Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

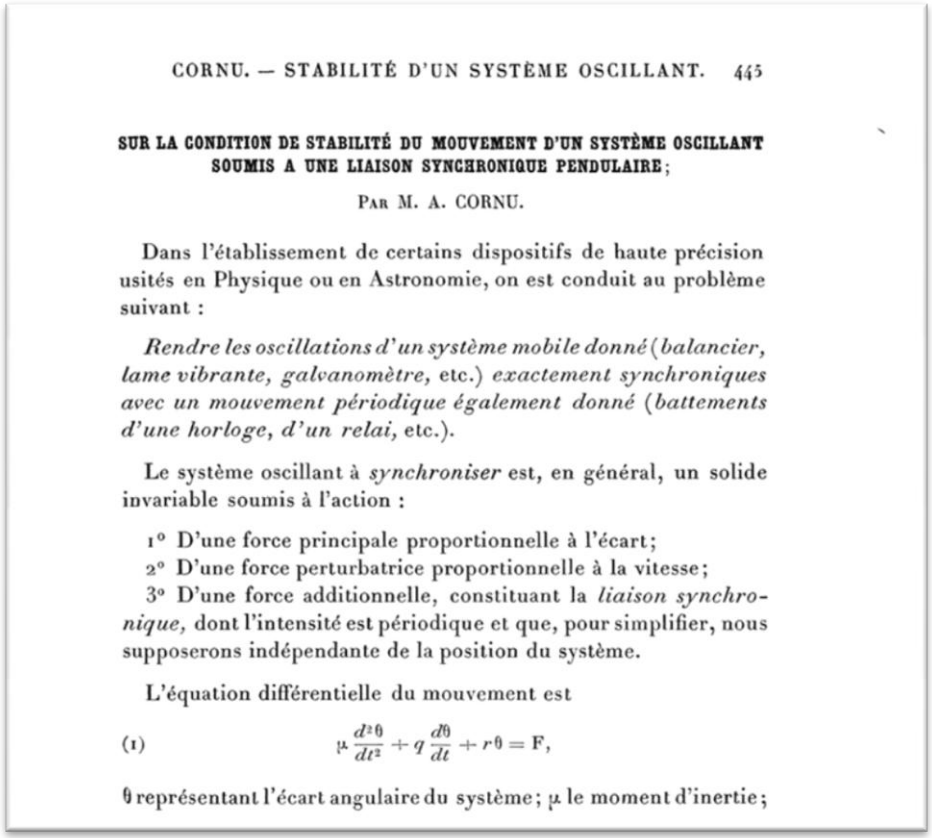
Messunsicherheitsbestimmung für dynamische Messungen

Anwendung von VIM und GUM für zeitabhängige Messgrößen

Sascha Eichstädt
Präsidialer Stab, PSt1 „Koordination Digitalisierung“

digital.ptb.de

Dynamische Messungen



CORNU. — STABILITÉ D'UN SYSTÈME OSCILLANT. 445

SUR LA CONDITION DE STABILITÉ DU MOUVEMENT D'UN SYSTÈME OSCILLANT SOUMIS A UNE LIAISON SYNCHRONIQUE PENDULAIRE;

PAR M. A. CORNU.

Dans l'établissement de certains dispositifs de haute précision usités en Physique ou en Astronomie, on est conduit au problème suivant :

Rendre les oscillations d'un système mobile donné (balancier, lame vibrante, galvanomètre, etc.) *exactement synchroniques avec un mouvement périodique également donné (battements d'une horloge, d'un relai,* etc.).

Le système oscillant à *synchroniser* est, en général, un solide invariable soumis à l'action :

1° D'une force principale proportionnelle à l'écart;
2° D'une force perturbatrice proportionnelle à la vitesse;
3° D'une force additionnelle, constituant la *liaison synchronique,* dont l'intensité est périodique et que, pour simplifier, nous supposerons indépendante de la position du système.

L'équation différentielle du mouvement est

$$(1) \qquad \mu \frac{d^2\theta}{dt^2} + q\frac{d\theta}{dt} + r\theta = F,$$

θ représentant l'écart angulaire du système; μ le moment d'inertie;

1887

…

1887 Cornu

1893 Blondel

…

1960 Kalman

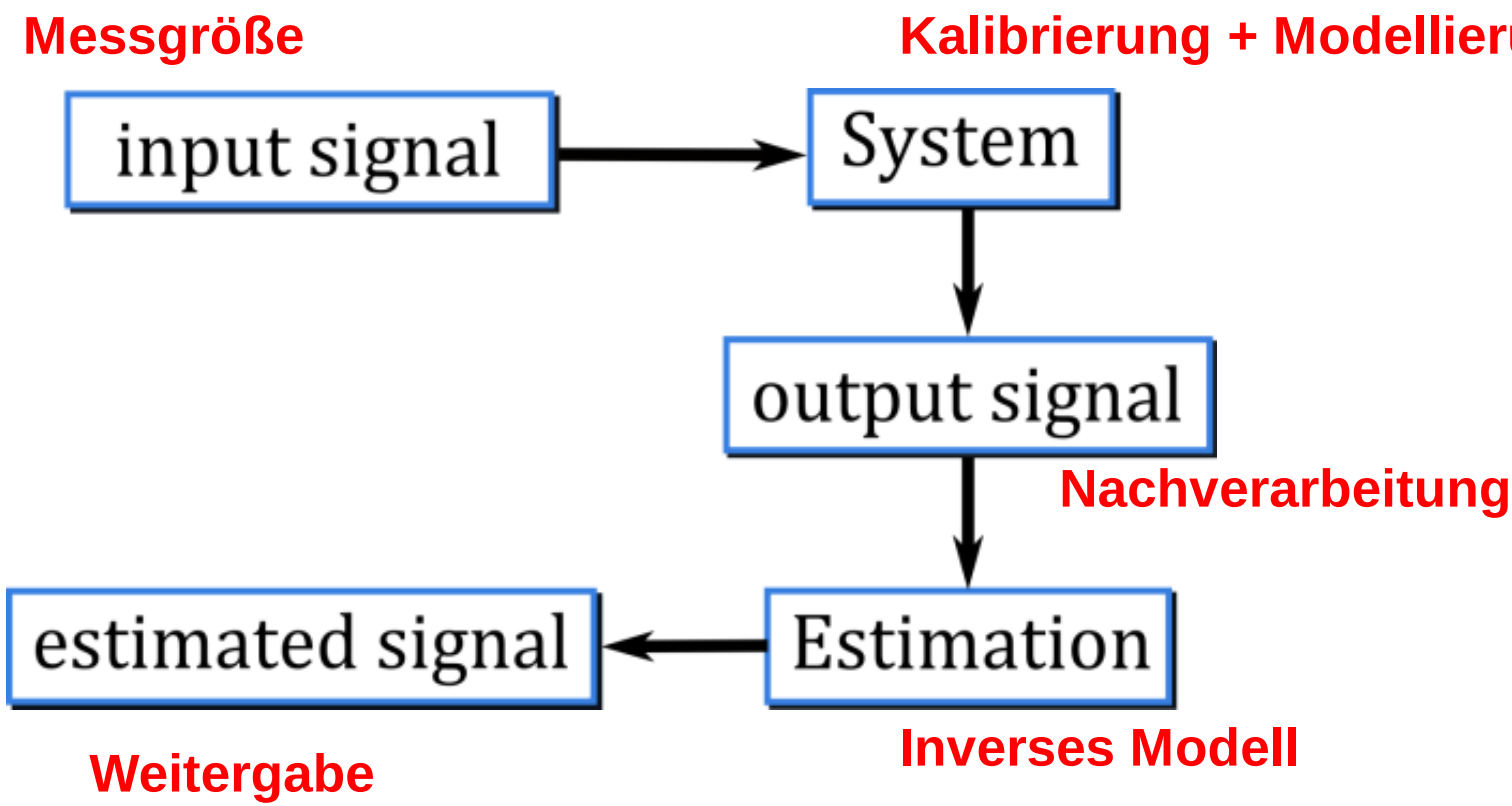
1964 Wiener

1979 Tikhonov

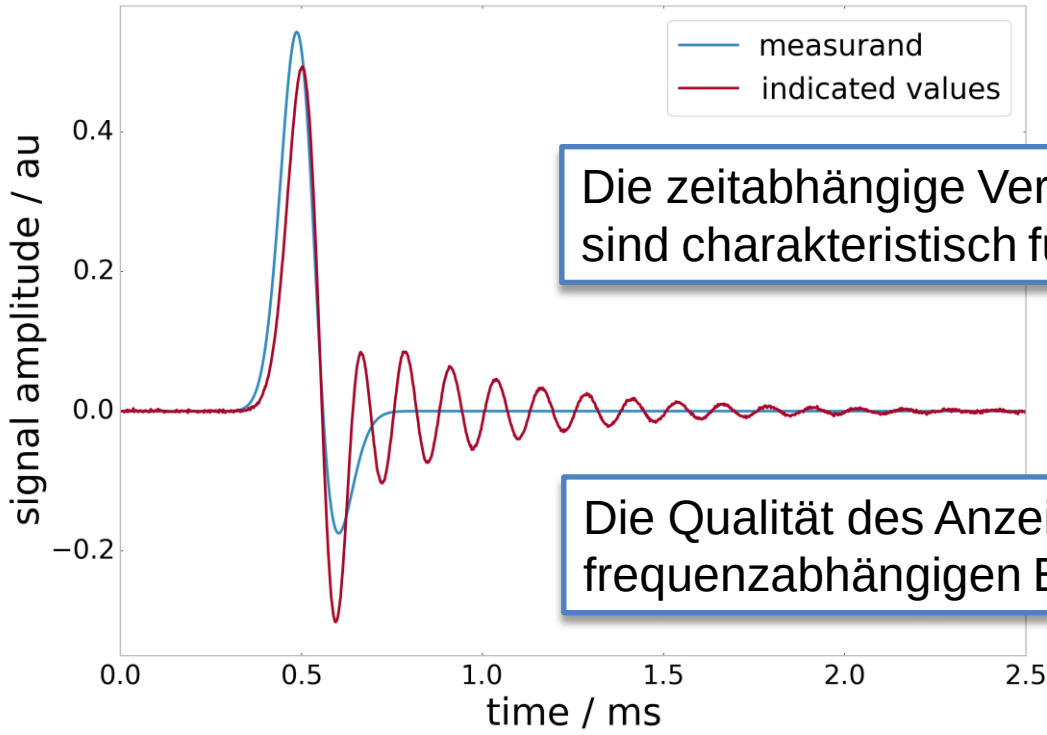
…

2000 Link et al.

Was ist eine dynamische Messung?



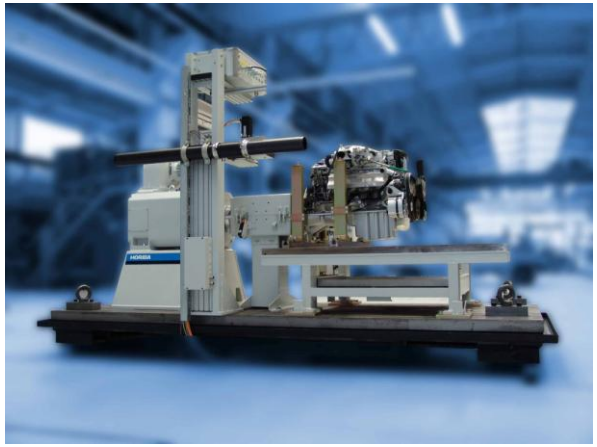
Was ist eine dynamische Messung?



Die zeitabhängige Veränderung der Werte der Messgröße sind charakteristisch für dynamische Messungen.

Die Qualität des Anzeigewertes hängt von den frequenzabhängigen Eigenschaften des Messgeräts ab.

Was ist eine dynamische Messung?

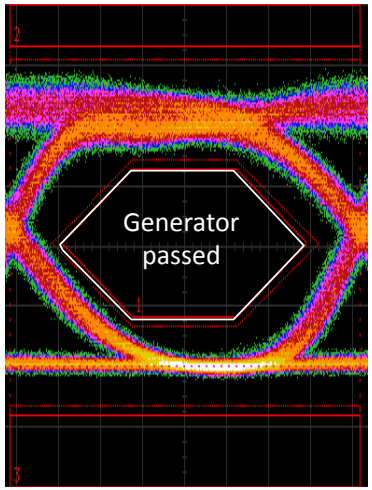


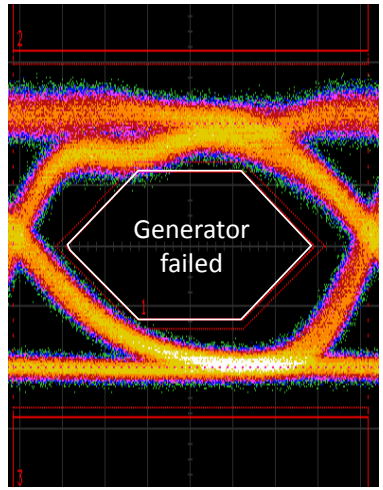
Wikipedia: Transienter Motorenprüfstand

Motorenprüfstand

- Analyse im Betrieb (Drehmomente, wirkende Kräfte, Vibration, Zylinderdruck, etc.)
- Zeitliche Veränderungen in den Messdaten von Interesse
- Sensoren arbeiten oftmals an der Grenze ihrer Spezifikation

Was ist eine dynamische Messung?





Hochgeschwindigkeitselektronik

- Hochfrequente Kommunikation zwischen Elektronik (Bsp. CPU, GPU, etc.) benötigt sauber definiertes Switching
- Oszilloskopmessungen (Eye-Diagramm) für Test von Pulsgeneratoren
- Zeitlicher Verlauf des Switchings entscheidend
- Verwendete Oszilloskope zunehmend an der Grenze ihrer Bandbreite

Dynamische Messungen und das VIM Wörterbuch

Größe

Eigenschaft eines Phänomens, eines Körpers oder einer Substanz, wobei die Eigenschaft einen Wert hat, der durch eine Zahl und eine Referenz ausgedrückt werden kann.

Bei dynamischen Messungen ist der Wert zeitabhängig.

Einheit

Maßeinheit, die durch Vereinbarung für eine Basisgröße festgelegt ist.

Die Maßeinheit einer zeitabhängigen Größe ist zu allen Zeitpunkten konstant.

Messung

Prozess, bei dem einer oder mehrere Größenwerte, die vernünftigerweise einer Größe zugewiesen werden können, experimentell ermittelt werden

Die Größenwerte der zeitabhängigen Größe werden für verschiedene Zeitpunkte, bzw. Zeitintervalle experimentell ermittelt.

Messergebnis

Menge von Größenwerten, die einer Messgröße zugewiesen sind, zusammen mit jeglicher verfügbarer relevanter Information

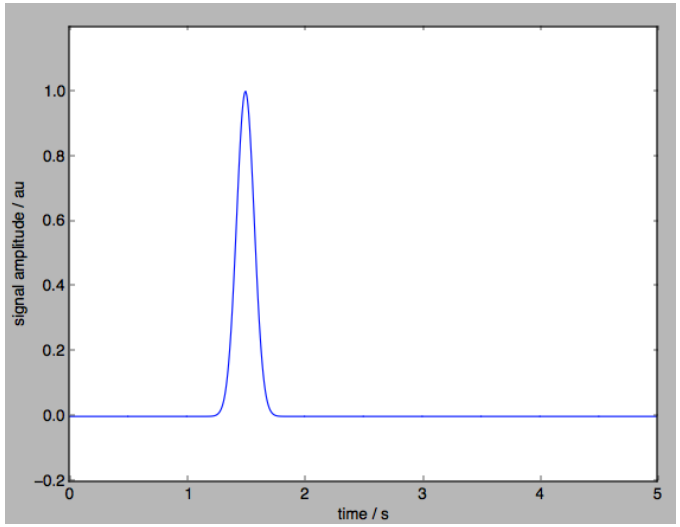
Menge von Größenwerten für verschiedene Zeitpunkte, bzw. Zeitintervalle zusammen mit jeglicher verfügbarer relevanter Information.

Kalibrierung dynamischer Messsysteme

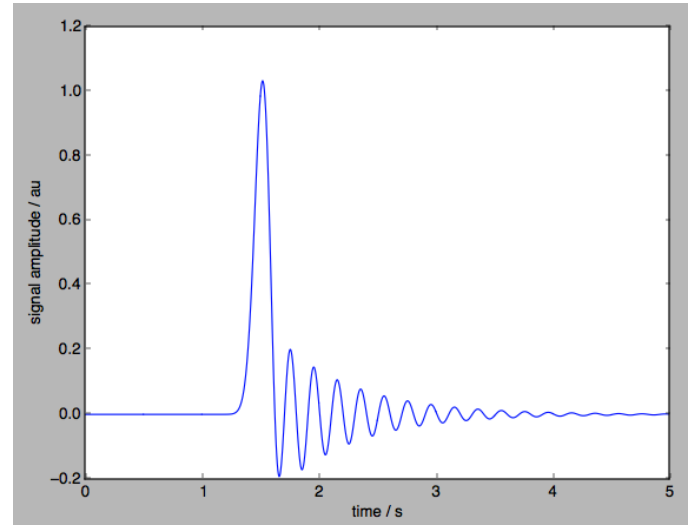
Kalibrierung

*Tätigkeit, die unter festgelegten Bedingungen in einem **ersten Schritt** eine Beziehung zwischen den durch Normale zur Verfügung gestellten Größenwerten mit ihren Messunsicherheiten und den entsprechenden Anzeigen mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten herstellt [...].*

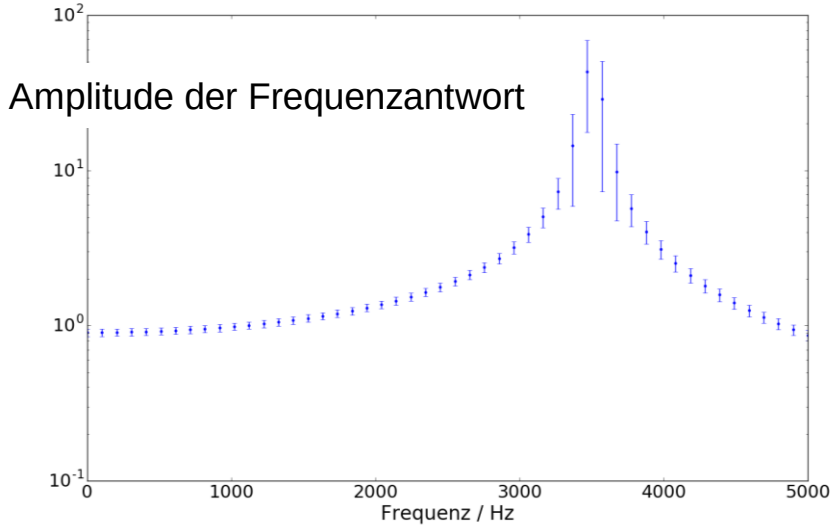
Zeitabhängige Größe → Messsystem → Zeitabhängige Größe

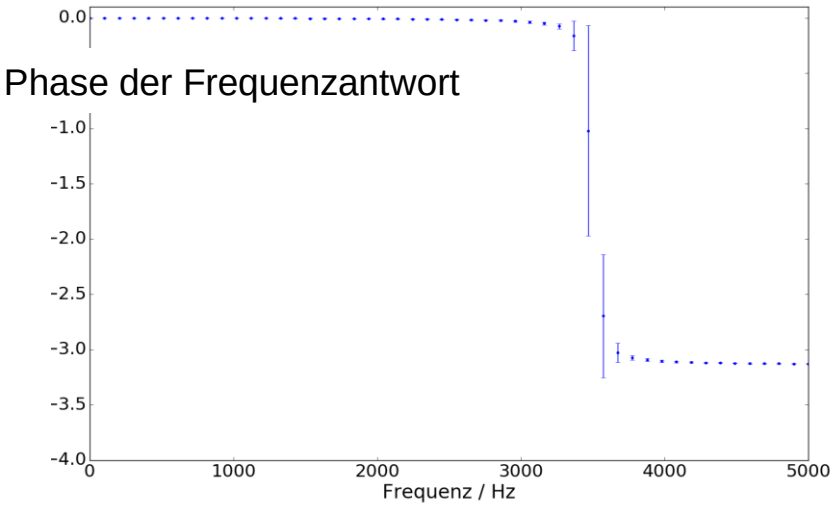


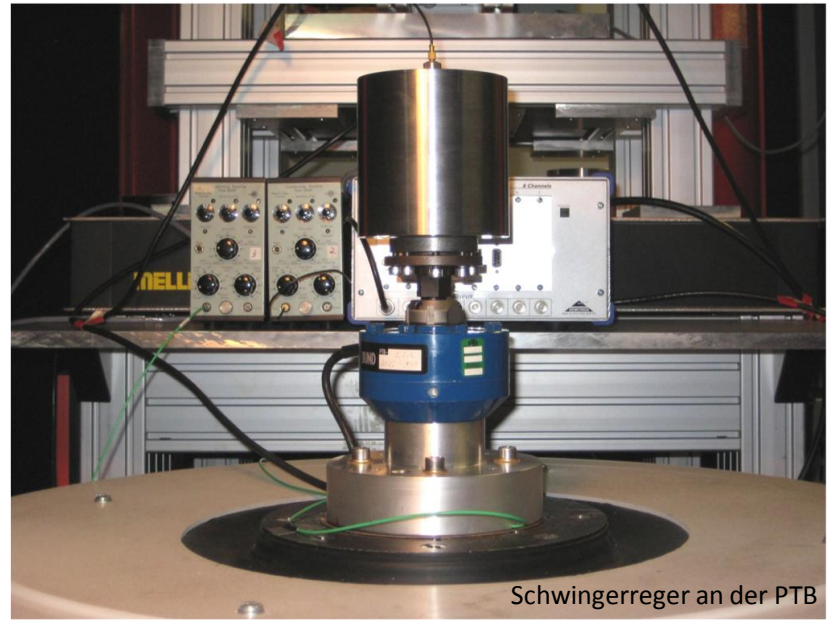
?



Kalibrierung dynamischer Messsysteme






Schwingerreger an der PTB

- Anregung einzelner Frequenzen (Sinus oder Multi-Sinus)
- **Unsicherheit für einzelne Frequenzen**
- Komplexwertige Beschreibung

Link et al., Measurement 2007

Kalibrierung dynamischer Messsysteme

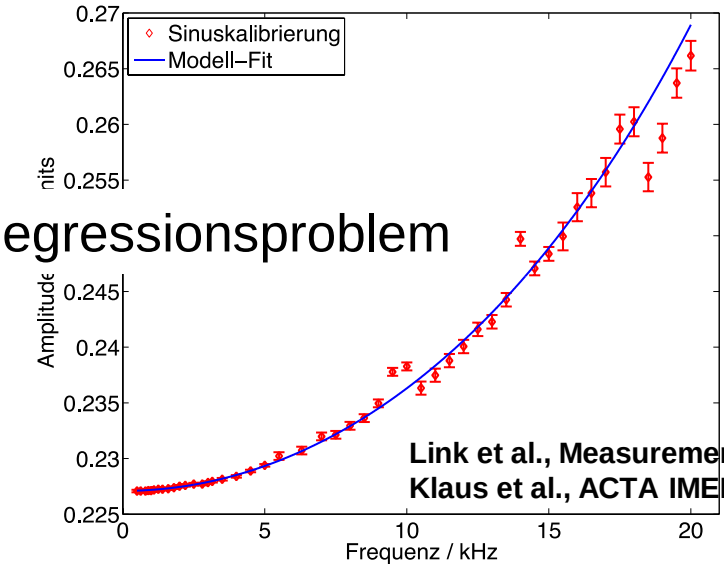
Parametrisches Modell

$$H(s) = H(s;\boldsymbol{\theta})$$

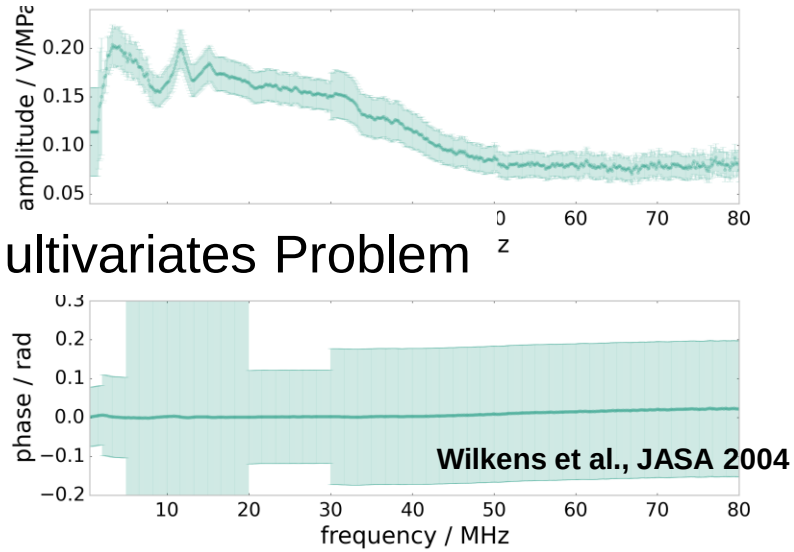
Unparametrisches Modell

$$X(f) = H(f)Y(f)$$

Regressionsproblem



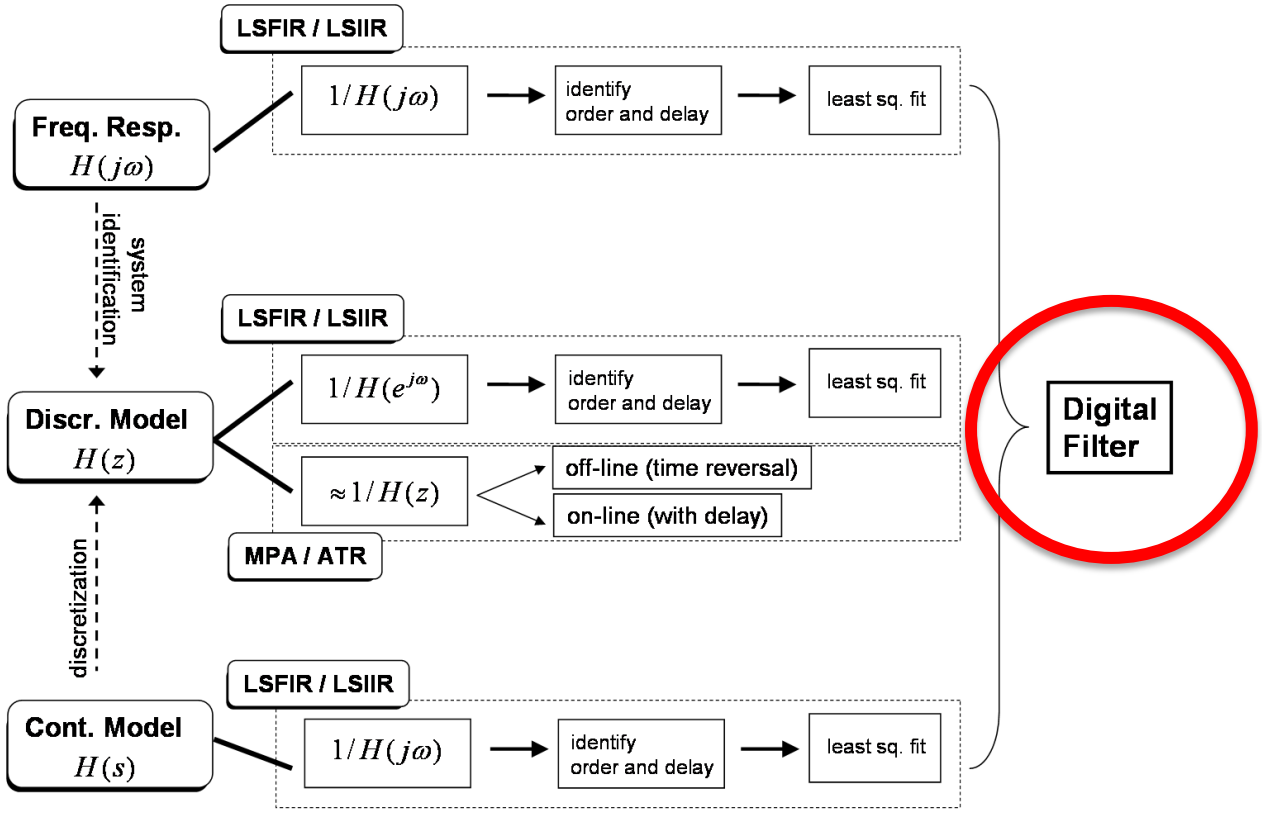
Multivariates Problem



Modellierung für dynamische Messungen

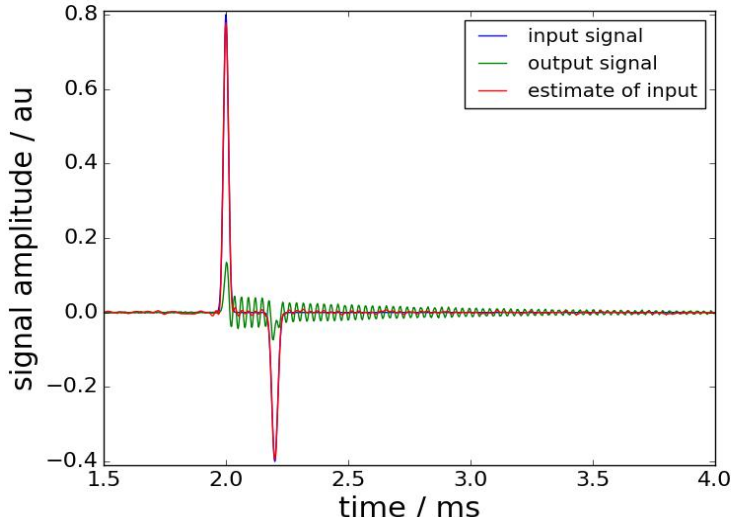
Kalibrierung

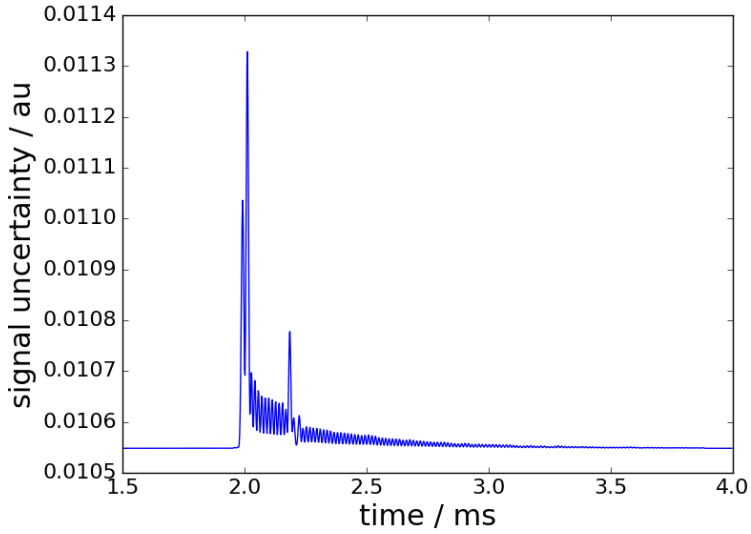
*[...] und in einem **zweiten Schritt** diese Informationen verwendet, um eine Beziehung herzustellen für die Bestimmung eines Messergebnis.*



Eichstädt et al., Metrologia 2010

Messunsicherheit (digitales Filter)





Modell der Auswertung

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x[n-k] \qquad g_{low}(z) = \sum_{k=0}^{M_{low}} a_k z^{-k}$$

Kenntnis der Eingangsgrößen

$$\hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{U_x}, \hat{\boldsymbol{b}}, \boldsymbol{U_b}, d$$

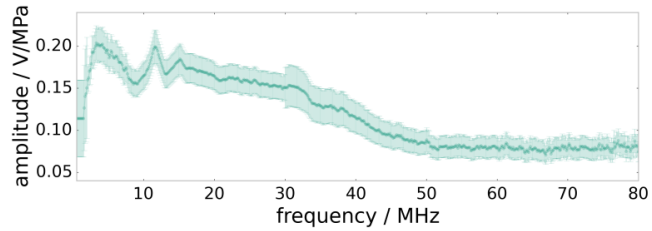
Schätzwert der Messgröße

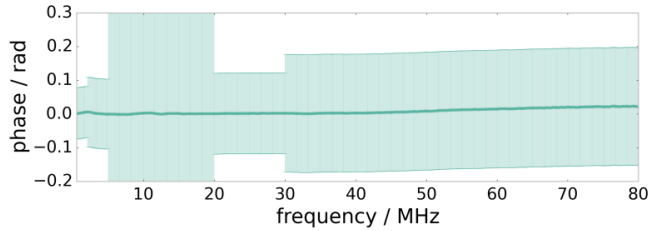
$$\hat{y}[n-d] = ((\hat{\boldsymbol{x}} * g_{low}) * g)[n]$$

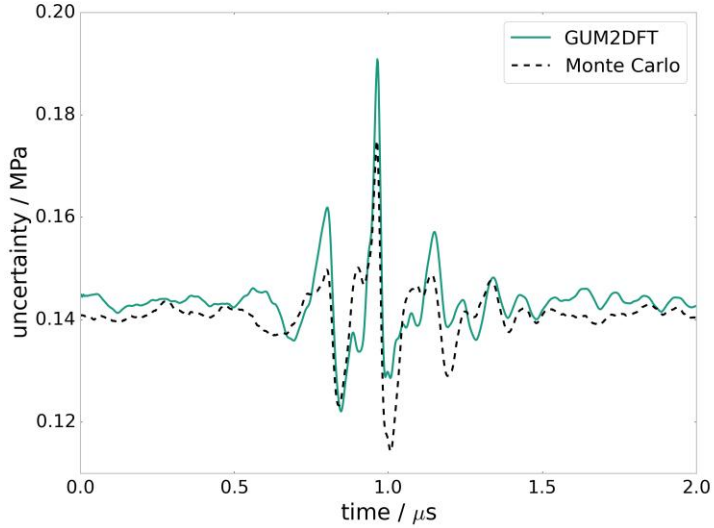
$$u^2(\hat{y}[n-d]) = b^T U_{x_{low[n]}} b + \boldsymbol{x}_{low}[n] \boldsymbol{U_b} \boldsymbol{x}_{low}[n] + Tr(\boldsymbol{U_{x_{low}[n]}} \boldsymbol{U_b})$$

Elster and Link, Metrologia 2008

Messunsicherheit (unparametrisch)







Modell der Auswertung

$$Y(f) = \frac{X(f)}{\widetilde{H}(f)}$$

Kenntnis der Eingangsgrößen

$$\boldsymbol{H} = (\Re_0, \ldots, \Re_N, \Im_0, \ldots, \Im_N)^T$$

$$\boldsymbol{U_H} = \begin{pmatrix} u^2(\Re) & u(\Re, \Im) \\ u(\Re, \Im) & u^2(\Im) \end{pmatrix}$$

Schätzwert der Messgröße

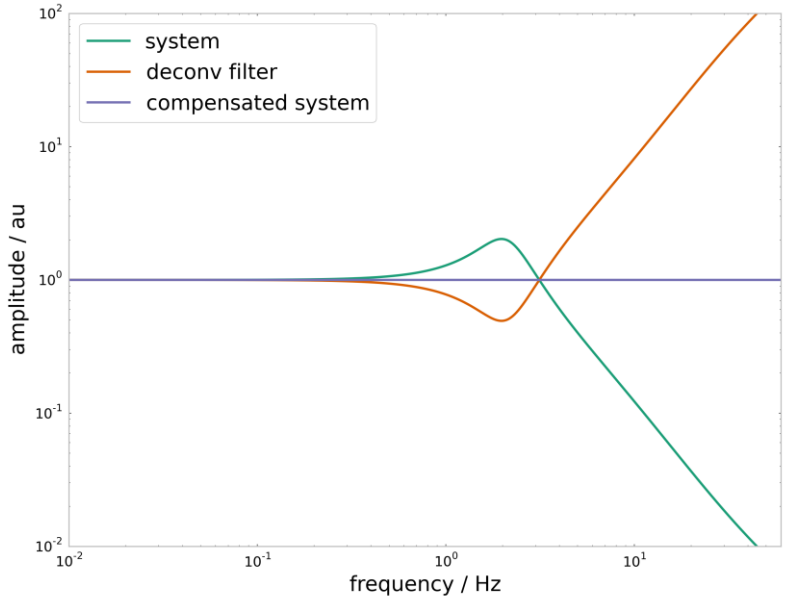
$$\hat{Y}(f) = \frac{\hat{X}(f)}{\widehat{\widetilde{H}}(f)}$$

$$U_{\hat{Y}}$$

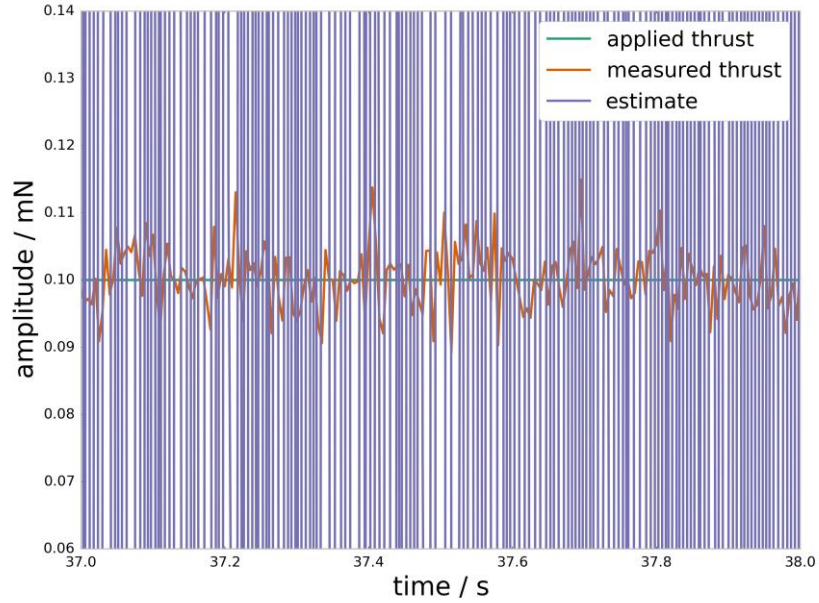
Eichstädt and Wilkens, MST 2016

Regularisierung des idealen Modells

Ideales Modell



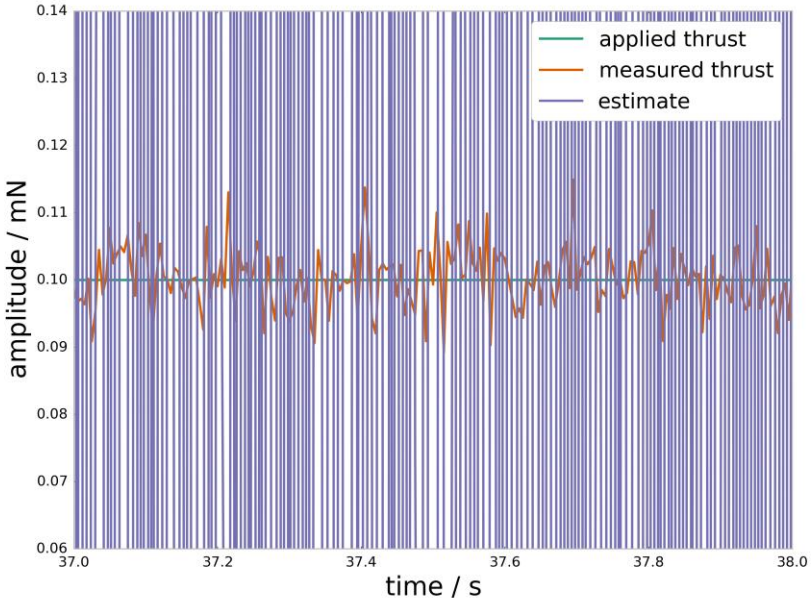
Resultat der Anwendung

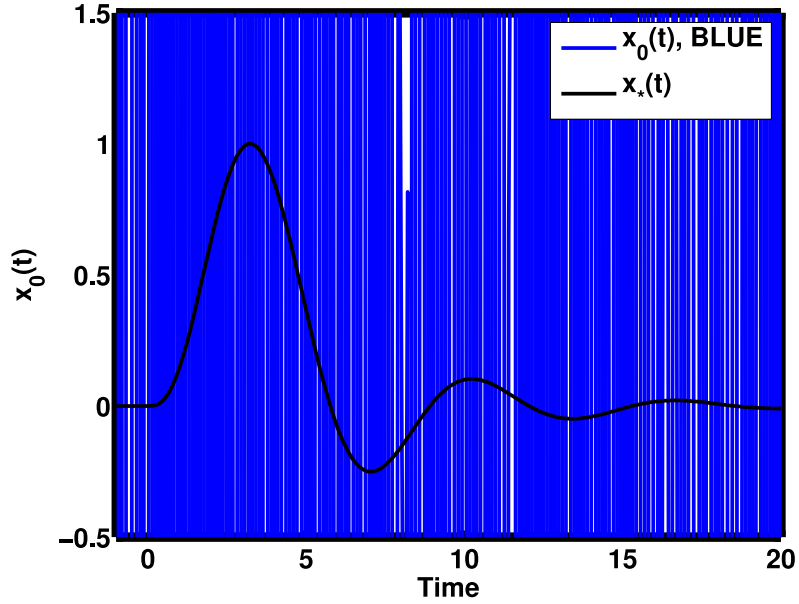


Eichstädt et al., Metrologia 2016

Regularisierung des idealen Modells

Resultat der Anwendung





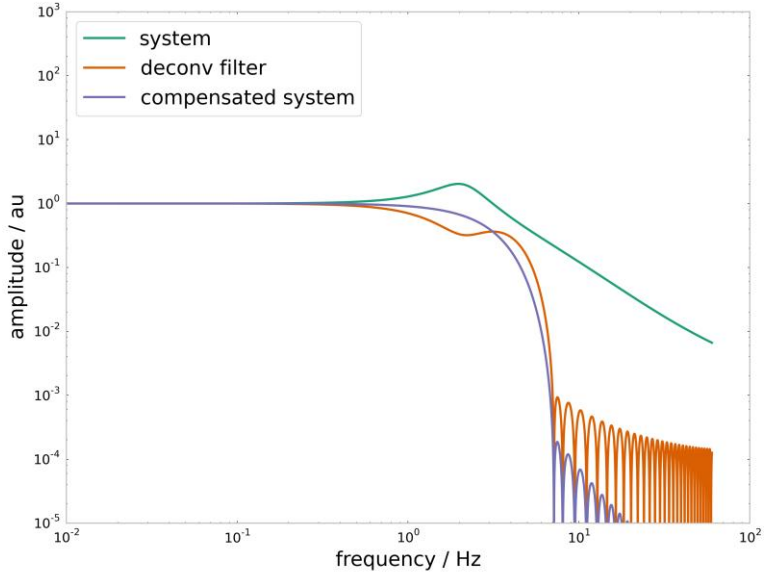
Eichstädt et al., Metrologia 2016

Regularisierung

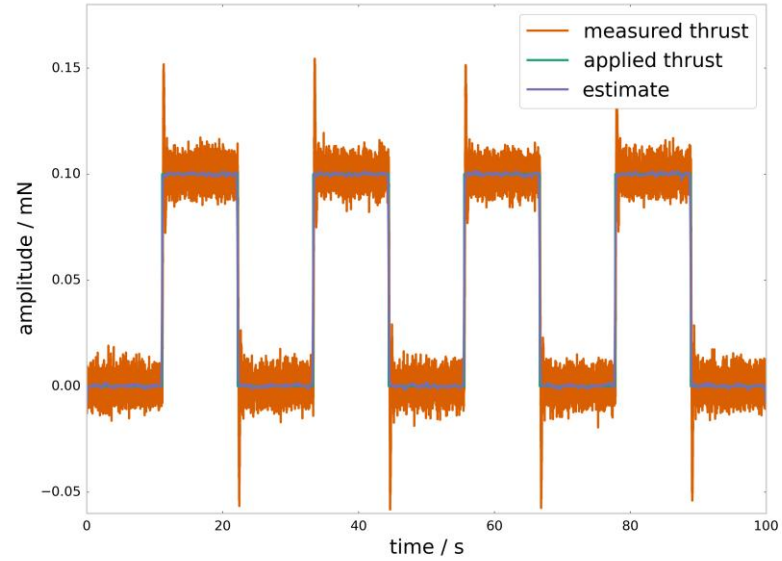
Ideales Modell **Regularisierungsteil**

$$G(\omega) = H^{-1}(\omega)$$

Regularisiertes Modell



Resultat der Anwendung



Eichstädt et al., Metrologia 2016

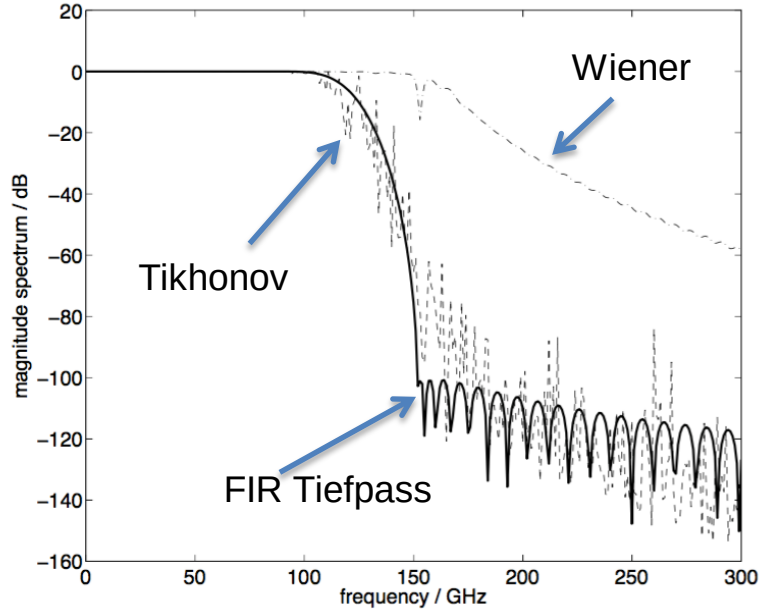
Regularisierung

Wiener deconvolution

$$G(\omega) = H^{-1}(\omega)\frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + N(\omega)/Y(\omega)}$$

Tikhonov deconvolution

$$G(\omega) = H^{-1}(\omega)\frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + \lambda^2|L(\omega)|^2}$$



Regularisierung für dynamische Messungen kann prinzipiell durch den Einsatz eines Tiefpassfilters erreicht werden.

Eichstädt. PhD Thesis 2012

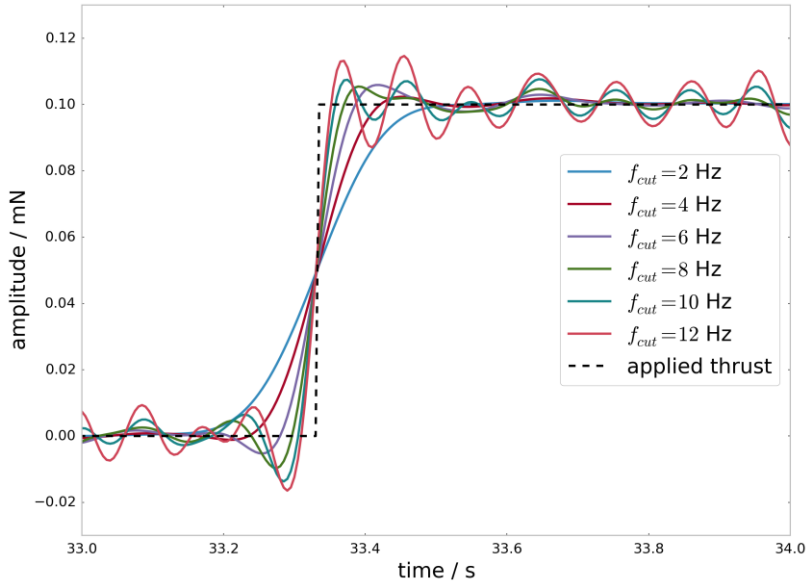
Regularisierung

Ideales Modell

$$\frac{1}{H(\omega)}$$

Regularisiertes Modell

$$\frac{H_L(\omega)}{H(\omega)}$$



Die (notwendige) Regularisierung erzeugt eine systematische Abweichung

$$u_y^2[n] = u^2(x * g) + u^2(d_L)$$

Abschätzung des Regularisierungsfehlers benötigt Vorkenntnis über die Messgröße!

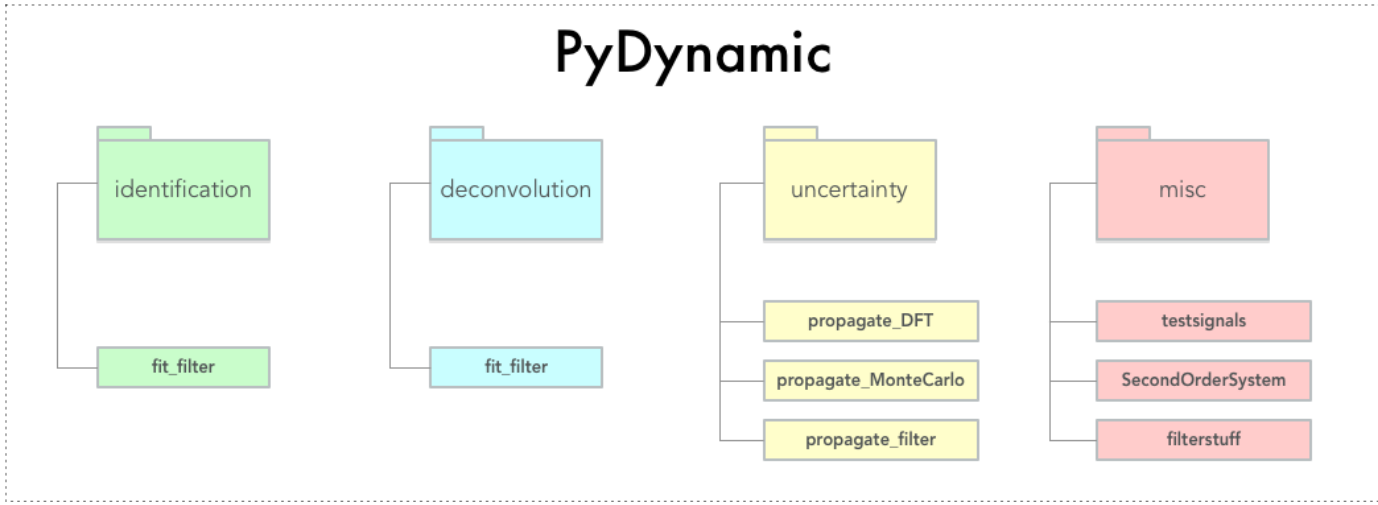
$$Y = f(X_1, \ldots, X_n, Y)$$

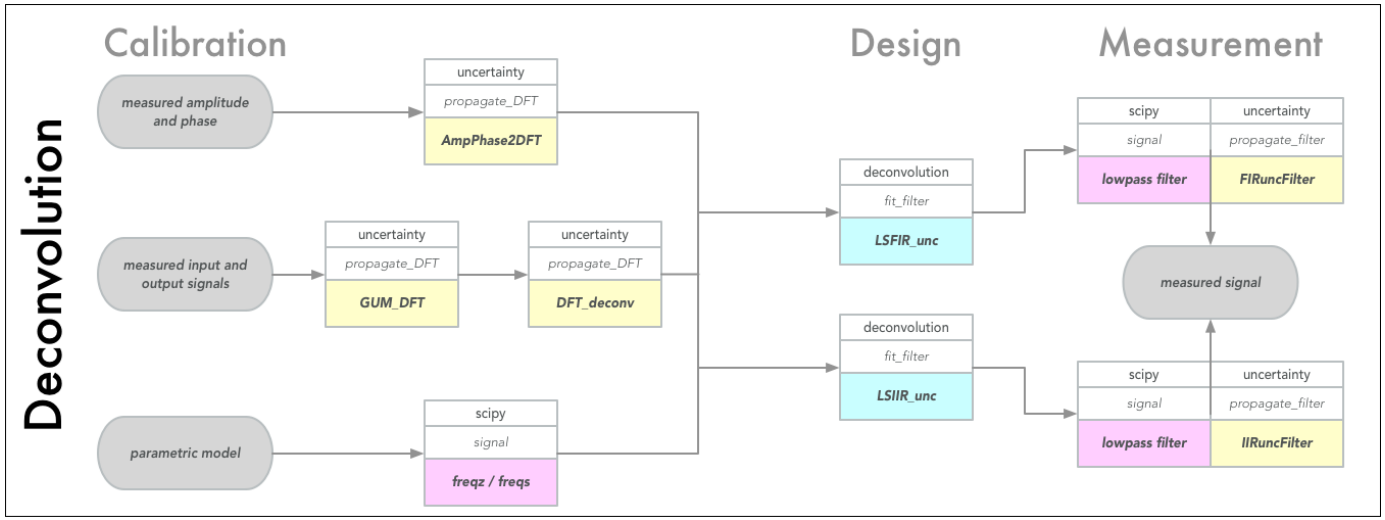
Eichstädt et al. Metrologia 2016
Eichstädt and Wilkens, JASA 2017

Zusammenfassung

- VIM und GUM grundsätzlich leicht adaptiert anwendbar
- Modellbildung und Kalibrierung deutlich komplexer als für typische statische Messungen
- Regularisierung große Herausforderung für die Anwendung des GUM
  - Unvermeidbarer systematischer Fehler, der nicht korrigiert werden **kann.**
  - Berücksichtigung in Unsicherheitsbudget benötigt Vorkenntnis über die Messgröße.

Software-Paket für dynamische Messungen





GitHub

Eichstädt et al. Journal of Sensors and Sensor Systems 2017

PTB

EINLADUNG

digital.ptb.de

Metrologie als Fundament für die Digitalisierung

Workshop ▪ 10. April 2018 ▪ 9:30 Uhr bis 13:30 Uhr ▪ Institut Berlin der PTB

Die Teilnahme ist kostenlos.

Programm

9:30 – 9:35	Eröffnung des Workshops - *Dr. Prof. h. c. Frank Härtig (Abteilungsleiter PTB)*
9:35 – 9:50	Grußwort - *Dirk Wiese (Parlamentarischer Staatssekretär BMWi)*
9:55 – 10:15	Digitalisierungskonzept der PTB - *Prof. Dr. Joachim Ullrich (Präsident PTB)*
10:20 – 10:50	Deutschlands digitale Reise - *Prof. Dr. Henning Kagermann (Präsident acatech)*
10:55 – 11:15	Rechtsfragen bei der Digitalisierung - *Prof. Dr. Alexander Roßnagel (Institut für IT-Recht der Universität Kassel)*
11:15 – 11:45	Kaffeepause
11:45 – 12:05	Digitalisierung aus industrieller Perspektive - *Dr. Reinhard Baumfalk (Sartorius Lab Instruments)*
12:10 – 12:30	Digitale Zwillinge und Digitale Kalibrierscheine - *Dr. Julia Hornig (PTB)*
12:35 – 13:20	Paneldiskussion mit dem Auditorium - *Dr. Siegfried Hackel (PTB, Moderation) und Vortragende*
13:25 – 13:30	Schlusswort - *Dr. Prof. h. c. Frank Härtig (Abteilungsleiter PTB)*
ab 13:30	Mittagsimbiss

Literatur

Cornu A 1887 “Sur la condition de stabilite du movement d’un systeme oscilant soumis a une liaison synchrinique pendulaire” C.r. Acad. sci., 104 (22), 1463-1470

Blondel A 1893 “Oscillographes, nouveaux apparelis pour l’etude des oscillations electriques lentes” – C.r. Acad. sci., 116 (10), p. 502-506

Kalman, R. E. 1960: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems (= Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering). S. 35–45

Wiener N 1964 “The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series”. MIT Press Ltd

Tikhonov A N and Arsenin V 1979 “Solutions of ill-posed problems”. Winston & Sons

A. Link, W. Wabinski, A. Pohl and H.-J. von Martens 2000 Accelerometer identification using laser interferometry. Proceedings of SPIE Seite 126-136

Volker Wilkens and Christian Koch 2004 Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. J Acoust Soc Am, vol. 115 (6) pp. 2892-12.

D F Williams, A Lewandowski, T S Clement, J C M Wang, P D Hale, J M Morgan, D A Keenan, and A Dienstfrey. 2005 Covariance-based uncertainty analysis of the NIST electrooptic sampling system. IEEE Trans Microwave Theory Techn, vol. 54 (1) pp. 481-491.

A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns and C. Elster 2007 Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation. Measurement, 40(9-10), 928-935

C. Elster and A. Link 2008 Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system. Metrologia, 45(4), 464-473

S. Eichstädt, C. Elster, T. J. Esward and J. P. Hessling 2010 Deconvolution filters for the analysis of dynamic measurement processes: a tutorial. Metrologia, 47(5), 522-533

S. Eichstädt 2012 Analysis of Dynamic Measurements - Evaluation of dynamic measurement uncertainty. PhD Thesis

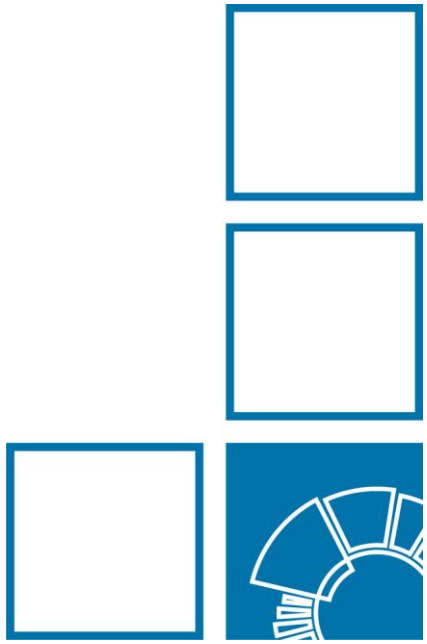
L. Klaus, B. Arendacká, M. Kobusch and T. Bruns 2015 Dynamic torque calibration by means of model parameter identification. ACTA IMEKO, 3(1), 1-6, 2015.

S. Eichstädt, V. Wilkens, A. Dienstfrey, P. Hale, B. Hughes and C. Jarvis 2016 On challenges in the uncertainty evaluation for time-dependent measurements. Metrologia, 53(4)

S. Eichstädt and V. Wilkens 2016 GUM2DFT — a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain. Measurement Science and Technology, 27(5), 055001

S. Eichstädt and V. Wilkens 2017 Evaluation of uncertainty for regularized deconvolution: A case study in hydrophone measurements. J. Acoust. Soc. Am., 141(6), 4155--4167

S. Eichstädt, C. Elster, I. M. Smith and T. J. Esward 2017 Evaluation of dynamic measurement uncertainty – an open-source software package to bridge theory and practice. J. Sens. Sens. Syst., 6 97-105



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Abbestr. 2-12
10587 Berlin

Dr. Sascha Eichstädt
Telefon: 030 3481 2008
E-Mail: sascha.eichstaedt@ptb.de
https://digital.ptb.de