

Verbesserung der Messgenauigkeit in rechnergesteuerten Mess- und Prüfsystemen

Accuracy Improvement in Computer Controlled Measuring and Test Systems

J.-G. Liu, ChenYang-Ingenieurbüro, Erding

Manuskripteingang: 28. Januar 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 07. Juni 2002.

Die Verbesserung der Messgenauigkeit durch Signalverarbeitung und Selbstkalibrierung spielt eine wichtige Rolle in der rechnergesteuerten Mess- und Prüftechnik. In diesem Beitrag werden adaptive Filterung, selbstkalibrierende Messverfahren und selbstkorrigierende Algorithmen zur Reduktion von Messabweichungen dargelegt. Die adaptive Filterung eignet sich für die Rauschunterdrückung periodischer und periodisch fortgesetzter Signale, deren Spektrum sich mit dem Rauschspektrum überlagert. Die selbstkalibrierenden Messverfahren basieren auf Selbstkalibrierung unter Nutzung der in einem Messsystem integrierten Referenzelemente bzw. -größen. Nach der Selbstkalibrierung werden Messabweichungen durch Signalverarbeitung automatisch kompensiert, sodass die Messgenauigkeit des resultierenden Systems gegenüber dem Originalsystem verbessert werden kann. Durch den selbstkorrigierenden Algorithmus können die durch digitale Signalverarbeitung hervorgerufenen Messabweichungen kompensiert werden. Typische Anwendungsbeispiele werden im Beitrag genannt.

Accuracy improvement by using signal processing and self-calibration plays an important role in computer controlled measurement and test technology. In this paper adaptive filtering, self-calibration measuring methods, and self-correction algorithms are introduced to reduce measuring errors. The adaptive filtering is suitable for noise reduction of periodic and periodically extended signals, the spectrum of which superimposes with the noise spectrum. The self-calibration measuring methods are based on self-calibration with the use of reference elements and quantities integrated in a measuring system. After the self-calibration measuring errors are automatically compensated so that the measuring accuracy of the resulting system can be improved in comparison with that of the original system. Errors caused by digital signal processing in measuring systems can be reduced by the proposed self-correction algorithm. Typical application examples are shown in this paper.

Schlagwörter: Messgenauigkeit, Adaptive Filterung, Rauschunterdrückung, Selbstkalibrierende Messverfahren, Selbstkorrigierender Algorithmus, Diskrete Fourier-Reihe, Impedanzmessung

1 Einleitung

Rechnergesteuerte Mess- und Prüftechnik wurde in den letzten 20 Jahren mit Hilfe der Mikroelektronik rasch entwickelt und findet zunehmende Anwendungen in allen Forschungs- und Ingenieurbereichen. Durch diese Technik können nicht nur Messungen und Dokumentationen automatisiert, sondern auch die Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit eines Messsystems durch Selbstdiagnose und

digitale Signalverarbeitung verbessert werden. Dadurch können Präzisionsmessungen mit Serienmessgeräten realisiert und hochwertige Messsysteme kostengünstig gestaltet werden.

Die Messgenauigkeit ist definiert als Maß der Annäherung des Messergebnisses an den wahren Wert der Messgröße [1]. Sie wird in der Praxis durch Messabweichungen und Messunsicherheit beschrieben [2].

Zu Messabweichungen gehören systematische und zufällige Abweichungen. Die systematischen Abweichungen sind bestimmbar und korrigierbar, während die zufälligen Abweichungen nur statistisch bestimmbar sind. Die Folge ist, dass die Messwerte bei den Messungen unter Wiederholbedingungen streuend sind. Man spricht von der Messunsicherheit. In der Praxis bewertet man die systematischen Abweichungen mit ihrem Mittelwert, und die Messunsicherheit mit der Standardabweichung.

Um die Messgenauigkeit zu verbessern, müssen einerseits die zufälligen Abweichungen durch Signalverarbeitung unterdrückt und andererseits die systematischen Abweichungen durch spezielle Verfahren reduziert werden. Durch Rauschunterdrückung kann die Auflösung eines Messsystems verbessert und gleichzeitig die Messunsicherheit reduziert werden.

Im Folgenden werden Methoden bzw. Verfahren zur Rauschunterdrückung und zur Reduktion systematischer Messabweichungen in rechnergesteuerten Mess- und Prüfsystemen dargestellt. Dabei werden Anwendungsbeispiele genannt.

2 Rauschunterdrückung

Das Rauschen bedeutet hier die Gesamtheit des Systemrauschens und zufälliger Störungen und wird als nichtkorreliertes Zufallssignal behandelt. Die Amplituden- und Spektralverteilung eines Rauschsignals lassen sich durch eine Normal- bzw. Gleichverteilung beschreiben.

Verschiedene Methoden werden in der Praxis zur Rauschunterdrückung verwendet, um das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) eines Messsystems zu verbessern.

Die analogen Filter und die Lock-in-Messtechnik gehören zur typischen analogen Signalverarbeitung und werden durch Schaltungstechnik implementiert. Bei der Lock-in-Messtechnik spricht man auch vom Trägerfrequenzverfahren oder von phasenempfindlicher Detektion. Der Grundgedanke bei der Lock-in-Messtechnik ist, das zu messende Signal so zu präparieren, dass es eindeutig vom Rauschen unterschieden werden kann. Eine passende Elektronik filtert die Rauschanteile heraus. Ein typisches Beispiel ist die Trägerfrequenz-Messbrücke [3; 4]. Diese Technik eignet sich für die Rauschunterdrückung modulierbarer elektrischer und optischer Messgrößen [5].

Die Mittelwertbildung, das numerische Glätten und die digitalen Filter werden normalerweise durch digitale Signalverarbeitung realisiert [6], die sich für rechnergesteuerte Messsysteme eignet.

Die oben genannten Methoden sind aber nur anwendbar bei der Unterdrückung von Rauschsignalen, deren Spektrum außerhalb des Frequenzbereichs des Signalspektrums liegt.

Die Schwierigkeit liegt bei der Unterdrückung der Rauschsignale, deren Spektrum sich mit dem Signalspektrum überlagert. Zum anderen können die Rauschanteile durch

die konventionellen Methoden nicht vollständig unterdrückt werden.

Eine Lösung ist, die Korrelationstechnik zu nutzen [6]. Durch eine Autokorrelationsfunktion können nichtkorrelierte Rauschanteile, deren Spektrum sich mit dem Signalspektrum überlagert, wesentlich reduziert werden. Das verarbeitete Signal und dessen Spektrum werden aber gegenüber dem Originalsignal verändert. Eine der besten Lösungen in der rechnergesteuerten Mess- und Prüftechnik ist, die nachfolgende adaptive Filterung anzuwenden.

Bei einer adaptiven Filterung werden zuerst die nichtkorrelierten Rauschanteile durch eine Autokorrelation unterdrückt. Die Frequenzkomponenten des Nutzsignals werden dann durch Fourier-Analyse bestimmt. Das Ausgangssignal ergibt sich anschließend aus einer Signalrekonstruktion mit Hilfe einer Fourier-Reihe.

Deshalb können nichtkorrelierte Rauschanteile durch die adaptive Filterung theoretisch vollständig unterdrückt werden, ohne das Nutzsignal zu verfälschen.

Bild 1 zeigt einen Algorithmus der adaptiven Filterung. Die nichtkorrelierten Rauschanteile x_{nk} sind durch die diskrete Autokorrelationsfunktion ACF verlorengegangen. Die Frequenzkomponenten \underline{C}_{yp} des resultierenden Signals werden durch eine diskrete Fourier-Reihe DFS(2) berechnet. Gleichzeitig erhält man die gesamten Frequenzkomponenten \underline{C}_p des Eingangssignals x_k durch die Fourier-Reihe DFS(1). Die Frequenzkomponenten des Nutzsignals können dann gemäß Gl. (1) selektiert werden:

$$\underline{C}_{sp} = \begin{cases} 0, & \frac{|\underline{C}_{yp}|}{|\underline{C}_{yp}|_{\max}} < \delta \\ \underline{C}_p, & \frac{|\underline{C}_{yp}|}{|\underline{C}_{yp}|_{\max}} \geq \delta \end{cases} \quad (1)$$

Der Filterfaktor δ lässt sich durch Gl. (2) abschätzen:

$$\delta = k \frac{rms_0 - \sqrt{rms_\tau}}{rms_0 + \sqrt{rms_\tau}} \quad (2)$$

wobei k ein Modifikationsfaktor, rms_0 der Effektivwert des Eingangssignals x_k und rms_τ der Effektivwert des autokorrelierten Signals y_τ sind.

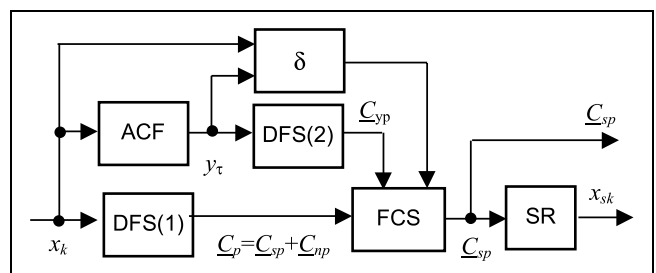


Bild 1: Algorithmus einer adaptiven Filterung (FCS: Frequency Component Selection, SR: Signal Reconstruction).

Das Ausgangssignal x_{sk} ergibt sich aus einer Signalrekonstruktion (SR) unter Nutzung der Frequenzkomponenten \underline{C}_{sp} des Nutzsignals. Man kann auch die Frequenzkomponenten \underline{C}_{sp} direkt verwenden.

Die Übertragungsfunktion der adaptiven Filterung ist theoretisch gleich 1 für die Signalkomponenten \underline{C}_{sp} und gleich 0 für das Rauschspektrum \underline{C}_{np}

$$g(j\omega) = \begin{cases} 1 & \text{Signalkomponenten} \\ 0 & \text{Rauschspektrum} \end{cases} \quad (3)$$

Nach der adaptiven Filterung bleiben nur die Signalanteile übrig. Die Rauschanteile werden vollständig weggefiltert.

Diese Filterung eignet sich für die Rauschunterdrückung periodischer bzw. periodisch fortgesetzter Signale, deren Spektrum sich mit dem Rauschspektrum überlagert.

In Bild 2 wird beispielsweise das Ergebnis der Computersimulation eines Sinussignals

$$x(t) = 10 \sin \omega t + 20R(t) \quad -1 \leq R(t) \leq 1 \quad (4)$$

dargestellt, wobei $R(t)$ ein Zufallsignal ist. Das Signal wird durch Rauschen stark gestört. Durch die adaptive Filterung werden die Rauschanteile fast vollständig weggefiltert. Die Standardabweichung der Filterung ist kleiner als 5% bei einer Abtastzahl $N = 1000$ und einem Signal/Rausch-Verhältnis $SNR = -8,2 \text{ dB}$. Die Abweichung nimmt mit zunehmender Abtastzahl N und erhöhendem Signal/Rausch-Verhältnis ab.

Bild 3 zeigt ein faseroptisches Bragg-Gitter-Messsystem, das am GeoForschungszentrum Potsdam entwickelt wurde [7]. Diese Filterung wurde bei der Messung dynamischer Deformation angewendet.

In das Messobjekt (Gestein) wird ein Bragg-Gitter-Sensor durch einen Anker eingebettet. Ein optisches Signal aus der Laserquelle wird durch einen Zirkulator an das Bragg-Gitter gesendet. Das optische Signal wird vom Bragg-Gitter reflektiert, wenn die Wellenlänge des Signals mit der Wellenlänge des Bragg-Gitters übereinstimmt [7; 8].

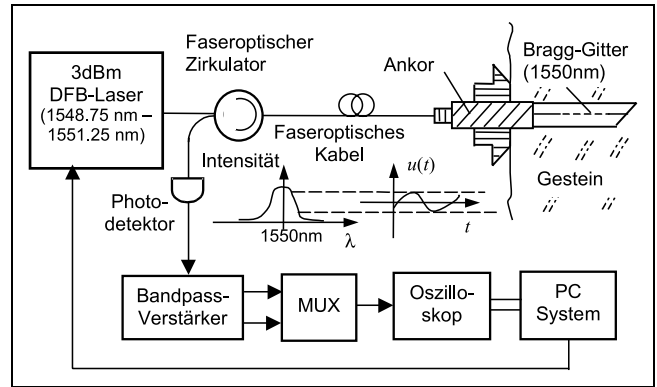


Bild 3: Messsystem dynamischer Deformation mit faseroptischem Bragg-Gitter-Sensor [23].

Die Messung dynamischer Deformation basiert auf der optischen Intensitätsänderung als Funktion der Wellenlänge des reflektierten Signals. Durch die Änderung der mechanischen Größe verschiebt sich die Wellenlänge des Bragg-Gitters bzw. des reflektierten Signals. Dadurch ändert sich die optische Intensität. Aus der gemessenen Photospannung kann die mechanische Größe abgeleitet werden [7].

Die Schwierigkeit bei der Messung dynamischer Deformation liegt darin, dass die Auflösung des Messsystems durch optische Rauschsignale beschränkt wird. Das Rauschspektrum überlagert sich mit dem Signalspektrum.

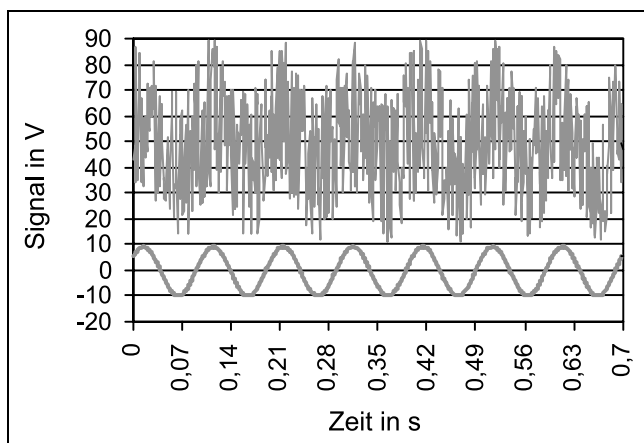


Bild 2: Ergebnis der Computersimulation des durch Gl. (4) dargestellten Sinussignals.

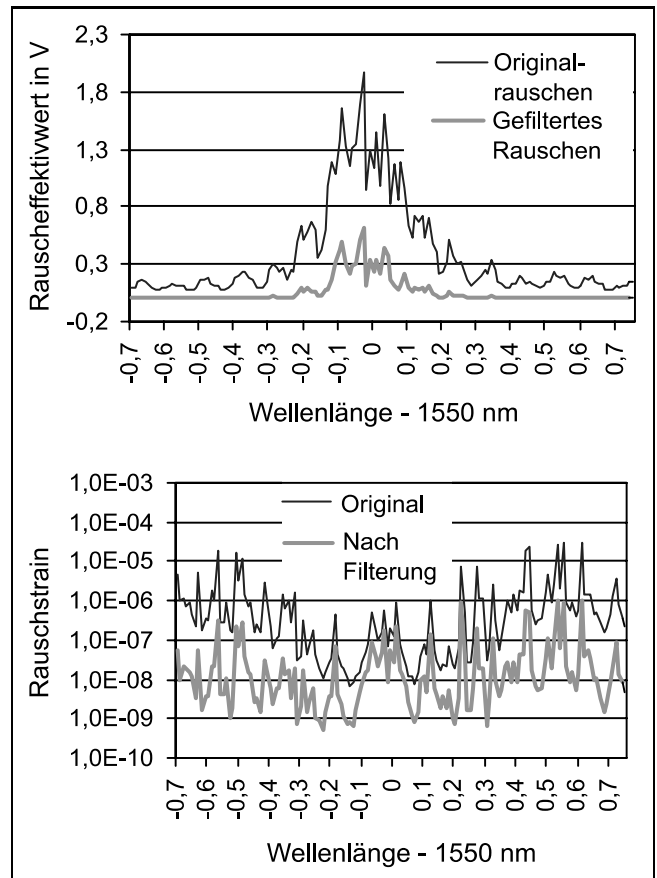


Bild 4: Rauscheffektivwert und Rauschstrahl nach der Filterung im Vergleich zum Originalrauschen [23].

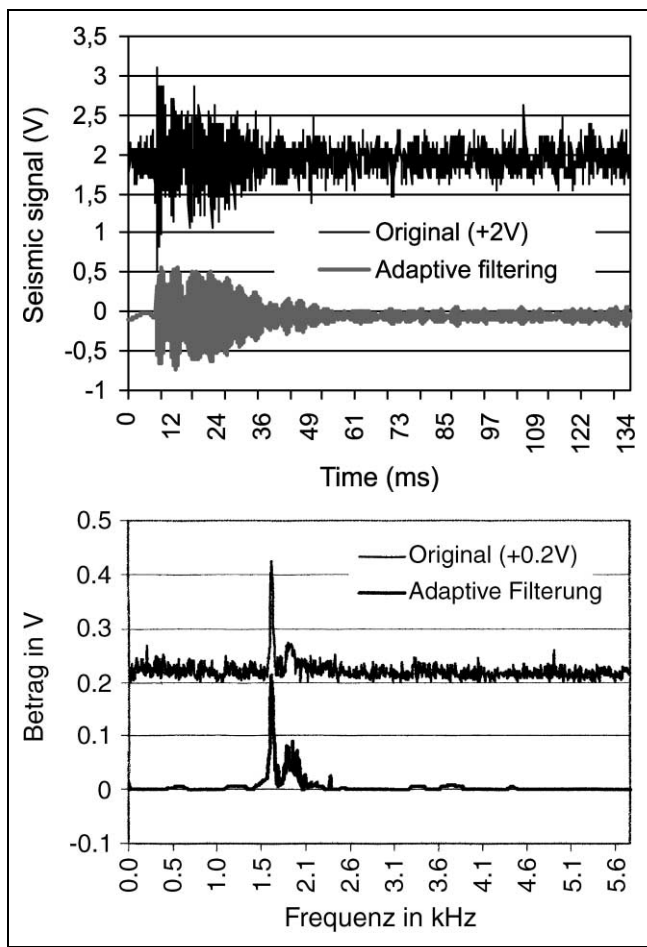


Bild 5: Mit dem Bragg-Gitter-Messsystem detektiertes seismisches Signal und dessen Spektrum [23].

Bild 4a zeigt eine deutliche Reduktion des Rauscheffektivwerts durch die adaptive Filterung. Im empfindlichen Wellenlängenbereich von 1549,75 nm bis 1550,25 nm ist der Maximalwert des gefilterten Rauschens nur 1/3 des Originalrauschens. Dadurch verbessert sich die Auflösung des Messsystems. Bild 4b stellt eine Reduktion des Rauschstrains dar. Nach der Filterung liegt das Rauschstrain bei 10^{-9} für die optimierten Wellenlängen 1549,87 nm und 1550,07 nm. Es ist zehnfach kleiner als das Originalrauschstrain.

In Bild 5 wird die Rauscherdrückung eines seismischen Signals dargestellt. Das Originalsignal wurde durch eine Sprengerregung in einem Bergwerk generiert und mit dem Bragg-Gitter-Sensorsystem (Bild 3) detektiert. Das

Originalsignal wird durch Rauschen stark gestört. Das Rauschspektrum des Originalsignals ist in Bild 5b deutlich zu erkennen. Nach der adaptiven Filterung werden die Rauschteile wesentlich reduziert. Das Rauschspektrum ist fast nicht mehr zu sehen.

3 Reduktion der Messabweichungen

Messabweichungen stammen aus verschiedenen Fehlerquellen, z. B. aus der Unvollkommenheit des Messsystems, den Abweichungen genutzter Signalverarbeitung, den Einflüssen anderer physikalischer Größen und abweichenden Messbedingungen usw.

Um Messabweichungen zu reduzieren, werden verschiedene Verfahren verwendet. Die typischen Verfahren sind Optimierung der Empfindlichkeit und Messbedingungen, Fehlerbeseitigung durch Fehleranalyse, Kompensationsmessverfahren [3; 4], Fehlerberichtigung [9–12] und Parametertrennung durch Signalverarbeitung [13] usw.

Die für rechnergesteuerte Mess- und Prüfsysteme geeigneten Verfahren sind numerisches Berichtigen, selbstkalibrierende Messverfahren [14–19] und selbstkorrigierende Algorithmen [20; 21].

3.1 Numerische Berichtigung der Messabweichungen

Die numerische Berichtigung der Messabweichungen erfolgt nach einem Kalibrieren des Messsystems. Das Kalibrieren ist realisierbar entweder mittels eines Eichsystems (Bild 6a) oder unter Nutzung ausgewählter Referenzelemente bzw. -größen (Bild 6b). Nach der Kalibrierung erhält man die Korrekturen, die als Korrektionsmatrix im Computer des Messsystems gespeichert werden. Damit kann der Messwert mittels der Korrektionsmatrix berichtigt werden (Bild 7).

Als Beispiel wird ein Prüfsystem von Längenmaßstäben in Bild 8 dargestellt. In diesem System werden Referenz- und Messkanal gebaut. Durch die beiden Kanäle ist eine Differenzmessung realisierbar, sodass der Einfluss aus der Temperaturänderung kompensiert werden kann.

Bei der Messung wird der lineare Weg X des beweglichen Tisches gleichzeitig durch den Referenz- und Messkanal aufgenommen. Die beiden Signale X_1 und X_2 bilden ein

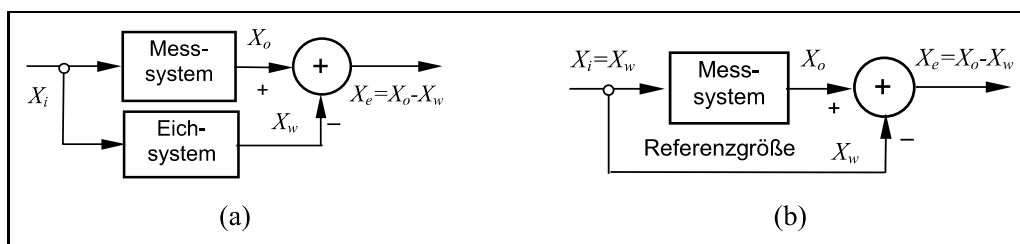


Bild 6: Kalibrieren von Messsystemen [15]: (a) mittels Eichsystem (X_i unbekannt), (b) Nutzung ausgewählter Referenzgrößen (X_i bekannt).

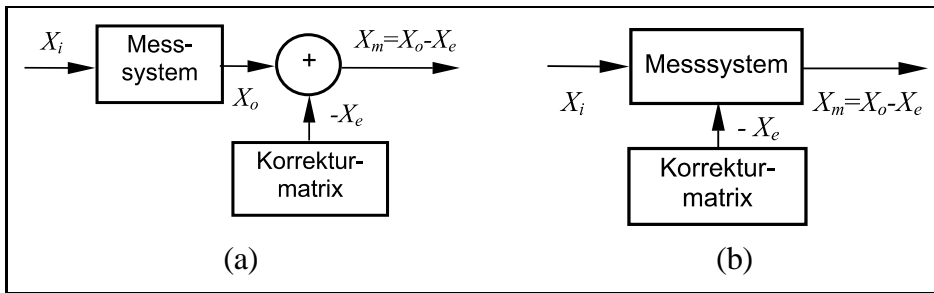


Bild 7: Berichtigen der Messabweichungen mittels einer durch Kalibrieren vorher bestimmten und im Messsystem gespeicherten Korrekturmatri [15]: (a) Berichtigen nach der Messung, (b) Berichtigen während der Messung.

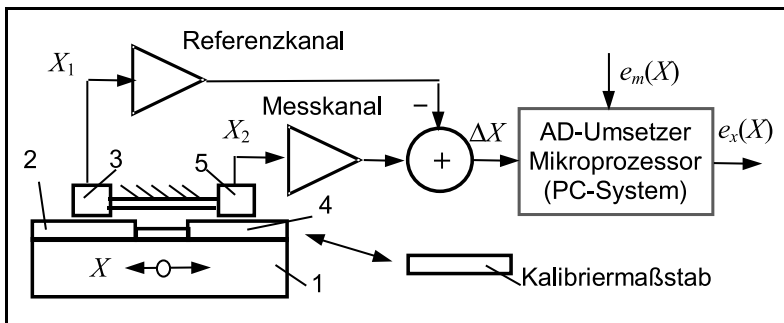


Bild 8: Prüfsystem von Längenmaßstäben (1: beweglicher Tisch, 2: Referenzmaßstab, 3: Referenzaufnehmer, 4: Messmaßstab, 5: Messaufnehmer).

Differenzsignal $\Delta X = X_2 - X_1$. Das Signal ΔX besteht aus der Abweichung $e_x(X)$ des Messmaßstabs 4 und der gesamten Messabweichung $e_m(X)$ des Systems.

Durch Kalibrierung unter Nutzung eines Kalibriermaßstabs kann die gesamte Messabweichung bestimmt werden:

$$e_m(X) = \Delta X_{or} - e_r(X) \tag{5}$$

Die Abweichungsfunktion $e_m(X)$ wird als Korrekturmatri im Messsystem gespeichert, damit die Messgenauigkeit durch Korrektur verbessert werden kann:

$$e_x(X) = \Delta X_{ox} - e_m(X) \tag{6}$$

In Gl. (5) und (6) bedeuten ΔX_{ox} und ΔX_{or} Messwerte des Differenzsignals beim Messen und Kalibrieren, $e_r(X)$ die Abweichung des Referenzmaßstabs.

Das numerische Berichtigen eignet sich für Kompensation langzeitstabiler Messabweichungen. Das Messsystem muss neu kalibriert werden, wenn das System bzw. Messbedingungen verändert werden.

3.2 Selbstkalibrierende Messverfahren

Ein selbstkalibrierendes Messverfahren basiert auf einer Selbstkalibrierung unter Nutzung der in einem Messsystem integrierten Referenzelemente und -größen. Nach der Selbstkalibrierung werden Messabweichungen durch Signalverarbeitung automatisch korrigiert, sodass die Messgenauigkeit des resultierenden Systems gegenüber dem Originalsystem verbessert werden kann [17; 20; 21].

Für ein Messsystem mit einer linearen Kennlinie werden zwei Referenzelemente bzw. -größen für die Selbstkalibrierung genutzt (Bild 9a). Beim Kalibrieren werden die beiden Referenzgrößen mit dem Messsystem

gemessen. Das Messergebnis wird durch eine lineare Interpolation

$$X_m = \frac{X_{ox} - X_{oR2}}{X_{oR1} - X_{oR2}} X_{R1} + \frac{X_{ox} - X_{oR1}}{X_{oR2} - X_{oR1}} X_{R2} \tag{7}$$

unter Nutzung der Mess- und Referenzwerte berechnet. Die Messabweichung wird durch die Interpolation automatisch kompensiert [15; 18; 19].

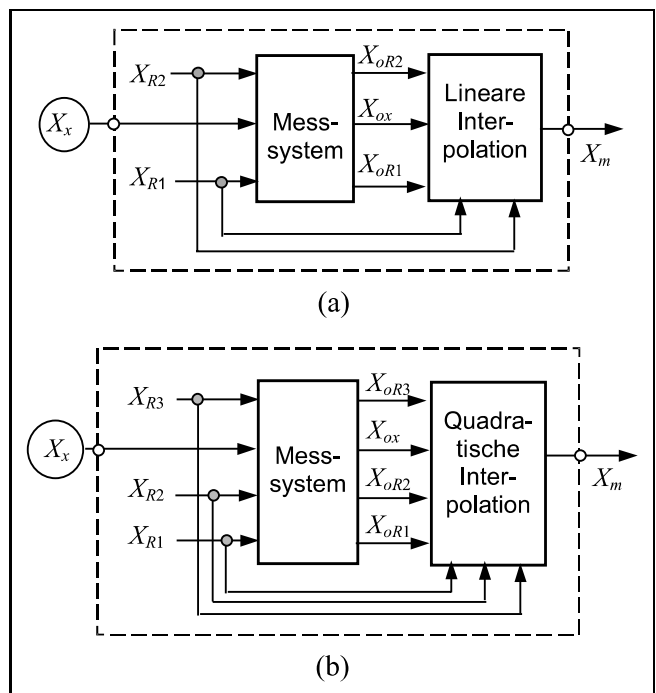


Bild 9: Selbstkalibrierende Messverfahren unter Nutzung integrierter Referenzelemente bzw. -größen (X_{R1} , X_{R2} , X_{R3}): (a) lineare interpolierende Selbstkalibrierung (LISC, Linear Interpolated Self-Calibration), (b) quadratische interpolierende Selbstkalibrierung (QISC, Quadratic Interpolated Self-Calibration).

Für ein Messsystem mit einer nichtlinearen Kennlinie werden drei Referenzgrößen verwendet. Das Messergebnis ergibt sich gleichfalls aus einer quadratischen Interpolation

$$\begin{aligned}
 X_m = & \frac{(X_{ox} - X_{oR2})(X_{ox} - X_{oR3})}{(X_{oR1} - X_{oR2})(X_{oR1} - X_{oR3})} X_{R1} \\
 & + \frac{(X_{ox} - X_{oR1})(X_{ox} - X_{oR3})}{(X_{oR2} - X_{oR1})(X_{oR2} - X_{oR3})} X_{R2} \\
 & + \frac{(X_{ox} - X_{oR1})(X_{ox} - X_{oR2})}{(X_{oR3} - X_{oR1})(X_{oR3} - X_{oR2})} X_{R3}
 \end{aligned} \tag{8}$$

unter Nutzung der Mess- und Referenzwerte.

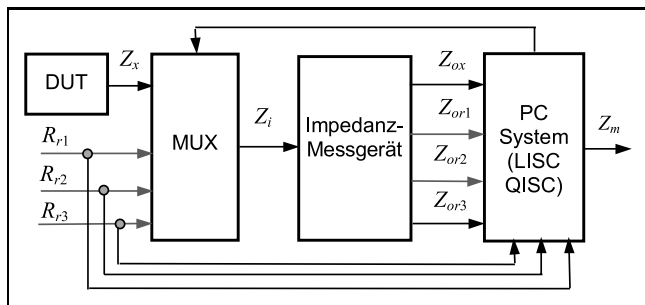


Bild 10: Selbstkalibrierende Impedanzmessung unter Nutzung von Referenzwiderständen.

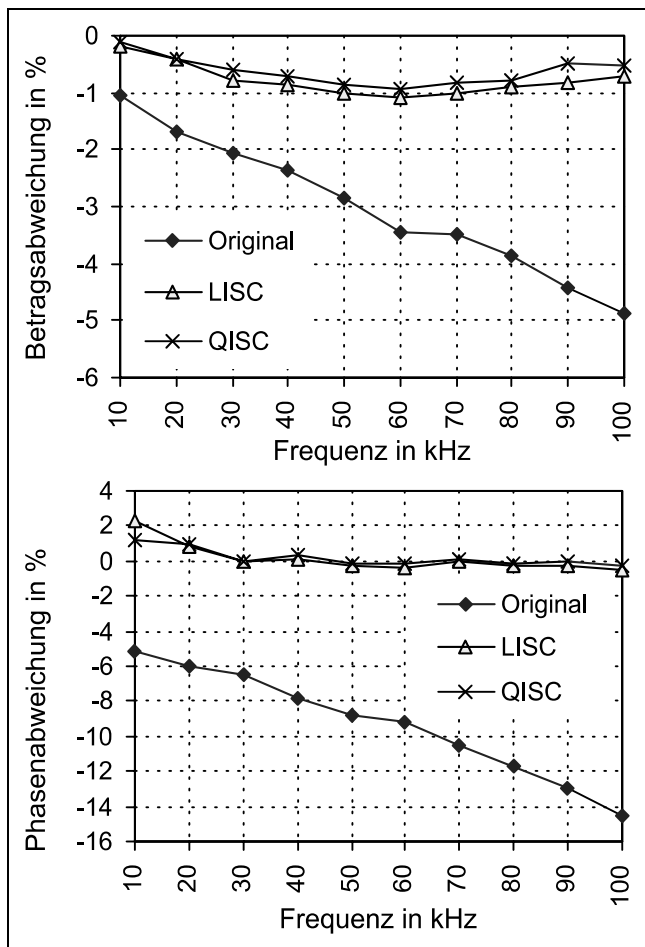


Bild 11: Messabweichungen der Impedanz einer analogen Schaltung [15].

Als Beispiel stellt Bild 10 eine selbstkalibrierende Impedanzmessung dar. Für die Selbstkalibrierung werden Referenzwiderstände (R_{r1}, R_{r2}, R_{r3}) verwendet. Bei der Kalibrierung werden die Referenzwiderstände mit dem Impedanzmessgerät gemessen. Beim Messen wird die Impedanz des Messobjekts (DUT) gleichfalls gemessen. Das Ergebnis wird durch eine lineare Interpolation Gl. (7) oder quadratische Interpolation Gl. (8) berechnet.

Bild 11 zeigt beispielsweise die Messabweichungen der Impedanz einer analogen Schaltung. Die Messabweichungen werden durch die beiden selbstkalibrierenden Messverfahren gegenüber den Originalabweichungen wesentlich reduziert.

Diese Technik wurde auch bei der Impedanzmessung dielektrischer Werkstoffe bei hohen Feldstärken und bei der Impedanzmessung im Hochfrequenzbereich usw. angewendet [15; 19].

3.3 Selbstkorrigierender Algorithmus

Wegen Digitalisierung sind viele mathematische Methoden fehlerhaft bei digitaler Signalverarbeitung in der Mess- und Prüftechnik. Zur Verbesserung der Genauigkeit wurde ein selbstkorrigierender Algorithmus entwickelt [15; 20; 21].

Ein selbstkorrigierender Algorithmus wird in Bild 12 dargestellt. Bei der Initialisierung werden Originalausgangsparameter Y_m^* ($m = 1, 2, \dots, M$) durch einen Grundalgorithmus unter Nutzung der Eingangsdaten X_i ($i = 0, 2, \dots, N - 1$) bestimmt.

Um Abweichungen der Originalausgangsparameter Y_m^* zu korrigieren, muss der Grundalgorithmus kalibriert werden. Bild 12b stellt eine Selbstkalibrierung dar. Für die Kalibrierung werden die Originalausgangsparameter Y_m^* als Referenzparameter betrachtet. Bei der Kalibrierung werden sie durch eine Signalrekonstruktion in ein Referenzeingangssignal X_{ri} umgewandelt. Die Referenzausgangsparameter Y_{rm} ergeben sich aus dem gleichen Grundalgorithmus unter

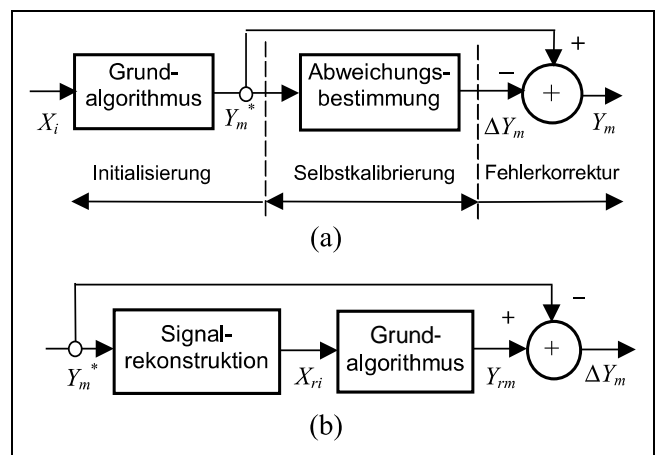


Bild 12: Selbstkorrigierender Algorithmus zur Fehlerkorrektur digitaler Signalverarbeitung: (a) Selbstberichtigung, (b) Selbstkalibrierung.

Nutzung des Referenzeingangssignals X_{ri} . Nach der Kalibrierung erhält man die Abweichungsdaten

$$\Delta Y_m = Y_{rm} - Y_m^* \tag{9}$$

Damit kann eine Fehlerkorrektur anschließend durchgeführt werden:

$$Y_m = Y_m^* - \Delta Y_m = 2Y_m^* - Y_{rm} \tag{10}$$

Die Fehlerkorrektur setzt hier voraus, dass die Signalrekonstruktion relativ exakt realisierbar ist.

Unter Nutzung eines iterativ selbstkorrigierenden Algorithmus kann die Genauigkeit weiter verbessert werden. Bild 13 zeigt einen Algorithmus mit zwei iterativen Selbstkorrekturen. Die Ausgangsparameter nach den beiden Korrekturen ergeben sich zu

$$Y_m = 3Y_m^* - (Y_{rm,1} + Y_{rm,2}) \tag{11}$$

wobei $Y_{rm,1}$ und $Y_{rm,2}$ die Referenz Ausgangsparameter in der ersten und zweiten Selbstkalibrierung sind.

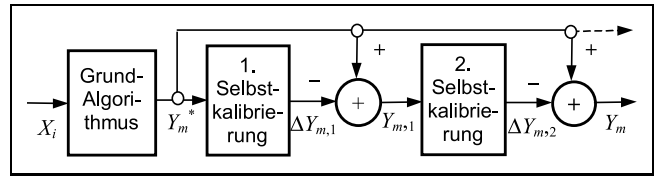


Bild 13: Iterativ selbstkorrigierender Algorithmus.

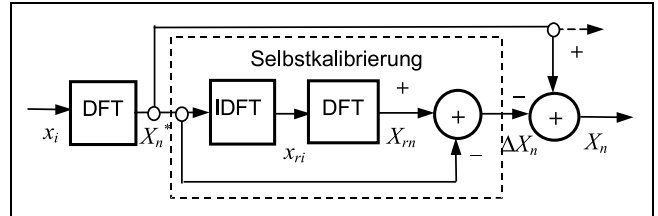


Bild 14: Selbstkorrigierende diskrete Fourier-Reihe bzw. -Transformation.

Im Allgemeinen werden die Ausgangsparameter eines iterativ selbstkorrigierenden Algorithmus wie folgt beschrieben:

$$Y_m = (J + 1) Y_m^* - \sum_{j=1}^J Y_{rm,j} \tag{12}$$

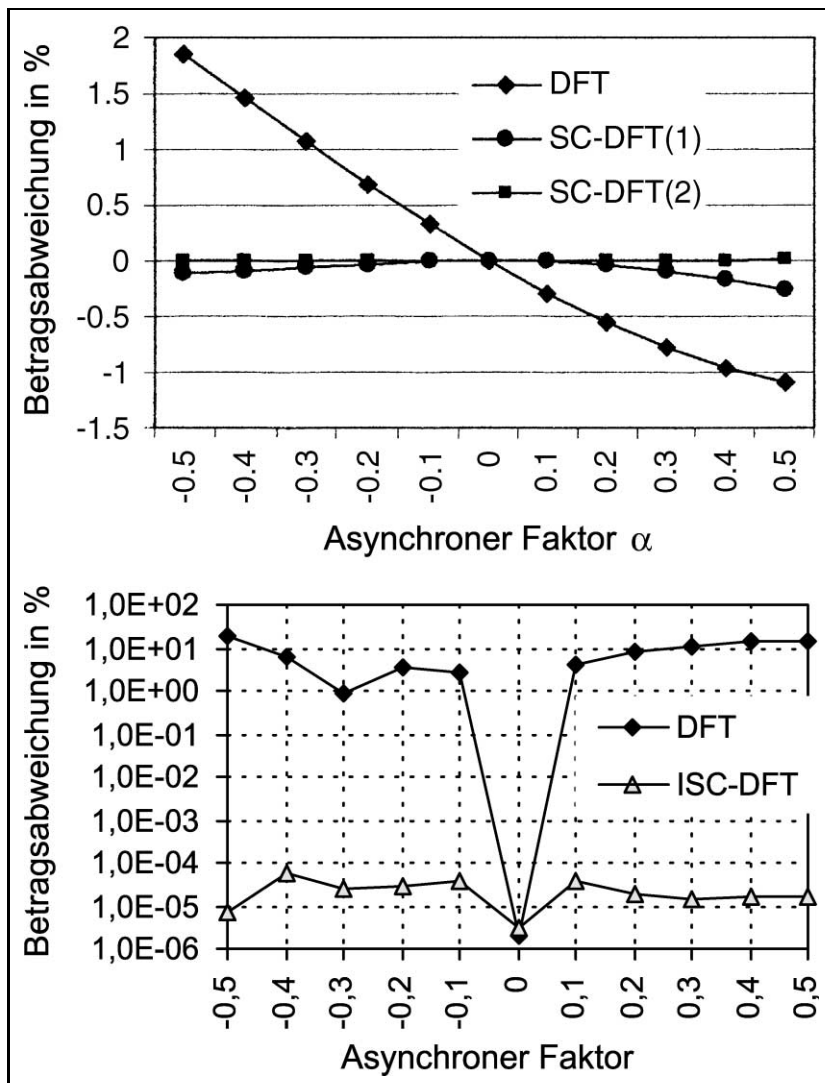


Bild 15: Ergebnisse der Computersimulation der selbstkorrigierenden DFT eines Sinussignals.

mit J als die Zahl der iterativen Selbstkorrekturen und $Y_{m,j}$ als die Referenzgangparameter in der j -ten Selbstkalibrierung.

Dieser Algorithmus wurde bei der diskreten Fourier-Reihe bzw. -Transformation (DFT) und bei der Parameterbestimmung gedämpfter Schwingungssignale angewendet [17; 22; 23]. Im Folgenden wird eine selbstkorrigierende DFT als Beispiel dargestellt.

Die messtechnische Bedingung für eine diskrete Fourier-Reihe ist eine synchrone Abtastung $f_s = Nf$, d. h., die Abtastfrequenz f_s ist gleich der Abtastzahl pro Signalperiode N mal der Signalfrequenz f . In der Praxis ist die synchrone Abtastung häufig nicht erfüllbar, d. h., $f_s = (N + \alpha)f$, wobei α als asynchroner Faktor definiert wird, $|\alpha| \leq 0,5$. In diesem Fall wird die DFT nicht fehlerfrei realisierbar. Die durch eine asynchrone Abtastung verursachten Abweichungen sollen durch den selbstkorrigierenden Algorithmus korrigiert werden. In Bild 14 wird eine selbstkorrigierende DFT wiedergegeben.

Bei der Initialisierung berechnet man eine Originalfrequenzfunktion X_n^* durch die DFT. Diese Funktion wird als Referenzfunktion betrachtet. Bei der Selbstkalibrierung wird sie durch eine Inverse DFT (IDFT) in eine Referenzzeitfunktion x_{ri} rekonstruiert. Unter Nutzung der rekonstruierten Zeitfunktion berechnet man dann die Referenzfrequenzfunktion X_m mit der gleichen DFT. Die Abweichungsfunktion ΔX_n ergibt sich aus der Differenz der beiden Frequenzfunktionen X_n und X_m . Als Voraussetzung ist die IDFT hier fehlerfrei realisierbar. Damit wird eine Fehlerkorrektur anschließend durchgeführt. Der Betrag und die Phase der Ausgangsfrequenzfunktion der J -ten iterativen Korrektur lassen sich durch Gl. (13) berechnen [21]:

$$\begin{cases} |X_n| = (J + 1) |X_n^*| - \sum_{j=1}^J |X_{m,j}| \\ \arg \{X_n\} = (J + 1) \arg \{X_n^*\} - \sum_{j=1}^J \arg \{X_{m,j}\} \end{cases} \quad (13)$$

$$(n = -P, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, P)$$

Bild 15 zeigt eine Genauigkeitsverbesserung bei der diskreten Fourier-Reihe eines Sinussignals. Die Abweichungen der DFT hängen vom asynchronen Faktor α ab. Für $\alpha \neq 0$ können die Amplitude und Phase des Signals durch die DFT nicht genau berechnet werden. Die maximale Originalabweichung liegt bei 1,85% für den Betrag und 25% für die Phase bei $N = 10$. Nach der Selbstkorrektur werden die Abweichungen wesentlich reduziert. Nach der ersten Korrektur SC-DFT(1) sind die Abweichungen kleiner als 0,3%, nach der zweiten Korrektur SC-DFT(2) kleiner als 0,02%. Bei einer optimierten Zahl der iterativen Korrekturen (ISC-DFT) sind die Abweichungen kleiner als $1 \cdot 10^{-4}\%$.

Dieser Algorithmus wurde zur Verbesserung der Messgenauigkeit bei der Messung von Impedanz und Übertragungsfunktion analoger Schaltungen angewendet [15].

4 Zusammenfassung

Die Messgenauigkeit rechnergesteuerter Mess- und Prüfsysteme kann durch Rauschunterdrückung, selbstkalibrierende Messverfahren und selbstkorrigierende Algorithmen verbessert werden. Für die Rauschunterdrückung modulierbarer Messgrößen ist die Lock-in-Messtechnik zu nutzen. Die adaptive Filterung eignet sich für Unterdrückung nicht-korrelierter Rauschanteile, deren Spektrum sich mit dem Signalspektrum überlagert. Durch die Filterung ist eine vollständige Rauschunterdrückung realisierbar. Diese Filterung ist normalerweise durch digitale Signalverarbeitung implementiert. Sie kann auch durch AD-Umsetzer, Mikroprozessor und DC-Umsetzer realisiert werden. Diese Technik sollte weiterentwickelt werden.

Das numerische Berichtigen eignet sich nur für langzeitstabile Abweichungen. Durch ein selbstkalibrierendes Messverfahren sind nicht nur langzeitstabile, sondern auch kurzzeitstabile Abweichungen kompensierbar, wenn die Selbstkalibrierung während der Messung durchgeführt wird. Für die Selbstkalibrierung spielt die Entwicklung von Referenzelementen bzw. -größen eine wichtige Rolle.

Der selbstkorrigierende Algorithmus basiert auf einer genauen Signalrekonstruktion und einer Selbstkalibrierung, ohne irgendeine Fehleranalyse durchzuführen. Dieser Algorithmus eignet sich für die Berichtigung von mathematisch schwer zu erfassenden Abweichungen digitaler Signalverarbeitung wegen unpassendem Algorithmus und abweichenden Anwendungsbedingungen. Die Entwicklung fehlerfreier Signalrekonstruktion liefert einen Beitrag für die Anwendungen in der rechnergesteuerten Mess- und Prüftechnik.

Literatur

- [1] DIN ISO 10012-1, Quality assurance requirements for measuring equipment, Part 1: Metrological confirmation system for measuring equipment, August 1992.
- [2] DIN 1319 Teil 1, Deutsche Norm: Grundlagen der Messtechnik – Grundbegriffe, Entwurf November 1992.
- [3] E. Schrüfer: Elektrische Messtechnik – Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, 6. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995.
- [4] W.-J. Becker, K.W. Bonfig, K. Höing: Handbuch elektrische Messtechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998.
- [5] J. Scott: Lock-Ins – Handle Rationed Optics Measurements, *Laser Focus/Electro-Optics*, 1988, pp. 104–112.
- [6] E. Schrüfer: Signalverarbeitung – Numerische Verarbeitung digitaler Signale, 2. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1992.
- [7] C. Schmidt-Hattenberger, J.-G. Liu, G. Borm, F. Amberg: Fiber Bragg Grating Seismic Monitoring System, Proceedings of the 10th International Sensor Fairs and Conference, May 8–10, 2001, Nürnberg, Germany, Vol. II, pp. 303–307.
- [8] Y.-J. Rao: In-fibre Bragg grating sensors, *Measurement Science and Technology*, 8 (1997) Nr. 2, 355–375.
- [9] J.-G. Liu, S.-X. Duanmu: Method of microcomputer aided positioning error compensation, *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 8 (1987) 3, 274–279.



- [10] H. Heuermann, B. Schiek: Error Corrected Impedance Measurements with a Network Analyser: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 44 (1995) 2, 295–299.
- [11] A.L. Shestakov: Dynamic error correction method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 45 (1996) 1, 250–255.
- [12] A. Baccigalupi, A. Bernieri, C. Liguori: Error compensation of A/D converters using neural networks. *IEEE Trans. on I&M* 45 (1996) 2, 640–644.
- [13] J.-G. Liu, W.-J. Becker, T. Gerhold, W. Ricken: Parameter-trennung in Meßsystemen und Sensoren durch Signalverarbeitung, *Technisches Messen*, tm 67 (2000) 11, 484–490.
- [14] U. Frühauf: Self-diagnosis and Self-calibration Features in Electronic Measurement Systems, Proceedings of the 8th International Symposium on New Measurement and Calibration Methods of Electrical Quantities and Instruments, Budapest, 16–17 September 1996, pp. 81–87.
- [15] J.-G. Liu: Eigenkalibrierende Messverfahren und deren Anwendungen bei den Messungen elektrischer Größen, *Habilitationschrift*, Technische Universität Dresden 2000, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 830, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [16] V. Geurkov, L. Kirischian: Self-checking and self-calibration of microprocessor based measurement systems, Proceedings of the 7th International Symposium on Modern Electrical and Magnetic Measurement, Prague, 14–16 September 1995, pp. 175–179.
- [17] P.T. Kolen: *Self-calibration/compensation technique for microcontroller-based sensor arrays: IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 43 (1994) 4, 620–623.
- [18] J.-G. Liu, U. Frühauf: Self-Calibration Measuring Methods and Application to Measurements of Electrical Quantities, *Measurement*, 26 (1999) 2, 129–141.
- [19] J.-G. Liu, U. Frühauf, A. Schönecker: Accuracy Improvement of Impedance Measurements by Using the Self-Calibration, *Measurement*, 25 (1999) 3, 213–225.
- [20] J.-G. Liu, A. Schönecker: Recursive Self-Correction Algorithm of Discrete Fourier Transform and Application to Electrical Measurements, Proceedings of the 43rd International Scientific Colloquium, Ilmenau, 21–24 September 1998, pp. 515–520.
- [21] J.-G. Liu: Self-correction Algorithms and Applications to Signal Processing, *Measurement*, 31 (2002) 2, 107–116.
- [22] J.-G. Liu, C. Schmidt-Hattenberger, G. Borm: Parameter Determination of Damped Oscillation Signals by Discrete Fourier Transform and Self-Correction, Proceedings of the 10th International Sensor Fairs and Conference, Nürnberg, 8–10 May 2001, Vol. 1, pp. 219–224.
- [23] J.-G. Liu, C. Schmidt-Hattenberger, G. Borm: Dynamic Strain Measurement with a Fibre Bragg Grating Sensor System, *Measurement*, 32 (2002) 2, 151–161.

Dr.-Ing. habil. Ji-Gou Liu, ChenYang-Ingenieurbüro für Sensorik und Messtechnik ISM, Alte Römerstr. 66, D-85435 Erding,
E-Mail: jigou.liu@chenyang-ism.com, <http://www.chenyang-ism.com>