klassifizierung nach bestimmten Messwertkategorien vorgenommen. Die für das Beispiel angenommenen Messunsicherheiten sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2: Angenommene relative Messunsicherheiten

relative Messunsicherheiten			
Massenströme	kg/s		2,50%
Temperaturen	°C		0,50%
Drücke	bar		1,00%
Leistung	MW	kW	0,30%
Sonstiges			1,00%

Für detaillierte Untersuchungen sollte eine weitere Differenzierung der Messunsicherheiten vorgenommen werden. So sind z. B. die Unsicherheiten von Massensstrommessstellen mit Wirkdruckgebern im Wasserbereich meist deutlich geringer als im Dampfbereich und hängen auch stark von den örtlichen Gegebenheiten wie Einlaufstrecken etc. ab.

3.3. Realisierung der Monte-Carlo-Berechnung mittels Epsilon und Excel

Die Monte-Carlo-Matrix kann in einfacher Weise mittels Microsoft Excel erstellt werden. Das Epsilon-basierte PGÜ-System weist eine entsprechende Schnittstelle auf, sodass kein weiterer Programmieraufwand erforderlich ist.

Wie in Tabelle 1 erläutert, wird jedem Messwert und jedem Ergebniswert eine Spalte des Tabellenblatts zugeordnet. Die benötigte Zeilenanzahl der Tabelle ergibt sich aus der Anzahl der gewünschten Variationen (im vorliegenden Beispiel waren es bis zu 30.000).

Zur zufälligen Variation der Messwerte von Zeile zu Zeile können Standardfunktionen von Excel genutzt werden. Um die Messwertvariation einer Normalverteilung zu simulieren, eignet sich z. B. folgende einfache Formel:

$$=NORM.INV(ZUFALLSZAHL();\textit{Messwert};\textit{Standardabweichung})$$

Die kursiv gedruckten Begriffe stehen hier als Platzhalter für Verweise auf die korrespondierenden Zellen, in denen die Original-Messwerte und deren Unsicherheiten eingetragen sind und die vorzugsweise in den Kopfzeilen der Tabelle angeordnet sein sollten.

Die folgende Abbildung 3 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus einem solchen (in der Praxis recht umfangreichen) Tabellenblatt.

KKS	bar	bar	bar	bar	kg/s	kg/s	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar
Einheit	bar	bar	bar	bar	kg/s	kg/s	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar
Messwert	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
MU	0,0005	0,1070	0,1367	0,1145	0,1523	0,0000	1,8608	0,1009	4,5036	2,5958	3,6142	0,1916	2,2709	2,6843	2,7159	0,0186	0,0186		
@ExecutionTime	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec	spec
15:24:07	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:13	0,0497	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:17	0,0492	10,8114	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:22	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:27	0,0492	10,7043	13,6706	11,5881	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:33	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,3841	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:37	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:42	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	187,9436	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:47	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,1943	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:52	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	454,8876	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:24:57	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	262,1724	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:02	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	365,9212	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:07	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,3443	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:12	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	229,3636	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:17	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	271,1123	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:22	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	274,3066	1,8648	0,1864		
15:25:28	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:33	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:38	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:44	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:50	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:25:55	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:01	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:07	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:12	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:18	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:24	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:29	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:35	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:40	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:46	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:51	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:26:57	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:27:02	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:27:08	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		
15:27:13	0,0492	10,7043	13,6706	11,4536	15,2318	0,0000	186,0830	10,0933	450,3640	259,5767	361,4170	18,1627	227,0927	268,4280	271,5907	1,8648	0,1864		

Abb. 3: Beispiel einer Monte-Carlo-Matrix für die Eingangsdaten

Die Übertragung der zufällig variierten Messdaten in das thermodynamische PGÜ-Modell, die Auslösung der einzelnen Berechnungen und die Rückübertragung der Ergebnisse in das Excel-Tabellenblatt erfolgen mit einer entsprechend vorbereiteten Script-Steuerung.

3.4. Ergebnisse der Monte-Carlo-Berechnungen

Entsprechend den zufälligen Streuungen der in die Kreisprozessrechnung eingehenden Messwerte streuen auch die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen.

Mit steigender Anzahl der durchgeführten Berechnungen nähert sich die statistische Verteilung der Ergebnisse immer mehr der Normalverteilung an. Es zeigt sich die typische Form der Gaußschen Glockenkurve, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisspalten können wiederum in Excel mit Standard-Statistik-Funktionen ausgewertet werden. Die Messunsicherheit eines Ergebnisses, im Beispiel des Gütegrades, berechnet sich aus dessen Standardabweichung, multipliziert mit dem Erweiterungsfaktor $K = 1,96$ (95 %-Konfidenzintervall).

Für das Beispiel des Gütegrades des Blockwirkungsgrades ergibt sich eine absolute statistische Unsicherheit von ca. 2,5 %-Punkten. Hierbei ist bemerkenswert, dass sich dieses Ergebnis trotz der hohen Variablenanzahl (Messstellenanzahl) des Modells bereits bei einer vergleichsweise niedrigen Anzahl von Rechenläufen ergibt, was ein Indiz für die Belastbarkeit dieses Ergebnisses ist.

Tab. 3: Ergebnis der Messunsicherheitsabschätzung

Anzahl der Berechnungen	Abgeschätzte Ergebnisunsicherheit
1.000	2,47 %Pkt
5.000	2,51 %Pkt
19.999	2,49 %Pkt
29.997	2,48 %Pkt

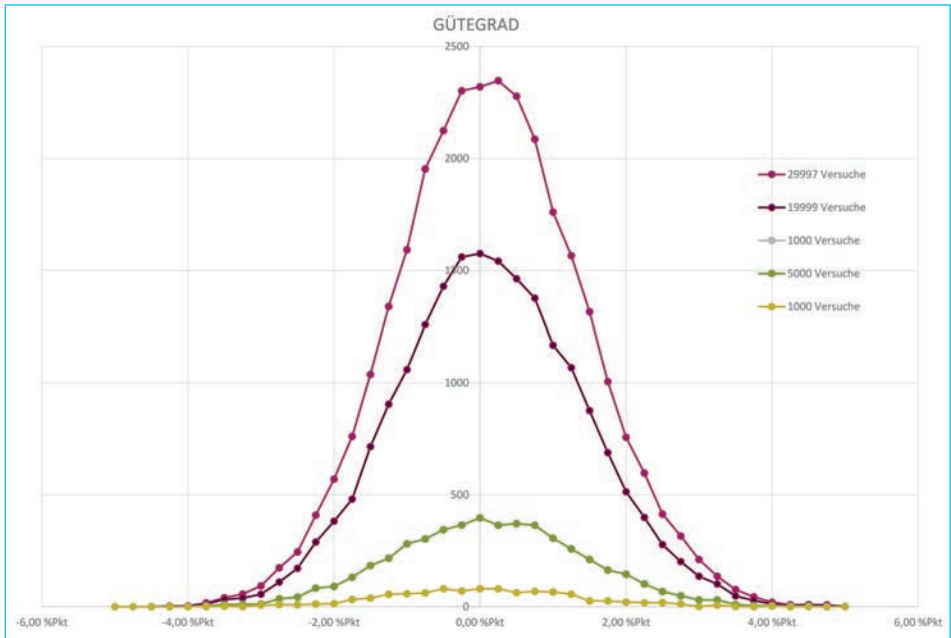


Abb. 4: Ergebnisdarstellung der Gütegradberechnung nach Monte-Carlo

4. Ergebnisdiskussion

Die Messunsicherheit des Gütegrades resultiert im vorliegenden Beispiel hauptsächlich aus dem starken Einfluss der Massenstrommessungen. Dies hat folgende Ursachen:

- Bereits die zu Beginn durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, dass der Hauptmassenstrom und die Klemmenleistung den höchsten Einfluss auf den Gütegrad aufweisen.
- Den Massenströmen wurde im Beispiel eine einheitliche, vergleichsweise hohe Messunsicherheit ($\pm 2,5 \%$) zugeordnet. Die tatsächliche Messunsicherheit dieser Messstellen (und damit die Ergebnisunsicherheit des Wirkungsgrad-Gütegrades) können in der Praxis deutlich geringer ausfallen.
- Durch die geringere Messunsicherheit der elektrischen Generatorleistung fällt diese für die Bestimmung der Messunsicherheit des Gütegrades weniger ins Gewicht.

Ausgehend vom Gütegrad und dessen berechneter Messunsicherheit ist es nun möglich, die Konsequenzen für die Genauigkeit des berechneten Wärmeverbrauchs des Blockes abzuleiten. Aus vorliegenden Analysen zum Einfluss des Gütegrades ist bekannt, dass sich mit dessen Verringerung um einen Prozentpunkt der Brennstoffwärmeverbrauch des Blockes um circa 20 MW erhöht. Folglich wäre die im vorgestellten Beispiel mit der Monte-Carlo-Methode berechnete Unsicherheit des Gütegrades mit einer Unsicherheit des Brennstoffwärmeverbrauchs von ca. ± 50 MW verbunden! Dieser hohe Unsicherheitswert könnte letztlich die Aussagekraft des Prozessgüteüberwachungssystems infrage stellen! In der Praxis ist dieses scheinbar ernüchternde Ergebnis zu relativieren.

- In PGÜ-Systemen werden hauptsächlich die Veränderungen des Prozesses beobachtet und bewertet.

Ein großer Teil der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen (Messwerte) eines PGÜ-Systems ist systematischer Natur, d. h. die unbekannte Messabweichung ändert sich nicht über die Zeit. Für die zeitliche Veränderung des Gütegrades ist der dominierende systematische Messunsicherheitsanteil also unerheblich.

Beispiel: Auch bei einer Massenstrommessstelle mit einer absoluten Messunsicherheit von 2,5 % können Massenstromänderungen von z. B. 0,1 % sicher identifiziert und entsprechende Auswirkungen auf den Gütegrad objektiv bewertet werden.

- Kurzzeitige und sporadische Veränderungen des Gütegrades haben zwar durch die relativ hohe absolute Unsicherheit eine geringere Aussagekraft, jedoch wird dies bei der ingenieurtechnischen Auswertung in der Regel ausreichend berücksichtigt.

In vielen Ergebnisdarstellungen wird dieser Tatsache z. B. auch dadurch Rechnung getragen, dass erst nach einem längeren Abfall des Gütegrades dieser in der Darstellung als auffällig markiert wird.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Monte-Carlo-Methode ist es möglich, die Messunsicherheit prozesstechnischer KPIs in Monitoring-Systemen einfach und sicher abzuschätzen. Eine vorgeschaltete Sensitivitätsanalyse ist vor allem für die spätere Ergebnisbewertung vorteilhaft, da dadurch die erforderliche Bewertung der Einflussfaktoren erleichtert wird. (Für die eigentliche Anwendung der Monte-Carlo-Rechnungen ist die Sensitivitätsanalyse nichtzwingende Voraussetzung, da hierbei die Anzahl der unterschiedlichen Rechnungen entscheidend ist und die zufällige Variation auch von Eingangswerten mit geringem Einfluss auf das Ergebnis keinen Zusatzaufwand bedeutet.)

Für das vorliegende Beispiel ist festzustellen, dass die relativ hohe Messunsicherheit des Gütegrades für den Blockwirkungsgrad von ca. 2,5 %-Punkten sich hauptsächlich aus der Messunsicherheit des Hauptmassenstroms fortpflanzt.

Durch diese (für manche Anwender evtl. unerwartet hohe) Messunsicherheit könnte die Aussagekraft der Gütegrade in Monitoring-Systemen generell infrage gestellt werden. Eine solche pauschale Aussage ist jedoch zu relativieren.

Die aus einem langfristigen Beobachtungszeitraum herausgenommene Betrachtung eines einzelnen Gütegrad-Wertes ist tatsächlich mit einer relativ hohen Unsicherheit verbunden. Einzelne Gütegradwerte nur für einen definierten Zeitpunkt sind deshalb unzureichend für eine Bewertung von Betriebsführung und Instandhaltung. Folglich ist die Nutzung einer breiten Ergebnisdatenbasis eine wichtige Grundlage für die Bewertung von Maßnahmen in Betrieb und Instandhaltung. Längerfristige und stetige Entwicklungen weisen eine deutlich höhere Evidenz auf als ein Einzelwert. Für die Bewertung von Trends spielt die absolute Messunsicherheit der Gütegrade eine deutlich geringere Rolle.

Um die Aussagekraft der Systeme für den Betreiber zu erhöhen, eignen sich Tools zur automatisierten Erkennung von Trends und langfristigen Veränderungen. Auch in der bereits bestehenden Ergebnisdarstellung können Optimierungen bei der Ereignisindikation vorgenommen werden. Im Weiteren sind auch detailliertere Auswertungen für einzelne Systeme mit real in der Anlage abgeschätzten Messunsicherheit der Einzelmessungen sinnvoll, um ein genaueres Bild zu erhalten. Darauf basierend könnten dann auch die Einzelmessungen und die Messwerterfassung optimiert werden, um die Messunsicherheit der KPIs zu verringern. Daraus kann ebenfalls ein Entscheidungsleitfaden für Betriebs- und Instandhaltungsingenieure resultieren.

6. Quellen

- [1] VGB PowerTech e. V.: VGB-Standard Prozessgüte. VGB Standard-S-012-2014-DE, Essen: Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2014.
- [2] VGB PowerTech e. V.: VGB-Standard Elektrizitätswirtschaftliche Grundbegriffe. VGB Standard-S-002_T-01, Essen: Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2011.
- [3] Schulze, F.: Auf dem Weg zum Betrieb 4.0 – Monitoring einer Single-Shaft-Gasturbinenanlage. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2017. Strategien, Anlagentechnik und Betrieb. Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2017, S. 547-556.
- [4] VDI-Richtlinie 2048 Blatt 3: Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen. Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2048, Berlin, 2008.

Anzeige