

Genauigkeit von Messgeräten überwachen

Erkennen von Drifteffekten von Kanälen in Schutzeinrichtungen

In komplexen Schutzeinrichtungen, bei denen mehrere Messsignale durch mathematische Berechnungen zu einem sicherheitsrelevanten Resultat verknüpft werden, können Messfehler das Resultat beträchtlich verfälschen. Bereits eine geringe Verschlechterung der Messunsicherheit muss daher zuverlässig erkannt werden. Es wurde eine Strategie entwickelt, um das Driften von Messsignalen in Schutzeinrichtungen durch Vergleich redundanter Kanäle automatisch zu detektieren. Als partial proof test zwischen Kalibrierungen werden die redundanten Kanäle gegeneinander geprüft. Dazu können in regelmäßigen Abständen die Differenzen der Kanäle bei ungestörten Testsituationen überwacht werden. Die Zuverlässigkeit dieser Methode zur Drifterkennung wurde durch eine Analyse der Fehlerwahrscheinlichkeit verifiziert. Zur Vereinfachung sollen normale Betriebsdaten anstelle definierter Testsituationen verwendet werden. Das erfordert eine hohe Qualität der zu vergleichenden Signale, was in der Praxis wegen Fluktuationen der Messsignale nicht ohne weitere Maßnahmen möglich ist. Daher wurde eine Methode zur Trendanalyse der Signale entwickelt. Dazu werden ein rekursives Tiefpassfilter und ein Differenzierer zur Vorverarbeitung der Signale verwendet, sodass sich die Methode in typischen sicherheitsgerichteten Steuerungen einfach online realisieren lässt.

SCHLAGWÖRTER Schutzeinrichtungen / Messunsicherheit / Drifterkennung / rekursives Filter

Inspection of the uncertainty of measurement instruments in safety instrumented systems

Complex safety instrumented systems that determine a safety-relevant result based on mathematical calculations with many measurands may accumulate a significant uncertainty of the result. Therefore it is necessary to reliably detect even small deviations of the measurement uncertainty. To fulfill this demand, a strategy has been developed to automatically detect drifts that cause higher uncertainty by comparison of redundant channels. As a "partial proof test" between calibrations, the redundant channels are checked against each other. For this purpose, the difference of the channels can be monitored in regular time intervals using undisturbed test situations. The reliability of this method is verified by analyzing the probability of failure on demand. It is advantageous to use normal production data instead of defined test scenarios. However, this requires high quality of the compared signals, which is not met in practical applications because of signal fluctuations. Therefore a method for analyzing the trends of the signals is introduced. A recursive low pass filter and a differentiator for pre-processing of the signals are used so that the method can be realized online in typical safety PLCs easily.

KEYWORDS safety instrumented systems / measurement uncertainty / drift inspection / recursive filter

THOMAS HAUFF, WUSHAN LIANG, MATTHIAS STRAUSS, BASF Ludwigshafen
CHRISTIAN BRECHER, MARKUS OBDEBUSCH, RWTH Aachen

Die Sicherheitsmargen in typischen Schutzzeineinrichtungen, zum Beispiel Druck/Temperatur-Maximum-Abschaltungen, sind in aller Regel durch verfahrenstechnische Betrachtungen gegeben. Die sicherheitstechnisch erforderlichen Messgenauigkeiten sind meist gering gegenüber den tatsächlichen Messgenauigkeiten der Messkette. Fehler der Messkanäle lassen sich daher durch Vergleich der Signale redundanter Kanäle leicht erkennen.

Schutzzeineinrichtungen, bei denen mehrere Messsignale durch mathematische Berechnungen zu einem sicherheitsrelevanten Resultat verknüpft werden [1], müssen genauer betrachtet werden. Die Auswirkungen der Messunsicherheiten der Kanäle auf das Resultat der Berechnungen (Fehlerfortpflanzung) müssen bei der Bestimmung der Sicherheitsmarge berücksichtigt werden und können eine relevante Größenordnung erreichen. Daher stellt sich die Frage, wie groß die sicherheitstechnisch zu berücksichtigenden Messunsicherheiten der Messkette sind und wie sich auch geringe Fehler der Messkette erkennen lassen. Prozess- und einbaubedingte Fehlermöglichkeiten sind ebenfalls zu betrachten, was aber nicht Gegenstand dieses Beitrags ist.

Im Neuzustand sollen die laut Herstellerangaben spezifizierten Messunsicherheiten von nahezu allen Geräten erfüllt werden, was durch Kalibrierungsprotokolle aus dem Produktionsvorgang der Geräte belegbar ist. Die Gültigkeit der Kalibrierung bestätigt die spezifizierte Messgenauigkeit. Die ist aber nur eine Momentangabe und unabhängig von den Anforderungen der IEC 61508 zu sehen, da die Komponenten im produktiven Einsatz nicht unbedingt ihre Initialkalibrierung beibehalten. Im Worst-Case ist das Gerät mit der aus dem Proof-Test beziehungsweise Kalibrierungsintervall und der Mean Time To Fail (MTTF) ableitbaren Wahrscheinlichkeit defekt. Die Safe Failure Fraction (SFF) drückt aus, ob der Fehler gefährlich ist. Der Diagnosegrad beschreibt, ob der Fehler erkennbar ist. Voraussetzung für solche Betrachtungen ist eine Failure Mode Effect and Detection Analysis (FMEDA) [2].

Wie aber wird ein Fehler, der keinen Totalausfall, sondern nur eine geringe Verschlechterung der Messgenauigkeit verursacht, definiert? Drifts stellen einen relevanten Teil dieser Fehler dar: Sie können aufgrund von sich langsam entwickelnden Messgüteveränderungen nach einer Kalibrierung auftreten und möglicherweise das Prozessrisiko verdecken [3]. Wird zum Beispiel erst eine Messunsicherheit von 2 % einer jeden Komponente der Messkette als Fehler definiert, dann ist die Fehlerwahrscheinlichkeit, die zur Probability of Failure on Demand (PFD), siehe Abschnitt 1.2, des Schutzsystems beiträgt, gering. In der gesamten Messkette mit typischerweise drei Komponenten (Messinstrument, Speisegerät und Analogeingangskarte einer Sicherheitssteuerung) addieren sich die Messunsicherheiten aber beträchtlich auf [2].

Wird bereits eine kleinere Abweichung als Fehler definiert, so steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit an. Würde jede Abweichung von der für nicht sicherheitstechnische Anforderungen spezifizierten Genauigkeit bereits als Fehler im Sinne der IEC 61508 angesehen, so müssten bereits solche Abweichungen erkannt oder mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Eine Fehlerart, bei der ein Gerät zwischen Kalibrierungen seine spezifizierte Genauigkeit verliert, müsste also ausgeschlossen oder detektiert werden. Nur dann ließen sich solche Genauigkeiten als Grundlage der Spezifikation von Schutzzeineinrichtungen verwenden.

Bei einer MTTF von zum Beispiel 20 bis 50 Jahren und typischen Kalibrierintervallen im Jahresbereich kann durchaus eine beträchtliche Zahl von Geräten während des Betriebs defekt werden. Die Erkennung dieser Defekte ist jedoch nur aufgrund eines hohen Diagnosegrads der betreffenden Schutzzeineinrichtung möglich. Eine beispielsweise durch Alterungseffekte bedingte Drift ist aber aus Gerätesicht kaum erkennbar, denn es fehlt die Vergleichsgröße. Alterungseffekte, welche beispielsweise durch Qualitätsprobleme von Elektronikbauteilen oder andere Ursachen entstehen, sind aber nach Größe und Häufigkeit schwer vorhersagbar oder quantifizierbar. Betriebsbewährung bezieht sich eher auf Totalausfälle

als auf Drift und ist bezüglich der Qualität von Elektronikbauteilen schwer extrapolierbar. Erhebliche Drift ist also ein Qualitätsproblem, darf aber keine Schutzzeineinrichtungen blockieren. Besonders bei nicht-diversitärer Ausführung redundanter Kanäle kann eine Drift zwischen zwei Kalibrierungszeitpunkten auch mehrere Kanäle betreffen. Ohne zusätzliche Maßnahmen lässt sich also nicht mit sicherheitstechnisch ausreichender Wahrscheinlichkeit ausschließen, dass für nicht-sicherheitsrelevante Anwendungen definierte Qualitätsangaben von Geräten wegen Defekten verletzt werden.

Häufigere Kalibrierung und gegebenenfalls Justierung/Reparatur erhöhen zwar einerseits den Diagnosegrad und verringern die Wahrscheinlichkeit einer unerkannten Drift, sind aber andererseits sehr aufwendig. Es stellt sich die Frage, ob es möglich ist, durch Teilprüfungen zwischen den Kalibrierungen zusätzliche Diagnoseinformationen zu gewinnen. Eine solche Teilprüfung kann beispielweise folgendermaßen realisiert werden:

- Es wird direkt nach der Kalibrierung und anschließend einmal im Monat eine stabile, ungestörte Testsituation erzeugt.
- Die Messdaten der redundanten Kanäle werden aufgenommen.
- Die monatlichen Veränderungen der Differenzen der Messdaten der redundanten Kanäle seit der letzten Kalibrierung werden betrachtet.
- Veränderungen werden als Anzeichen für Drifteffekte in einem oder beiden Kanälen gewertet.

Solche Zwischenprüfungen sind ebenfalls mit einem deutlichen Aufwand verbunden und umso wirkungsvoller, je häufiger sie erfolgen. Es zeigt sich, dass für einen ausreichenden Diagnosegrad der Fehlerart Drift relativ genaue Vergleiche erforderlich sind. Eine automatische Durchführung anhand aktueller Prozessdaten wäre daher wünschenswert. Dazu müssen aber sehr stabile und ungestörte Messdaten vorliegen, was typischerweise im normalen Produktionsablauf nicht der Fall ist. Jedoch besteht die Möglichkeit, mittels geeigneter Filter- und Erkennungsmethoden die Messsignale aufzubereiten [4]. Die hierzu verwendeten Methoden wurden so entworfen, dass sie in typischen sicherheitsgerichteten Steuerungen leicht als Online-Funktionen realisiert werden können. Die automatische Online-Durchführung der regelmäßigen Teilprüfungen mit hohem Diagnosegrad anhand entsprechend aufbereiteter Prozessdaten stellt damit eine Möglichkeit dar, um die Genauigkeit der Messkette sicherzustellen.

1. BERECHNUNG DER FEHLERWAHRSCHEINLICHKEIT

1.1 Vergleich der Messketten zwischen Kalibrierungen

Hier wird als Beispiel eine besonders sensitive Messgröße verwendet: Es handelt sich um die Temperaturdifferenz im Kühlsystem eines Reaktors (Bild 1). Es existieren zwei Kanäle ($T_{A,n}$ und $T_{B,n}$), die jeweils den Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausgang des Kühlsys-

tems/der Kühlflüssigkeit am n-ten Tag messen. Die Differenz dieser beiden Kanäle ($T_{A,n} - T_{B,n}$) wird als Driftindex F_n bezeichnet. Wir betrachten die Differenz zwischen dem Driftindex des ersten Tages (F_1) und dem Driftindex des n-ten Tages (F_n). Weicht F_n um mehr als einen festgelegten Wert von F_1 ab, wurde durch diese Vergleichsstrategie eine Drift detektiert.

Treten Messfehler in der Größe der spezifizierten Genauigkeit auf, entsteht durch die Drifteffekte ein gefährlicher Fehler, siehe Bild 2 linkes Diagramm. Die Vergleichsmethode muss einen Driftalarm auslösen, bevor ein gefährlicher Fehler entsteht. Im Beispiel dieser Arbeit wird ein Alarm gegeben, sobald F_n um mehr als 20 % der spezifizierten Genauigkeit von F_1 abweicht. Dies geschieht jedoch nicht immer rechtzeitig. Wenn beispielsweise $T_{A,n}$ und $T_{B,n}$ in gleicher Richtung und mit ähnlicher Geschwindigkeit driften (Bild 2 rechtes Diagramm), kann ein gefährlicher Fehler unentdeckt bleiben. In Abschnitt 1.2 wird auf die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses näher eingegangen.

Um diesen Vergleich mit der notwendigen Genauigkeit durchzuführen, können – wie bereits erwähnt – geeignete Testsituationen wie ein Nullpunktvergleich bei leerem Reaktor, konstanter Zulauftemperatur des Kühlwassers mit konstantem Durchfluss und abgeschalteter Temperaturregelung verwendet werden.

1.2 Fehlerwahrscheinlichkeits-Analyse (PFD)

Zunächst soll untersucht werden, ob durch solche Teilprüfungen Drifts mit einer hinreichend hohen Wahrscheinlichkeit detektiert werden können. Dabei wird die Fehlerwahrscheinlichkeit (PFD) als die Unverfügbarkeit der Schutzfunktionen einer Schutzzeineinrichtung, die zur Vermeidung von Gefahren für Mensch und Umwelt benötigt werden [5], definiert. Gemäß der Definition des Schutzlevels SIL 3 soll die PFD des Schutzsystems im low demand mode einen geringeren Wert als 10^{-3} aufweisen.

Zur Berechnung der PFD ist eine Modellvorstellung der Driftentwicklung der Messeinrichtungen zwischen zwei Proof-Tests (Kalibrierung) erforderlich. Die Drifts werden hier als linear in der Zeit angenommen. In einer stochastischen Simulation sind Startzeitpunkt und Steigung als durch eine Gaußverteilung gegeben angenommen. Wir gehen davon aus, dass die Kanalabweichungen lediglich durch die Drifts verursacht werden. Zur Vereinfachung nehmen wir außerdem an, dass der anfängliche Driftindex F_1 null beträgt. Nach der Definition in Abschnitt 1.1 gibt es einen Driftalarm zum Zeitpunkt t_1 , wenn der Absolutwert des Driftindex F_n (Differenz der beiden Kanäle) 20 % der spezifizierten Genauigkeit erreicht. Ein gefährlicher Fehler zum Zeitpunkt t_2 tritt auf, wenn die Kanalabweichung die spezifizierte Messgenauigkeit erreicht. Dabei wird der sicherheitstechnisch konservative Wert der redundanten Kanäle genommen, im Beispiel ist das der kleinere Wert. Konsequenterweise sind Drifts in die negative Richtung ungefährlich. Bild 2 zeigt entdeckte beziehungsweise nicht entdeckte gefährliche Fehler einer Schutzfunktion. Nur wenn $t_1 < t_2$, wird der Fehler rechtzeitig entdeckt.

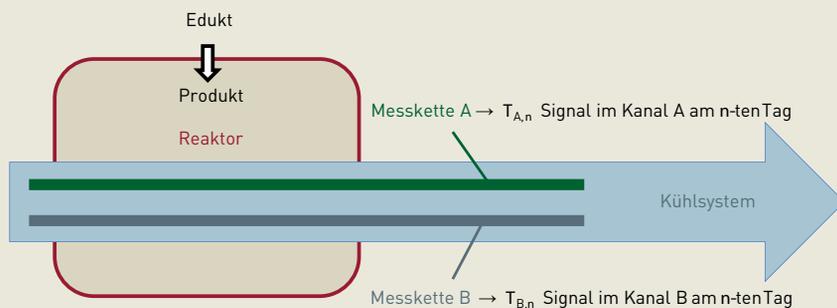


BILD 1:
Reaktor und Kühlsystem

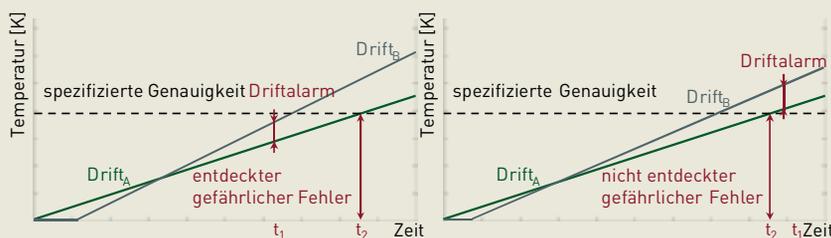


BILD 2:
Entdeckte und nicht entdeckte gefährliche Fehler

Je mehr unentdeckte gefährliche Fehler während der PFD-Analyse auftauchen, desto höher ist die Fehlerwahrscheinlichkeit. Unentdeckte gefährliche Fehler werden hier als Zeitbereiche zwischen t_2 und t_1 mit $t_2 < t_1$ verstanden (siehe Bild 2, rechtes Diagramm). In diesem Fall können Schutzeinrichtungen nicht die benötigten Schutzfunktionen ausführen, da sie die Gefahr nicht rechtzeitig erkennen.

Zur Vereinfachung des Verifikationsprozesses nehmen wir in diesem Beitrag als Fehlermodell an, dass Drifts zufällig entstehen und, wie oben bereits erwähnt, ein lineares Verhalten zeigen. Während mit dieser Einschränkung das Prinzip dargestellt werden kann, sollte zur weiteren Ausarbeitung und Präzisierung der Fehlermodelle die Zusammenarbeit mit Herstellern gesucht werden. Monte-Carlo-Simulationen mit Parametern einer realen Schutzeinrichtung von relativ hoher spezifizierter Genauigkeit und diesem linearen Fehlermodell zeigen, dass eine Fehlerwahrscheinlichkeit kleiner als 10^{-3} erreichbar ist. Es ist also hinreichend unwahrscheinlich, dass in einer redundanten Messeinrichtung beide Kanäle den akzeptablen Messfehler überschreiten, ohne dass vorher die Abweichung beider Kanäle zumindest 20 % dieses Werts erreicht. Vollkommen zeit- und wertgleiche Fehlerentwicklung redundanter Kanäle ist also hochgradig unwahrscheinlich. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Strategie der Drifterkennung zur Fehlerreduktion geeignet ist und mit dieser Strategie Schutzeinrichtungen den SIL 3-Standard erfüllen können.

Neben dem Fehlermodell geht in diese Berechnungen auch das Kalibrierintervall ein. Je länger das Kalibrierintervall, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass ähn-

liche Drifteffekte der redundanten Kanäle zu unzulässigen Messfehlern führen, bevor ihre Abweichungen zu einem Driftalarm führen. Weiterhin steigt die Abhängigkeit der Detektionsrate von den Parametern des Fehlermodells, das heißt, mit zunehmendem Kalibrierintervall wird die Methode weniger robust. Umgekehrt bedeutet das, dass sich anhand dieser Betrachtungen ein geeignetes Kalibrierintervall in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit der Messeinrichtung bestimmen und begründen lässt.

2. REALISIERUNG MITTELS PROZESSDATEN

Es bleibt die Aufgabe, die so definierten Zwischenprüfungen anhand der Prozessdaten aus dem normalen Produktionsablauf durchzuführen. Dazu müssen die Messsignale aufbereitet werden. Insbesondere wird der Trend der Signale benötigt. Als Trend wird dabei die langfristige Entwicklung des Signals ohne zufällige oder betriebsbedingte Abweichungen angesehen. Solche betriebsbedingten Abweichungen redundanter Kanäle können beispielsweise durch den Einbauort in Verbindung mit dynamischen Effekten des Prozesses oder durch unterschiedliche Ansprechgeschwindigkeiten redundanter Messeinrichtungen auftreten. Diese sollen durch geeignete Maßnahmen (siehe Abschnitt 2.1) entfernt werden, um Drifteffekte nicht zu überdecken. Unmittelbar nach der Kalibrierung sind die Abweichungen der Trends beider redundanter Kanäle durch die Differenzen der Kanäle gemäß Kalibrierungsprotokoll gegeben. Sind bis zur nächsten Kalibrierung keine Drifteffekte zu beobachten, so kann mit hoher

Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass der Zustand der Geräte sich gegenüber dem Kalibrierungszeitpunkt nicht verändert hat.

Bild 3 zeigt drei charakteristische Eigenschaften des Signals, die dies erforderlich machen. Das Signal und der Driftindex sind verrauscht und von starken dynamischen Effekten beeinflusst, vor allem während ungeeigneten Prozesszuständen (siehe Abschnitt 3.3). Weiterhin ist der Driftindex aufgrund von Schwankungen, die selbst dann auftreten, wenn die Signale in beiden Kanälen einen regulären Verlauf zeigen, nicht stationär. Schließlich ist die Spanne des Driftindexes so groß (einige Kelvin), dass es unmöglich ist, sehr kleine Änderungen (im mK-Bereich) genau genug zu entdecken.

Daher ist es notwendig, die Signale aufzubereiten, um vergleichbare und sinnvolle Trends zu erhalten. Mit diesen Trends, welche eine schmalere Spanne und ein geringeres Rauschen aufweisen, kann der zuvor beschriebene Vergleich durchgeführt werden.

2.1 Rekursive Filter und Differenzierer zur Signalaufbereitung

Gleitende Mittelwertbildung ist eine typische Methode, um Fluktuationen aus Signalen zu entfernen und Trends zu ermitteln. Jedoch benötigt diese Methode relativ viel Speicher und Rechenleistung und ist in einer grafischen Programmierumgebung aufwendig zu implementieren, siehe Bild 4. Daher wird eine exponentiell gewichtete gleitende Mittelwertbildung verwendet, die durch ein rekursives Tiefpassfilter realisierbar ist. Ein Tiefpassfilter lässt tiefe Frequenzen passieren, filtert hohe Frequenzen aus oder schwächt sie ab [6] und kann dadurch den Trend vom Originalsignal trennen [7].

Rekursive Filter, wie in Bild 5 zu sehen, brauchen weniger Funktionsbausteine, weniger Rechenleistung und geringere Speicherkapazitäten im Vergleich zu gleitenden Mittelwertfiltern. Der in Bild 5 ebenfalls dargestellte Differenzierer wird in den folgenden Abschnitten benötigt.

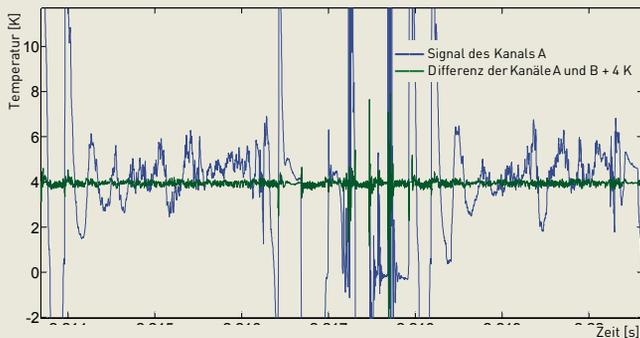
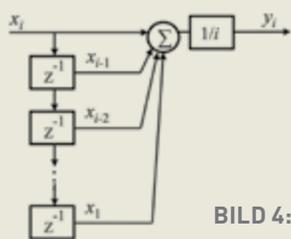
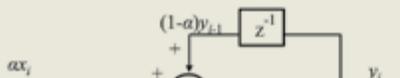


BILD 3: Beispiel des Signals des Kanals A (blau) und der Differenz der Kanäle A und B +4 Kelvin (grün)

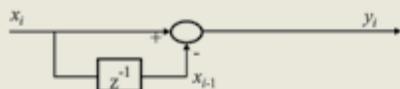


Gleitendes Mittelwertfilter:
 $y_i = \frac{1}{l} (x_1 + x_2 + \dots + x_{l-1})$

BILD 4: Gleitendes Mittelwertfilter



Rekursives Tiefpassfilter:
 $y_i = \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1}$



Differenzierer:
 $y_i = x_i - x_{i-1}$

BILD 5: Rekursives Tiefpassfilter und Differenzierer

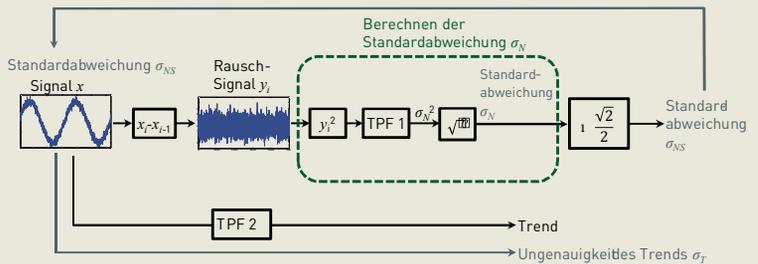


BILD 6: Berechnung des Trends und dessen Unsicherheit

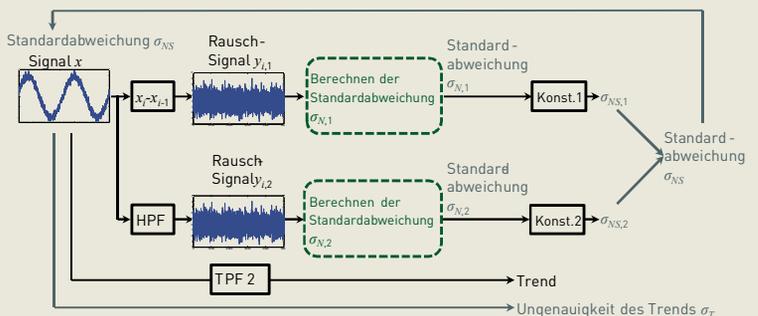


BILD 7: Erweiterung der Berechnung des Trends und dessen Unsicherheit

2.2 Zuverlässigkeit des Trendsignals

Das Originalsignal des Driftindex enthält zwei Komponenten: das Trendsignal und das Rauschen. Zur Gewinnung des Trendsignals kann das Rauschen durch einen Tiefpassfilter vom Originalsignal abgetrennt werden. Vor der Nutzung für den Trendvergleich muss jedoch verifiziert werden, inwieweit das Originalsignal durch das Trendsignal repräsentiert wird. Hierzu muss die Genauigkeit des Trends berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Rauschkomponente des Ursprungssignals. Lässt sich die Standardabweichung des Rauschens berechnen, kann auch die Genauigkeit des Trends (σ_T) ermittelt werden. Die Beziehung der beiden Ergebnisse ist durch die Rauschübertragungsfunktion des Tiefpassfilters gegeben (siehe Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Standardabweichung der Rauschkomponente des Originalsignals σ_{NS}

Die Standardabweichung (σ_{NS}) der Rauschkomponente des Originalsignals kann durch Differenzierung, Berechnung der Standardabweichung des Resultats und Rückrechnung gemäß der Rauschübertragungsfunktion erfasst werden (Bild 6).

Zunächst benutzen wir einen Differenzierer, um den Trend des Signals zu entfernen. Das Rauschsignal y_i am Ausgang des Differenzierers hat ähnliche Eigenschaften wie die Rauschkomponente des Originals. Deswegen kann, nachdem die Standardabweichung σ_N von y_i berechnet wurde, die Standardabweichung (σ_{NS}) der Rauschkomponente abgeschätzt werden.

Als Erweiterung können anstelle des Differenzierers oder zusätzlich auch ein oder mehrere Hochpassfilter verwendet werden (Bild 7). Ein Hochpassfilter in rekursiver Konstruktion lässt sich durch einen Differenzierer und ein Tiefpassfilter darstellen. Der Aufwand für eine Online-Realisierung ist damit gering. Ähnlich wie in [8] ist es dann möglich, durch Vergleich der rückgerechneten Standardabweichungen aus zwei Filtern verschiedener Übertragungsfunktionen abzuschätzen, ob das Rauschen des Originalsignals gaußverteilt ist, um weitere Analysen durchzuführen.

2.2.2 Standardabweichung σ_N des Rausch-Signals

Die Berechnung der Standardabweichung des Rausch-Signals σ_N erfolgt durch Quadrieren des Resultats (y) des Differenzierers und Aufaddieren in einem Tiefpassfilter TPF 1, das eine exponentiell gewichtete Summe bildet (Bild 6). Wie im R-Test [7] kann ein rekursives Tiefpassfilter genutzt werden, um die Standardabweichung einer Stichprobe zu berechnen (siehe Gleichung 1).

$$\sigma_{N,i}^2 = \alpha (y_i - \bar{Y}_N)^2 + (1 - \alpha) \sigma_{N,i-1}^2 \quad (1)$$

y_i = Rausch-Signal nach Differenzierer/
Hochpassfilter

\bar{Y}_N = Mittelwert des Rausch-Signals
 α = Parameter des Tiefpassfilters TPF 1
 $\sigma_{N,i}$ = Standardabweichung des Rausch-Signals

\bar{Y}_N ist der Mittelwert des gefilterten Rauschsignals. Er ist sehr klein und kann mit hinreichender Genauigkeit vernachlässigt werden. Es ist daher möglich, die Standardabweichung des Rauschsignals mit Gleichung (2) zu berechnen. Der Ausgang des Tiefpassfilters TPF 1 ist das Quadrat der Standardabweichung des Rausch-Signals y_i .

$$\sigma_{N,i}^2 = \alpha y_i^2 + (1 - \alpha) \sigma_{N,i-1}^2 \quad (2)$$

2.2.3 Beziehungen zwischen σ_N , σ_{NS} und σ_T

Aus σ_N kann so die Standardabweichung σ_{NS} des Originalsignals berechnet werden und daraus die Unsicherheit σ_T des Trends (siehe Bild 6). Die Beziehungen zwischen den drei Parametern ergeben sich aus den mathematischen Beschreibungen des Tiefpassfilters TPF 2 und des Differenzierers und gegebenenfalls eines Hochpassfilters.

Gleichung (3) zeigt die mathematische Beschreibung eines Tiefpassfilters.

$$y_i = \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1}, y_0 = 0, \quad (3)$$

y_i = Ausgang des Tiefpassfilters
 x_i = Eingang des Tiefpassfilters
 α = Parameter des Tiefpassfilters, $0 < \alpha < 1$

Dies kann folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\begin{aligned} y_i &= \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1} \\ &= \alpha x_i + (1 - \alpha) [\alpha x_{i-1} + (1 - \alpha) y_{i-2}] \\ &= \dots \\ &= \alpha \cdot \sum_{k=0}^i (1 - \alpha)^k \cdot x_{i-k} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Standardabweichung ist unabhängig vom Index der Zufallsvariablen. Außerdem gilt:

$$\sigma_{(cx)} = |c| \cdot \sigma_x; \quad \sigma_{(ax+by)} = \sqrt{a^2 \sigma_x^2 + b^2 \sigma_y^2} \quad (5)$$

x_i, y_i = Zufallsvariablen
 σ_x, σ_y = Standardabweichungen der Zufallsvariablen
 a, b, c = konstant.

Aus den Gleichungen (4) und (5) kann (6) abgeleitet werden. Diese erklärt die Beziehung zwischen den Standardabweichungen des Eingangs und des Ausgangs am Tiefpassfilter. Voraussetzung dafür ist die Gaußverteilung der Rauschkomponente des Eingangssignals.

$$\sigma_y = \sigma_x \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2 - \alpha}} \quad (6)$$

σ_x = Standardabweichung des Eingangs
 σ_y = Standardabweichung des Ausgangs

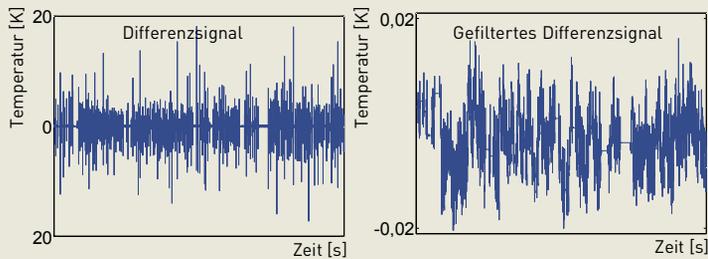


BILD 8: Ungefiltertes und gefiltertes Differenzsignal der redundanten Kanäle (ein Monat)

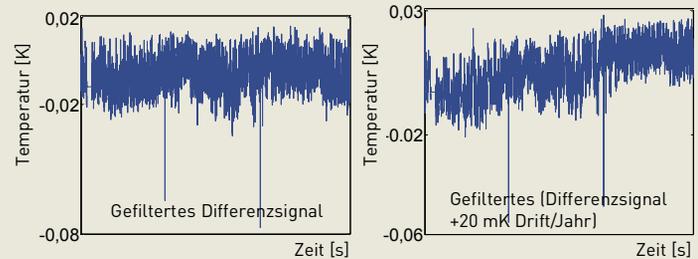


BILD 9: Gefiltertes Differenzsignal mit bedingter Filterung mit und ohne Drift (ein Jahr)

Der in Bild 5 gezeigte Differenzierer kann durch Gleichung (7) beschrieben werden.

$$y_i = x_i - x_{i-1}, y_0 = 0, \quad (7)$$

y_i = Ausgang des Differenzierers
 x_i = Eingang des Differenzierers

Die Beziehung zwischen der Standardabweichung des Eingangs und des Ausgangs kann gemäß den Gleichungen (5) und (7) berechnet werden.

$$\sigma_y = \sqrt{2} \cdot \sigma_x \quad (8)$$

σ_x = Standardabweichung des Eingangs
 σ_y = Standardabweichung des Ausgangs

2.3 Bedingte Filterung und Ergebnisse der Signalaufbereitung

Für den Fall, dass die Unsicherheit des Trends geringer als eine festzulegende obere Grenze ist, kann der durch das Tiefpassfilter gewonnene Trend verwendet werden, um das Originalsignal zu approximieren. Das Trendsignal lässt sich dann zur Drifterkennung nutzen, wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt. Für kontinuierlich arbeitende Anlagen ist das eine tragfähige Lösung.

Demgegenüber gibt es in einer Batch-Anlage verschiedene Prozesszustände. In manchen Zuständen (zum Beispiel beim Anfahren der Anlage) oder Betriebsarten, in denen die Schutzfunktion gar nicht benötigt wird, beispielsweise Entleerung des Reaktors nach Abschluss der Reaktion, ist die Rauschkomponente normalerweise groß. Es ist dann nicht sinnvoll, einen Trendvergleich durchzuführen. Daher kann die Filterung von Betriebsbedingungen abhängig gemacht werden, sodass das Tiefpassfilter nur dann aktiv ist, wenn sich der Prozess in einem normalen Zustand befindet und sonst den Wert hält. Die dafür benötigte Erkennung geeigneter Betriebs-

bedingungen kann anhand von Statussignalen oder der Trendunsicherheit erfolgen. Die Zeitdauer der ungeeigneten Betriebszustände muss überwacht werden, da sonst die Drifterkennung nicht mehr sichergestellt ist.

Bild 8 zeigt das Differenzsignal der redundanten Kanäle vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung bei dem eingangs genannten Beispiel eines Kühlkreislaufs.

Durch das gefilterte Signal, welches nun eine schmalere Spanne hat, können Drifts mit kleinerer Amplitude detektiert werden (siehe Bild 9). Das linke Diagramm zeigt dasselbe, so gefilterte Signal in einem Jahr, bei dem rechten Bild wurden dem Verlauf des Signals 20 mK Drift dazu addiert, bevor es gefiltert wurde. Die Drift ist klar detektierbar.

FAZIT UND AUSBLICK

Eine Methode zur Verbesserung des Entdeckungsgrads der Drift von Messketten wurde in diesem Beitrag präsentiert. Zuerst wurde eine Strategie zur Drifterkennung durch Teilprüfungen zwischen Kalibrierungen vorgestellt. Die Zuverlässigkeit wurde durch Abschätzung der PFD mittels stochastischer Simulation ermittelt. Dazu wurde ein einfaches Fehlermodell für die Komponenten der Messkette genutzt. Darauf aufbauend wurde ein leicht implementierbarer Filter-Mechanismus entwickelt, um diese Zwischenprüfungen automatisiert anhand von Prozessdaten anstelle dedizierter Testszenarien durchzuführen. Diese Lösung kann in Standard-PLCs programmiert werden.

Drei weiterführende Aspekte sind wichtig:

- Das Fehlermodell sollte optimiert werden, indem Praxisdaten aus Kalibrierungen, Alterungsversuchen etc. einfließen. Damit wäre eine verbesserte Abschätzung des statistischen Zusammenhangs zwischen Differenzen redundanter Messkanäle und dem absoluten Fehler der Messkanäle möglich. Kalibrierintervalle lassen sich dann unter Nutzung der vorgestellten Methode in Abhängigkeit von der

geforderten Genauigkeit der Messeinrichtung bestimmen und praxisgerecht begründen.

- Ist die Sensitivität der berechneten Größe gegenüber den Unsicherheiten der physikalischen Größen bekannt (zum Beispiel online berechenbar oder linear modellierbar), dann kann die Unsicherheit der berechneten Größe aus den Messunsicherheiten der physikalischen Größen bestimmt werden. Wenn die Unsicherheiten der physikalischen Größen aus den aktuellen Differenzen der Signale der redundanten Messketten abgeschätzt werden können, dann kann die Auswirkung von Drifteffekten auf die berechnete Größe online abgeschätzt werden.
- Prozess- und einbaubedingte Fehler können dazu führen, dass die beschriebene Methodik hohe Abweichungen anzeigt, die nicht durch Fehler der Messkette selbst verursacht werden. Daraus lassen sich gegebenenfalls Erkenntnisse über Messbedingungen gewinnen und Optimierungspotenzial ableiten. Im Rahmen der Inbetriebnahme kann eine derartige Analyse wertvolle Hinweise auf Realisierungsschwachstellen geben.

MANUSKRIPTEINGANG
21.05.2012

Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

REFERENZEN

- [1] Haase, S., Hablawetz, D., Hauff, T., Krauß, M., Lenhart, F.: Komplexe PLT-Schutzeinrichtungen, atp edition – Automatisierungstechnische Praxis 54(1-2), S. 54-60, 2012
- [2] DIN EN 61508: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems, 2011
- [3] Resso, M., Bogatine, E.: Signal Integrity Characterization Techniques. IEC, 2009
- [4] Anonym: Method for Supervising Measurement Instrumentation Devices, 2012, <http://ip.com>, IP.com number: IPCOM000218485D
- [5] DIN EN 61511-3: Functional Safety - Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Part 3: Guidance for the Determination of the Required Safety Integrity Levels, 2005
- [6] Wörn, H.: Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. Springer, 2005
- [7] Cao, S.; Rhinehart, R.: An Efficient Method for Online Identification of Steady State. Journal of Process Control 5(6), S. 363-374, 1995
- [8] Bebar, M.: Regelgütebewertung in kontinuierlichen verfahrenstechnischen Anlagen anhand vorliegender Messreihen, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2005. <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de>

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. **CHRISTIAN BRECHER** (geb. 1969) leitet seit 2004 den Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen am WZL der RWTH Aachen und ist seit 2013 geschäftsführender Direktor des Werkzeugmaschinenlabors. Seine Forschungsgebiete umfassen die Bereiche Maschinentechnik, Steuerungstechnik und Getriebetechnik.

RWTH Aachen,
Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
Steinbachstr. 19, D-52074 Aachen,
Tel. + 49 (0) 241 802 74 07,
E-Mail: c.brecher@wzl.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. **THOMAS HAUFF** (geb. 1960) ist im Fachzentrum Automatisierungstechnik der BASF SE auf dem Arbeitsgebiet der Prozessleittechnik tätig. Themengebiete sind unter anderem Qualitätssicherung, technische Evaluierung und Consulting für Automatisierungslösungen. Er ist Obmann des Namur AK 2.11.

BASF SE,
D-67056 Ludwigshafen, Tel. +49 (0) 621 602 03 26,
E-Mail: thomas.hauff@basf.com

M. Sc. **WUSHAN LIANG** (geb. 1986) ist seit 2012 im Fachzentrum Automatisierungstechnik der BASF SE in Ludwigshafen tätig. Die vorliegende Arbeit basiert auf ihrer Masterarbeit, die bei BASF angefertigt und von der RWTH Aachen betreut wurde. Sie befasst sich mit der Implementierung modellbasierter Schutzkonzepte.

BASF SE,
D-67056 Ludwigshafen, Tel. + 49 (0) 621 607 32 44,
E-Mail: wushan.liang@basf.com

Dipl.-Ing. **MARKUS OBDENBUSCH** (geb. 1986) arbeitet seit 2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der RWTH Aachen. Seine Forschungsgebiete umfassen die automatisierte Anlagendiagnose und Inbetriebnahme von Produktionsmaschinen im Maschinenbau.

RWTH Aachen,
Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
Steinbachstr. 19, D-52074 Aachen,
Tel. + 49 (0) 241 802 82 36,
E-Mail: m.obdenbusch@wzl.rwth-aachen.de

Dipl.-Phys. **MATTHIAS STRAUSS** (geb. 1986) arbeitet auf den Gebieten der Überwachung sicherheitsrelevanter Messeinrichtungen und modellbasierte Schutzsysteme.

BASF SE,
D-67056 Ludwigshafen,
Tel. +49 (0) 621 609 17 25,
E-Mail: matthias.strauss@basf.com