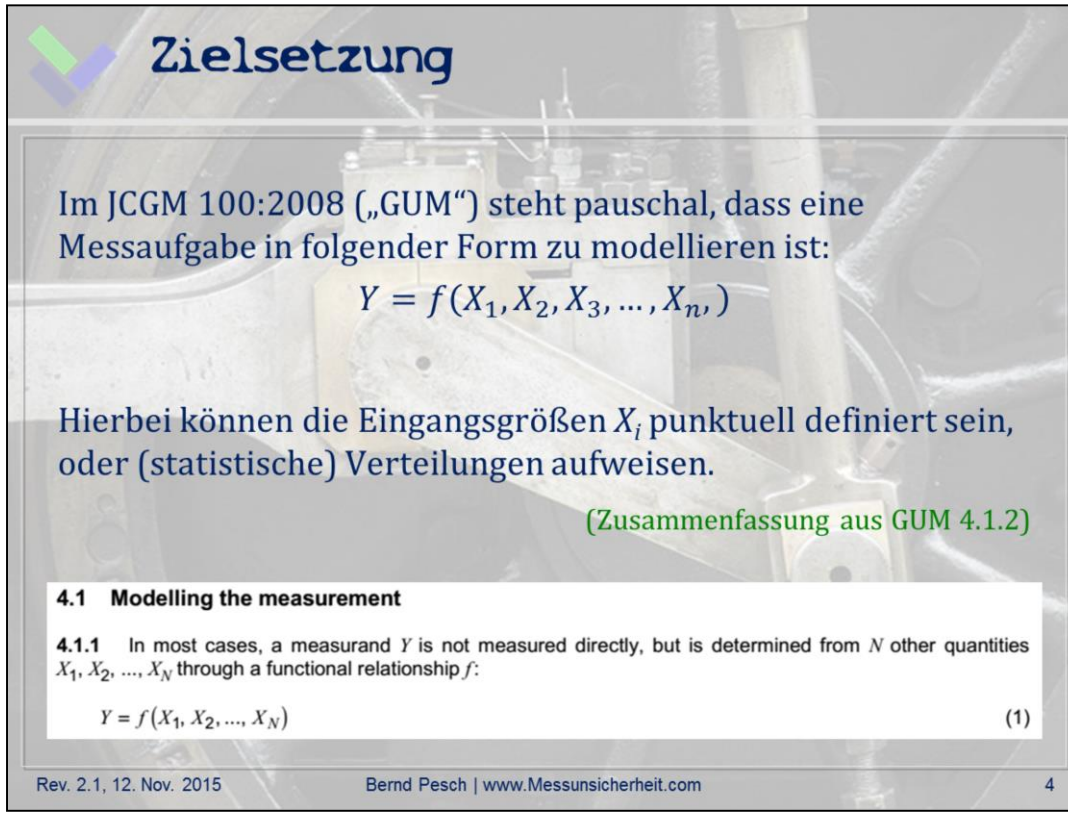
Dieses Handout fasst die relevanten Inhalte des Seminarbeitrags kommentiert zusammen.

Der Vortrag basiert auf der Einführung zur Messunsicherheit, wie er auch für das Kalibrierzentrum der Bundeswehr, oder extern im Rahmen von PTB/BAM/DKD-Seminaren gehalten wird.

Übersicht
Ziele
Aufgabenstellung
Messgröße
Prozessgleichung
Messunsicherheitsanalyse
Modellgleichung
Rev. 2.1, 12. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
2

»Es zeichnet einen gebildeten Geist aus, sich mit jenem Grad an Genauigkeit zufrieden zu geben, den die Natur der Dinge zulässt, und nicht dort Exaktheit zu suchen, wo nur Annäherung möglich ist.«
Aristoteles,
Nikomachische Ethik I, Kapitel 3, 25, 1094b
Ziele



Dieser Vortrag orientiert sich an der klassischen Form des GUM-Frameworks, wie es in JCGM 100:2008 beschrieben wird.

Dennoch sind die Schritte bis hin zur Modellgleichung fast unverändert auch auf die Monte Carlo Simulation nach JCGM 101:2008 anwendbar.

Bemerkung: Unklar bleibt, wie man zu einer solchen Modellierung kommt und wie sie gestaltet sein sollte.

Das GUM bleibt hier die notwendigen Hilfestellungen für die Praxis schuldig.

Weitere Hinweise

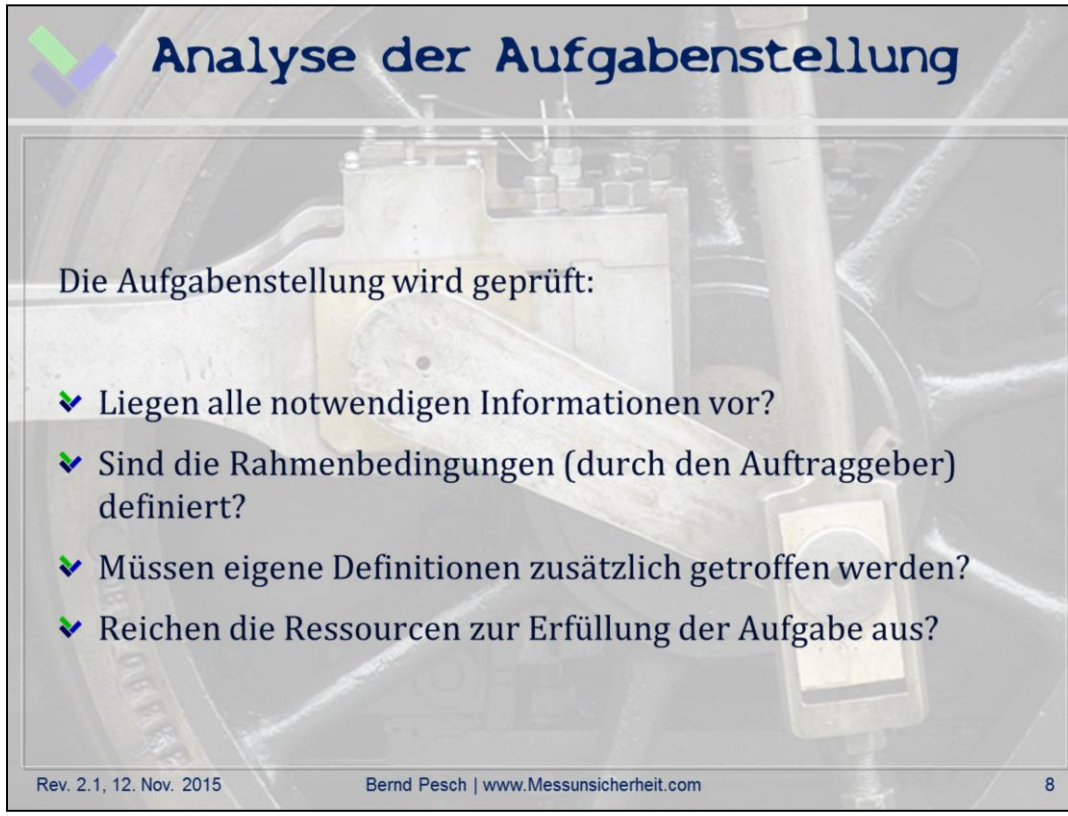
Auch weitere Hinweise zeigen die Charakteristik der Modellierung, helfen aber wenig weiter:

- Die Einflüsse X_i können wiederum aus Messungen stammen, oder ihrerseits von anderen Größen abhängig sein.
- Sie können auf Korrektionen beruhen.
- f kann so komplex sein, dass die Funktion gegebenenfalls nicht explizit niedergeschrieben werden kann.
- Alle Einflüsse, die signifikant sein können, müssen aber enthalten sein.
- ...

(Nach GUM 4.1.2)

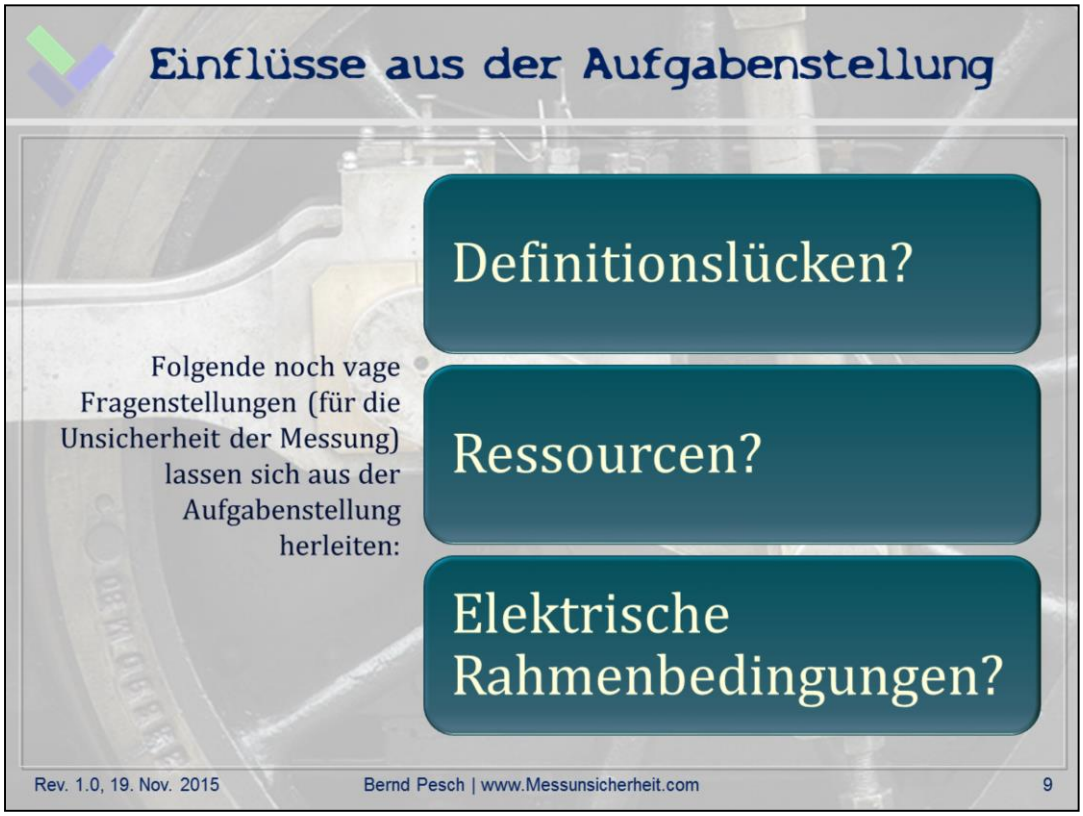
»Wenn alle Experten sich einig sind, ist Vorsicht geraten.«
Bertrand Russell
Mit der Messaufgabe vertraut werden

Zu beachten ist, dass der elektrische Anteil der Messkette ebenfalls vollumfänglich mit zu berücksichtigen und rückzuführen ist.

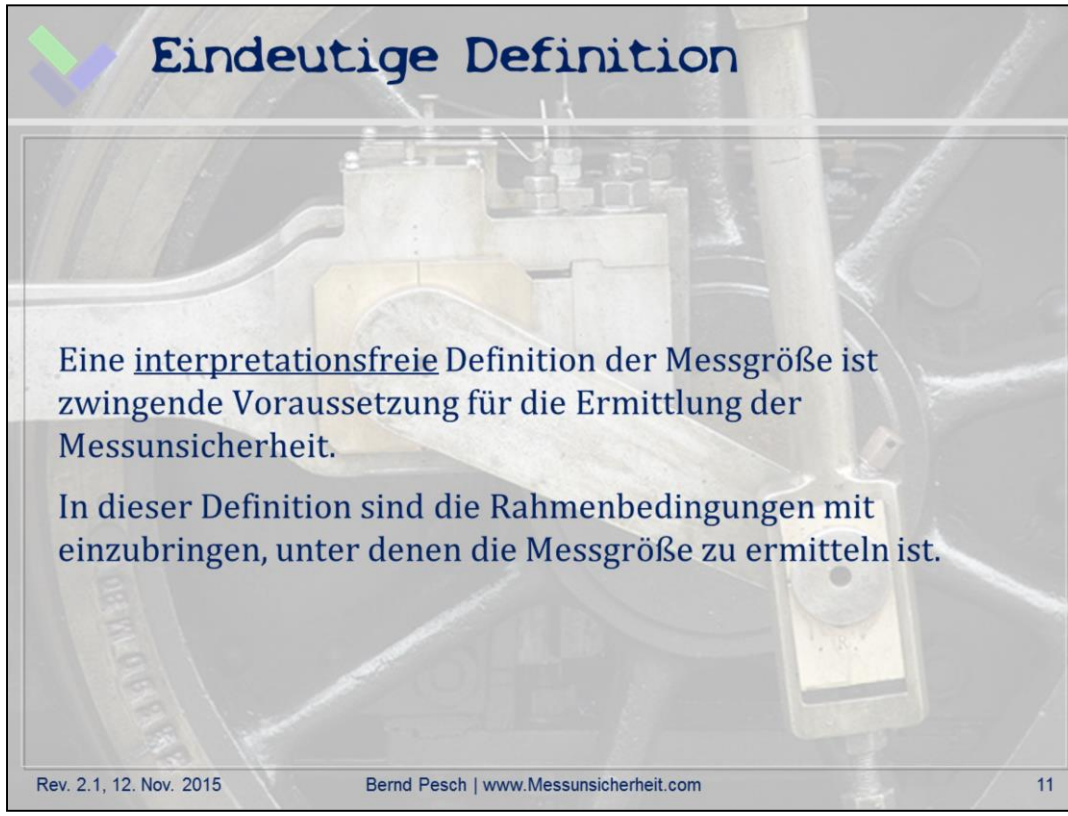


Ziel ist es, alle Rahmenbedingungen festzulegen, die eine Messung beeinflussen können.

Viele Bedingungen sind bereits durch die Aufgabenstellung und durch geltende Vorschriften (Normen, Vorgaben des Kunden, interne Arbeitsanweisungen,...) definiert. Offene Punkte sind festzulegen, oder deren Auswirkungen auf die Messunsicherheit zu berücksichtigen.


Einflüsse aus der Aufgabenstellung
Folgende noch vage Fragenstellungen (für die Unsicherheit der Messung) lassen sich aus der Aufgabenstellung herleiten:
Definitionslücken?
Ressourcen?
Elektrische Rahmenbedingungen?
Rev. 1.0, 19. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
9

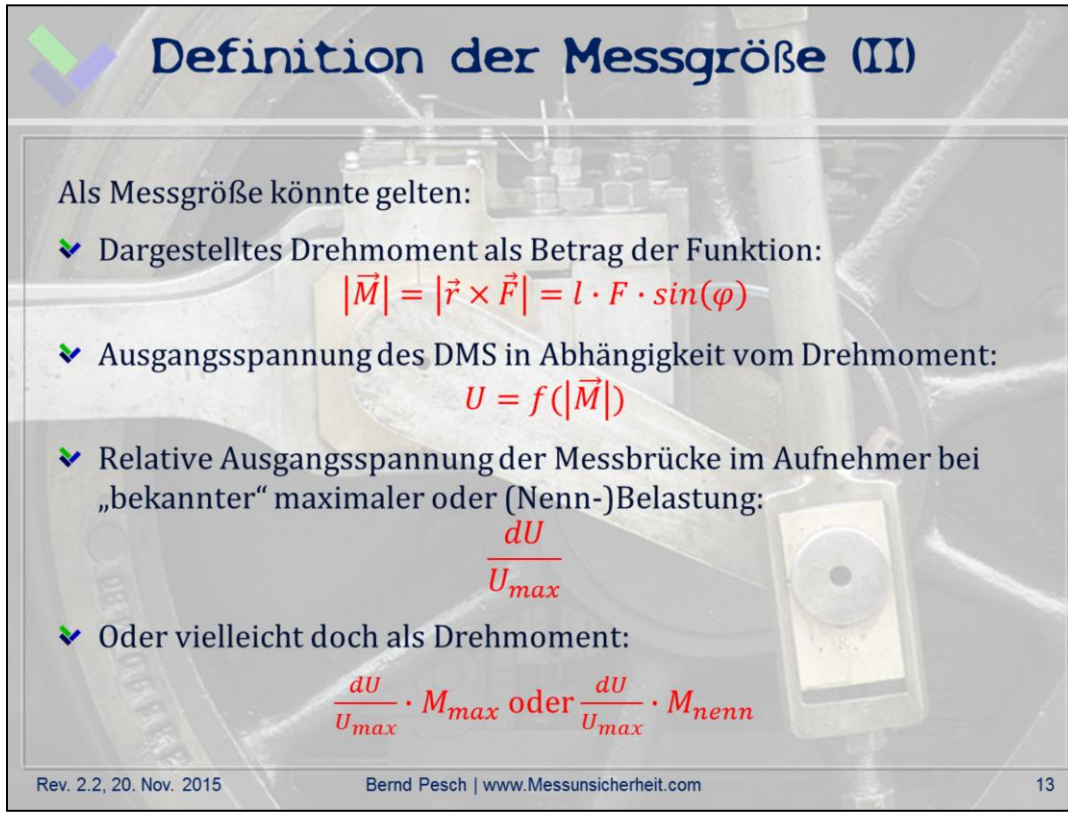
»Wir alle messen verkehrt.
Wir müssen nur wissen,
wieviel«
David Packard
(Mitbegründer von Hewlett Packard)
Definition der Messgröße und ihre Bedingungen



Nehmen wir beispielsweise ein dynamisches Drehmoment, welches an einer Achse mittels Torsionselement abgenommen wird. Hier würde zur Messgröße nicht nur das Drehmoment, sondern gegebenenfalls auch Umdrehungsgeschwindigkeit und Bremskraft gehören (Arbeitspunktfestlegung).

Es ist eine dringende Empfehlung, alle rückführbaren Messungen SI kohärent zu gestalten und nur dann auf andere (informelle) Einheiten auszuweichen, wenn es nicht anders möglich ist.

Zudem ist hier bereits eine erste Verfeinerung des Messprozesses zu sehen, in dem dargestellt wird, wie die Messgröße generiert wird.



Eine eindeutige Definition der Messgröße ist oft nicht so trivial, wie es auf dem ersten Blick aussieht. Der Drehmomentmessaufnehmer misst eigentlich die Widerstandsänderung eines Dehnungsmesstreifens. Demnach kann eine Messgröße „Drehmoment“ nur über Umwege und weitere Kenntnisse des physikalischen Prinzips der Messung beschrieben werden.

Nebenbedingungen
Folgende Nebenbedingungen gehören zwingend mit zur Definition der Messgröße, da hieraus Informationen zu Messunsicherheitseinflüssen gezogen werden:
Angelegte Brückenspannung
Gleich- oder Wechselspannung (welche Frequenz)
Bei Wechselspannung: zusätzliche Filter
Betriebsrichtung
...
Rev. 1.0, 18. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
14

Beispiele…

Beispieltext (didaktische Darstellung) ohne Anspruch auf Korrektheit bei der vorgestellten Messaufgabe.

Einflüsse aus der Definition

Unklarheiten in der Definitionen der Messgröße können zu Messunsicherheits-einflüssen werden.

Rahmenbedingungen?

- Messung der Umdrehungsgeschwindigkeit

Rückführung SI-konform?

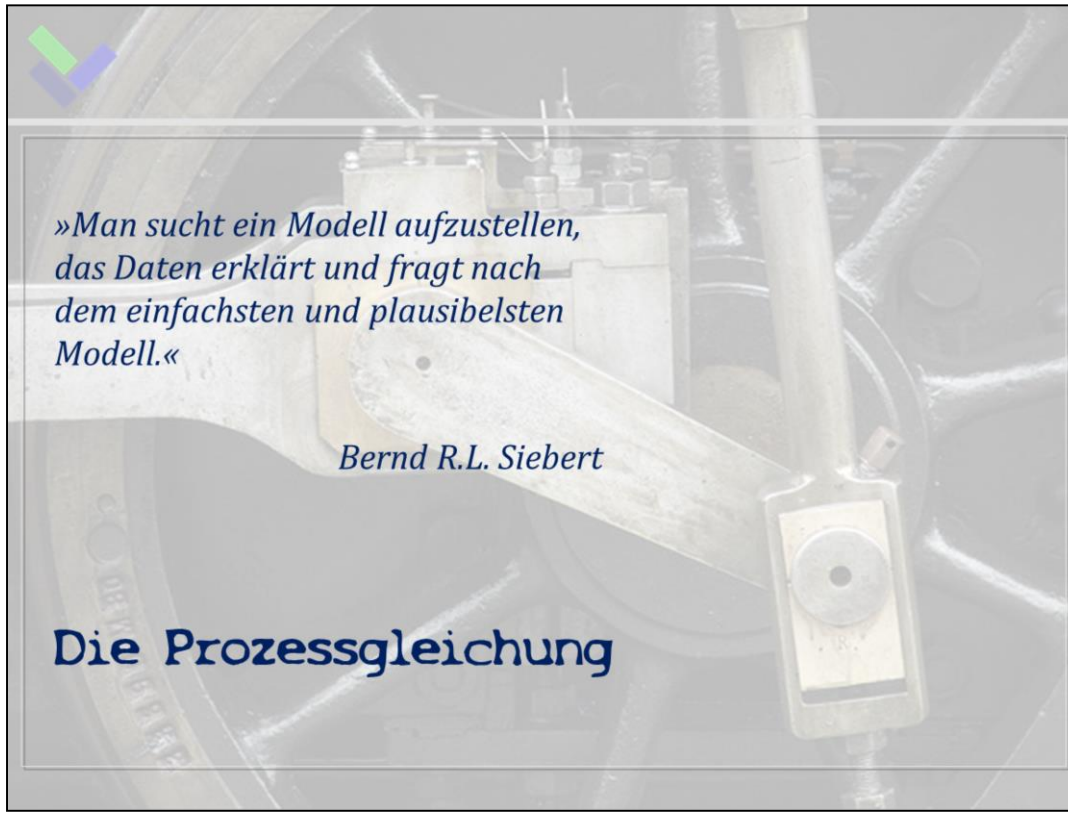
- Notwendige Umrechnungen

Betriebsspannung?

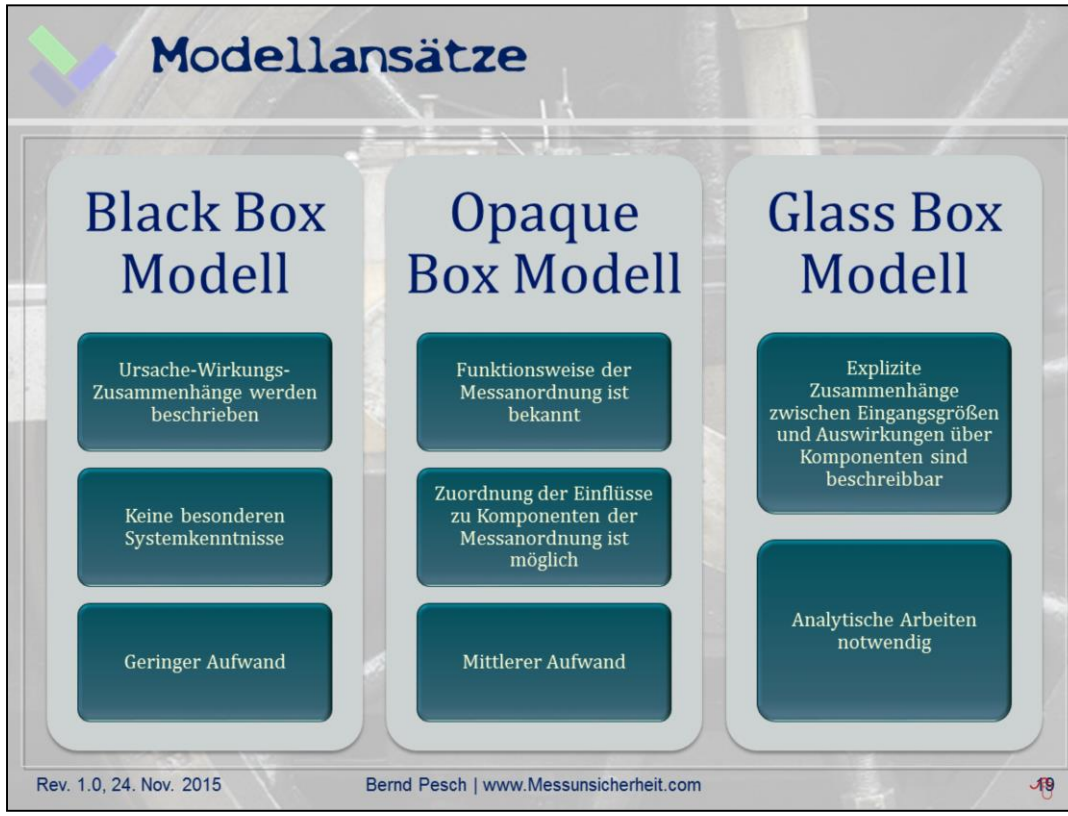
- Frequenz

Filter

- Charakteristik
- Flankensteilheit


»Man sucht ein Modell aufzustellen,
das Daten erklärt und fragt nach
dem einfachsten und plausibelsten
Modell.«
Bernd R.L. Siebert
Die Prozessgleichung

Oft ist die Prozessgleichung deckungsgleich mit der Definition der Messgröße.



Das Black Box Modell ist lediglich ein erster Ansatz zum Abschätzen der Möglichkeiten und eine Rückfalloption, wenn keine detaillierten Kenntnisse erarbeitet werden können.

Das Opaque Modell ist das beste (wirtschaftlichste) Modell für die Ermittlung der Messunsicherheit.

Glass Box Modelle sind oft nur mit Systemuntersuchungen erreichbar.

Hier haben wir bereits einen ersten guten Ansatz zur Ermittlung einer Prozessgleichung.

Die vorliegende Messaufgabe lässt sich derart beschreiben.

Wären interne Systemkenntnisse vorhanden, die Grenzbedingungen und –überschreitungen beschreibbar machen (Beispiel: Verhalten bei Überlastung, unzulässige Anzeigewerte), liegt ein Glass Box Model vor.

Für die meisten Messunsicherheitsbestimmungen ist dieses Modell nicht notwendig.

Glass Box: (Nahezu) vollständige Transparenz über das Verfahren und sein Verhalten bei Grenzwerten und deren Überschreitung.

Prozessgleichung (I)

Für die Messaufgabe kann genutzt werden:

$$m \cdot g \cdot l \cdot sin(\varphi) = \frac{dU}{U_{max}} \cdot M_{Nenn}$$

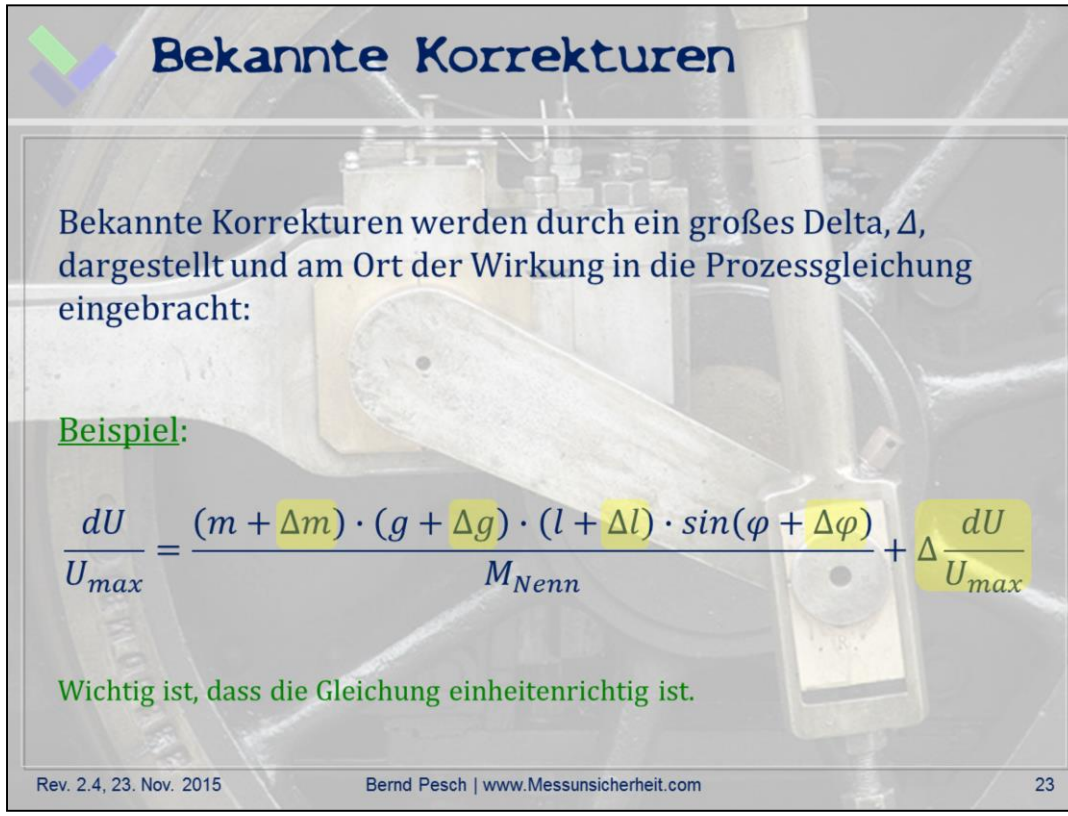
Oder:

$$\frac{dU}{U_{max}} = \frac{m \cdot g \cdot l \cdot sin(\varphi)}{M_{Nenn}}$$

Stimulus

Konstante(?)

Messgröße



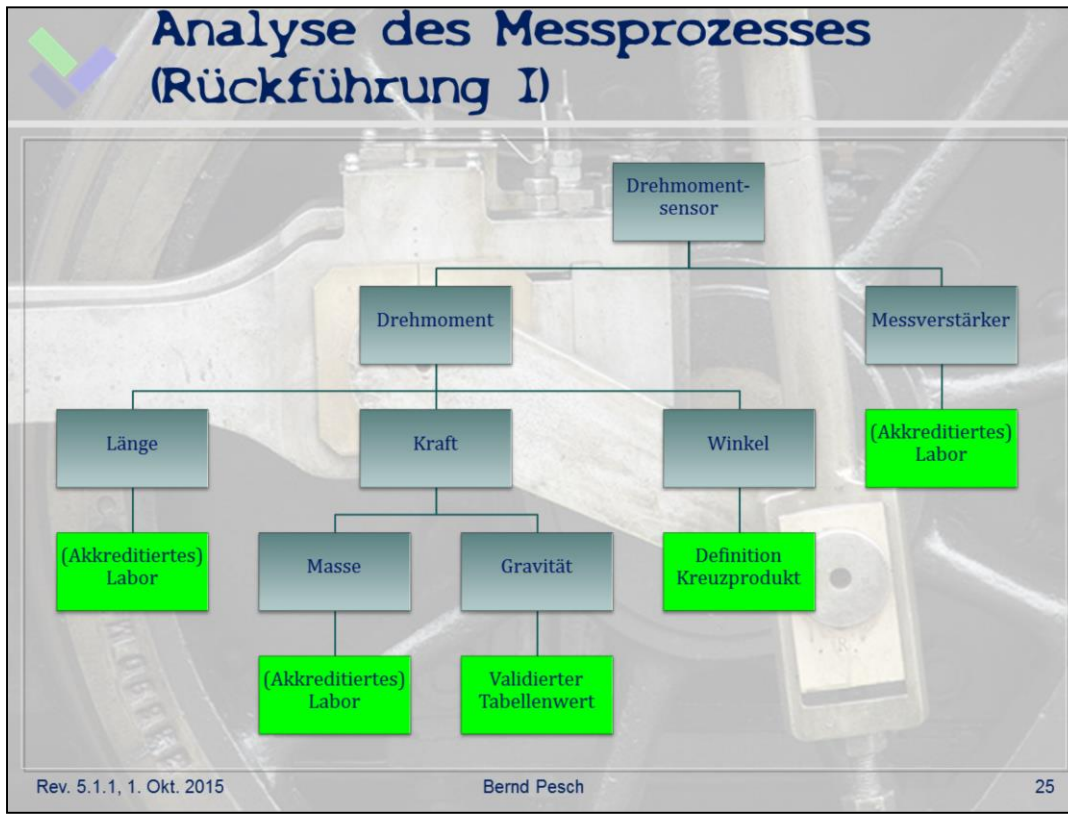
Dies ist noch keine Modellgleichung, sondern nur eine weitere Verfeinerung der Prozessgleichung, da die Korrekturen bekannte Größen sind.

Unstrittig ohne Messunsicherheit

Es gibt vier Klassen von Größenwerten, die ohne Messunsicherheit bei Messungen verwendet werden:

- Mathematische Konstanten ($\pi = 3{,}1415$)
- Konstanten in Definitionen ($t_0 = 273{,}15\ K$)
- Vorgabewerte/Betriebsbedingungen ($I_{LED} = 20\ mA$)
- Diskrete (zählbare) Werte (1, 2, 3, ...)

Alle anderen Größen in der Metrologie beinhalten eine (Mess-) unsicherheit.



An jedem Punkt des Diagramms können Messunsicherheitseinflüsse wirken.

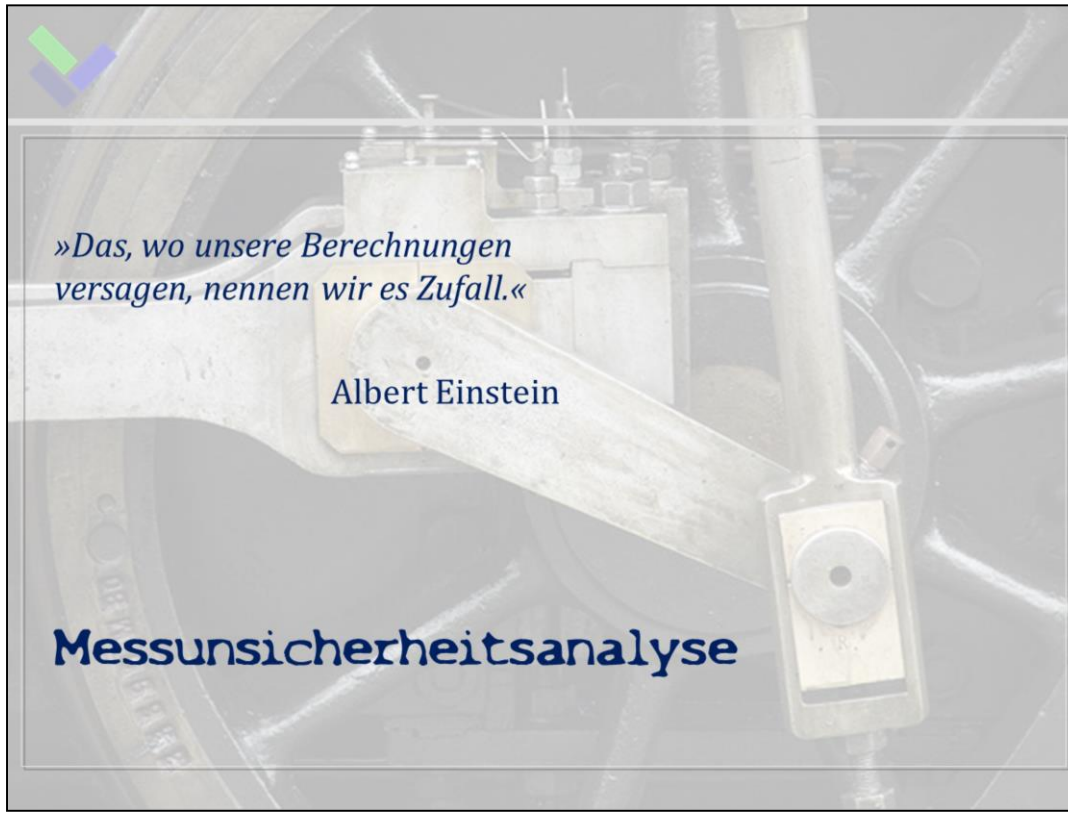
Alle Wurzeln der Rückführung müssen bei verlässlichen Quellen enden.

Ein derartiges Rückführungsdiagramm wird für die Dokumentation und Darstellung der Messgröße gegenüber Dritten empfohlen.

Die Übernahme der jeweiligen Messgrößen von akkreditierten Laboren wird empfohlen. Dann benötigt man in aller Regel keine tiefergehende Betrachtung der Rückführung.

Tabellenwerte und Konstanten sollten verlässlichen Quellen entnommen werden und gegebenenfalls mit einer zweiten, unabhängigen Quelle verglichen werden.

Wichtig ist, dass bereits aus der Prozessgleichung heraus erkennbar ist, dass alle gewollten Einflüsse (auf nationale Normale) rückführbar sind. Sollten hier bereits Defizite erkennbar sein, muss die Prozessgleichung angepasst werden.


»Das, wo unsere Berechnungen
versagen, nennen wir es Zufall.«
Albert Einstein
Messunsicherheitsanalyse

Ziel der Messunsicherheitsanalyse

Alle relevanten Einflüsse, die ein Messergebnis verändern können, sind zu erfassen.

Hierzu wird jeder bekannte Messunsicherheitseinfluss individuell betrachtet und bewertet, um an Ende jeweils eine numerische Größe und eine mögliche Verteilung zuordnen zu können.

Methodik und Werkzeuge

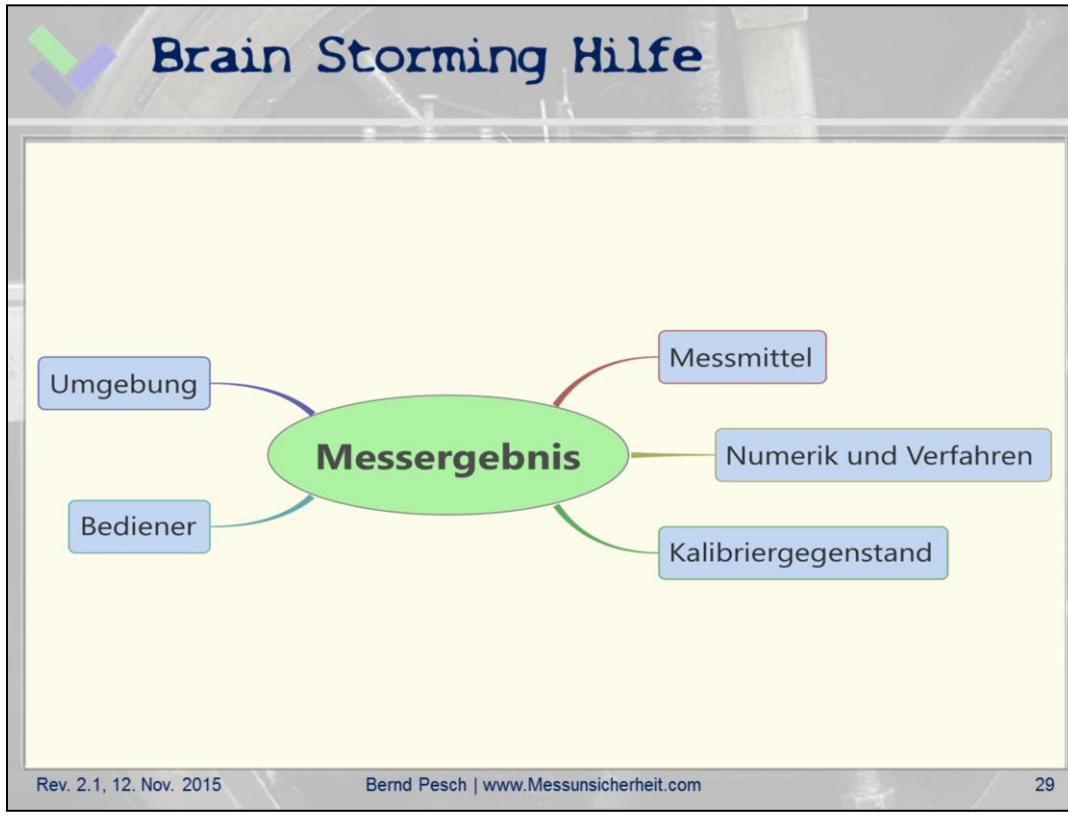
Brain Storming

Ishikawa-Diagramme

Signalweganalyse

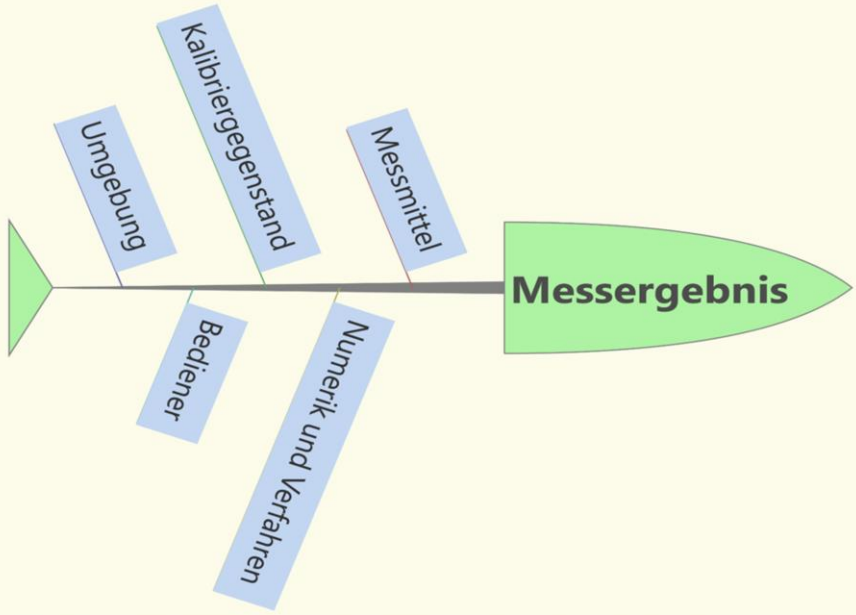
Analyse der Prozessgleichung

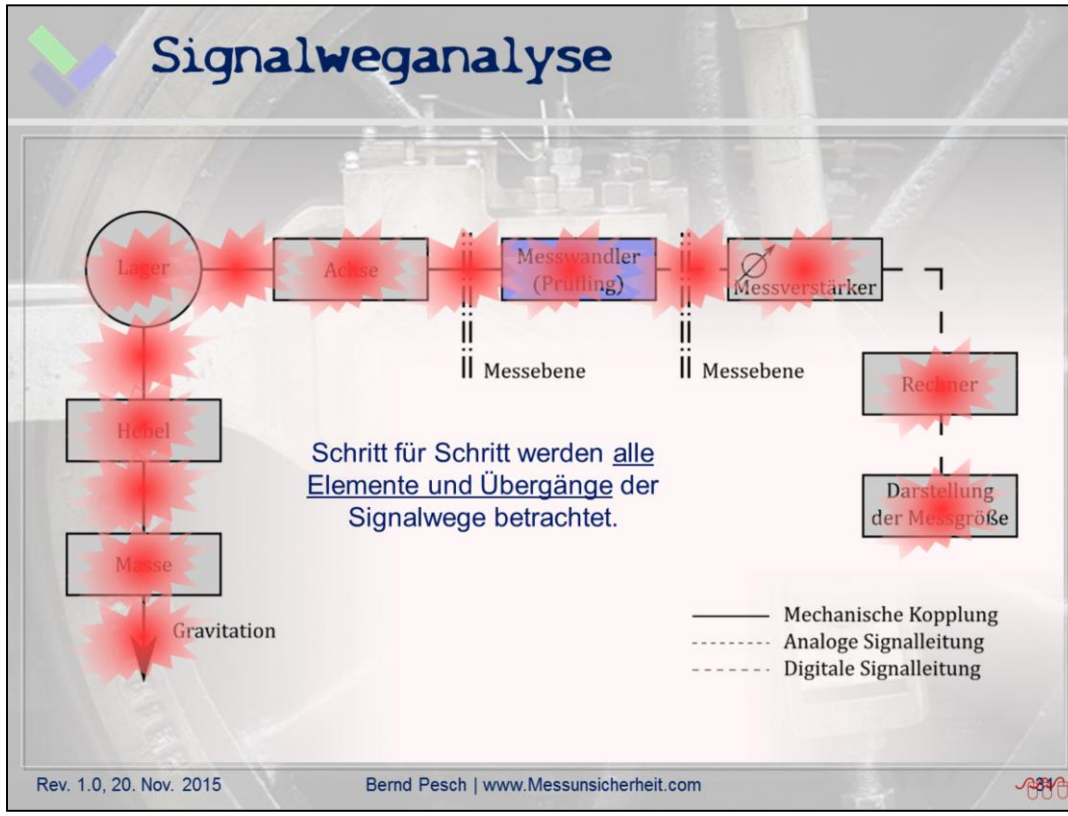
Checklisten



Arbeiten mit der Freeware Xmind (www.xmind.net)-

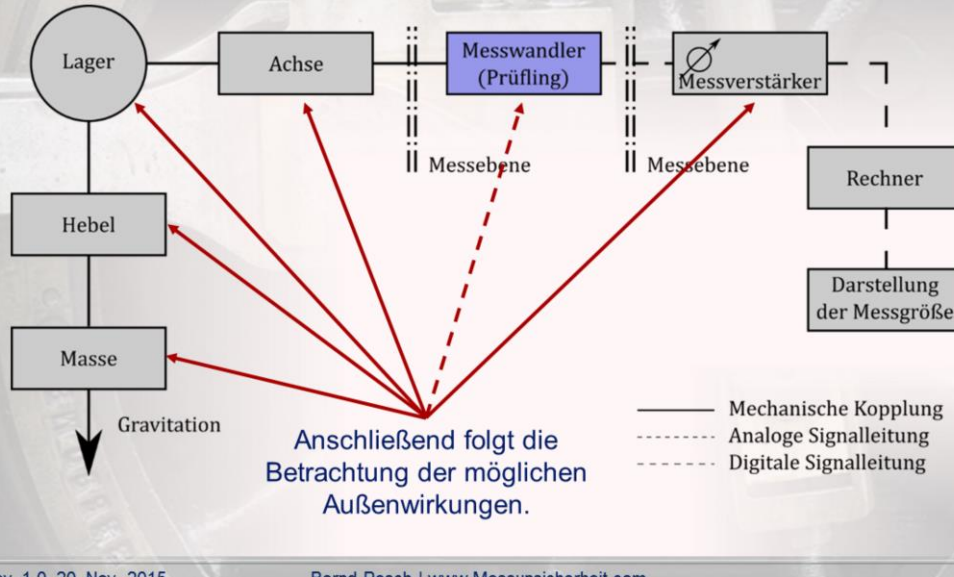
Ishikawa Diagramm



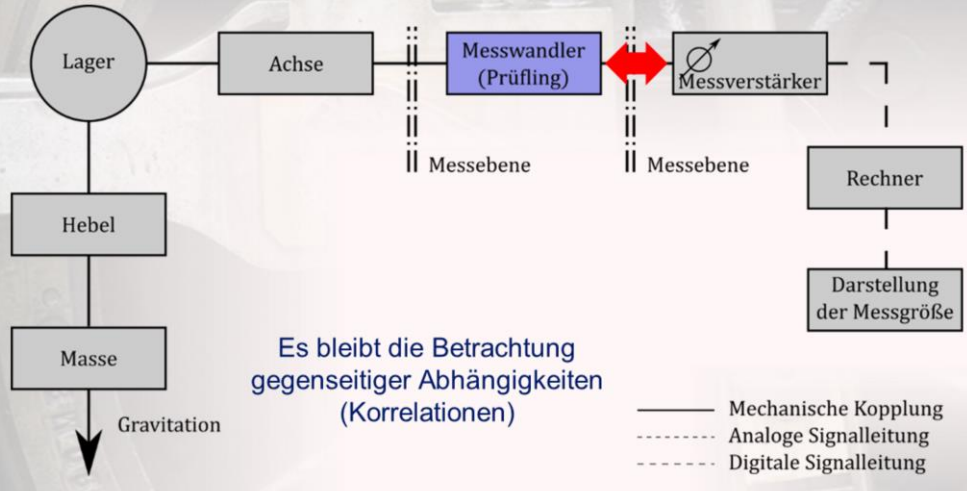


Wichtig ist, das Diagramm nach Erstellung Schritt für Schritt durchzugehen. Auch alle Übergänge sind zu betrachten.

Signalweganalyse



Signalweganalyse



Analyse der Prozessgleichung

Es bedarf etwas mehr Erfahrung mit der Messunsicherheitsanalyse, wenn diese nur auf Basis der Prozessgleichung durchgeführt wird:

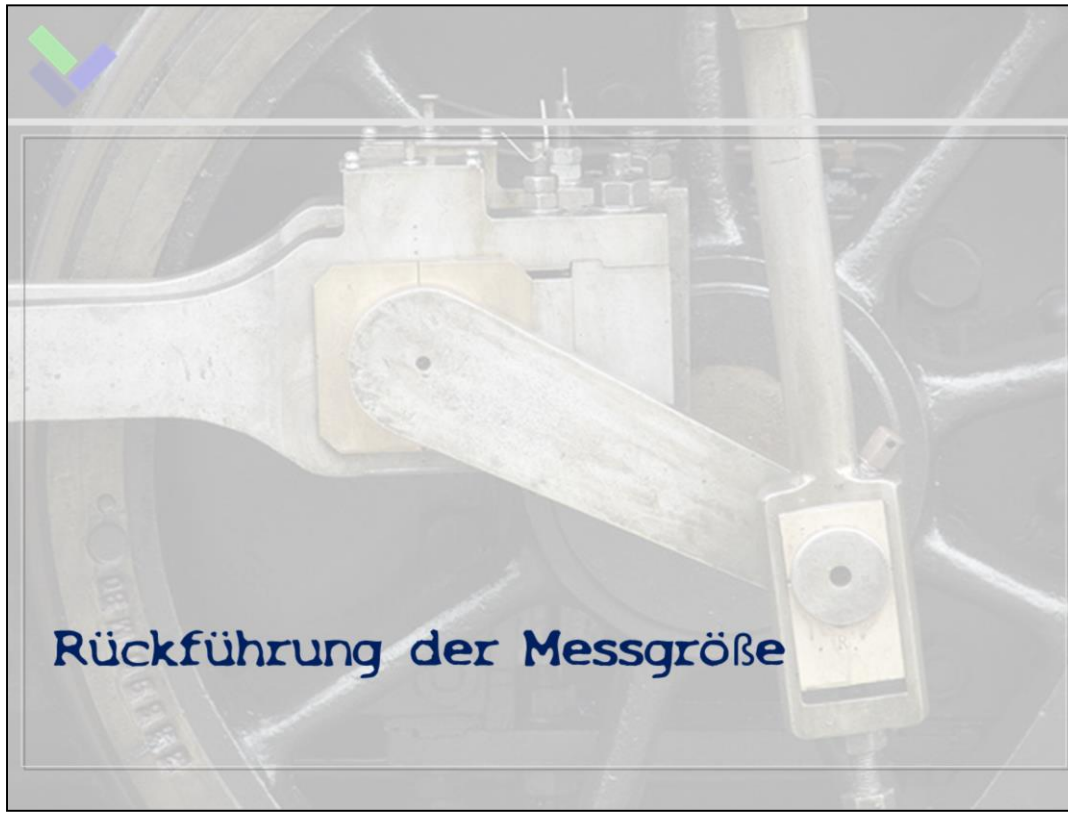
$$\frac{dU}{U_{max}} = \frac{(m + \Delta m) \cdot (g + \Delta g) \cdot (l + \Delta l) \cdot sin(\varphi + \Delta\varphi)}{M_{Nenn}} \quad +???$$

Man würde jedes Formelzeichen individuell ansprechen und fragen, was muss wo zugeordnet werden?

Das Vorgehen bleibt unvollständig, da Korrelationen nur mit Erfahrung zu erkennen sind und weitere Einflüsse „ohne Anker in der Formel“ nicht zu erkennen sind.

Checklisten

- Definition der Messgröße und Messaufgabe ✓
- Analyse der Prozessgleichung ✓
- Bewertung der Rückführung
- Handhabung
- Messverfahren (abgebildet in der Prozessgleichung)
- Prüflingseigenschaften
- Umgebungsbedingungen


Rückführung der Messgröße

Prinzipielle Betrachtung von Messmitteln in der Rückführung

Für die Bewertung der Rückführung der Messgrößen gibt es zwei Ansätze.

Ansatz 1 bezieht sich auf alle gleichartige Messmittel (gleiche P/N und S/N).

Ansatz 2 ist individuell für ein einzelnes Messmittel und daher zu bevorzugen.

Zugesicherte Eigenschaften

- Spezifikation (Klassierung)
- Drift

Kalibrierwerte

- Messabweichung (Fixpunkte) (Ist-Zustand fester Zeitpunkt)
- Messunsicherheit
- Drift
- Interpolation
- (Linearität und Offset)

Stimulus (allgemein)
Die Generierung einer zum messenden Größe ist möglicherweise belegt mit den Eigenschaften...
Stabilität
Einstellbarkeit
Rev. 1.1, 20. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
38

Stimulus (Beispiel)

In unserem Beispiel ist dies die Generierung des Drehmoments und Einleitung in den Prüfling

Gravitation
- Lokale Gravität

Masse
- Stückelung und Klassierung

Hebel
- Länge
- Längenzusatz (Stahlseil)
- Seilführung

Mess“maschine“
- Lagerreibung
- Axialer Versatz
- Winkeltreue
- Nullwert (Balance)
- Verkanten

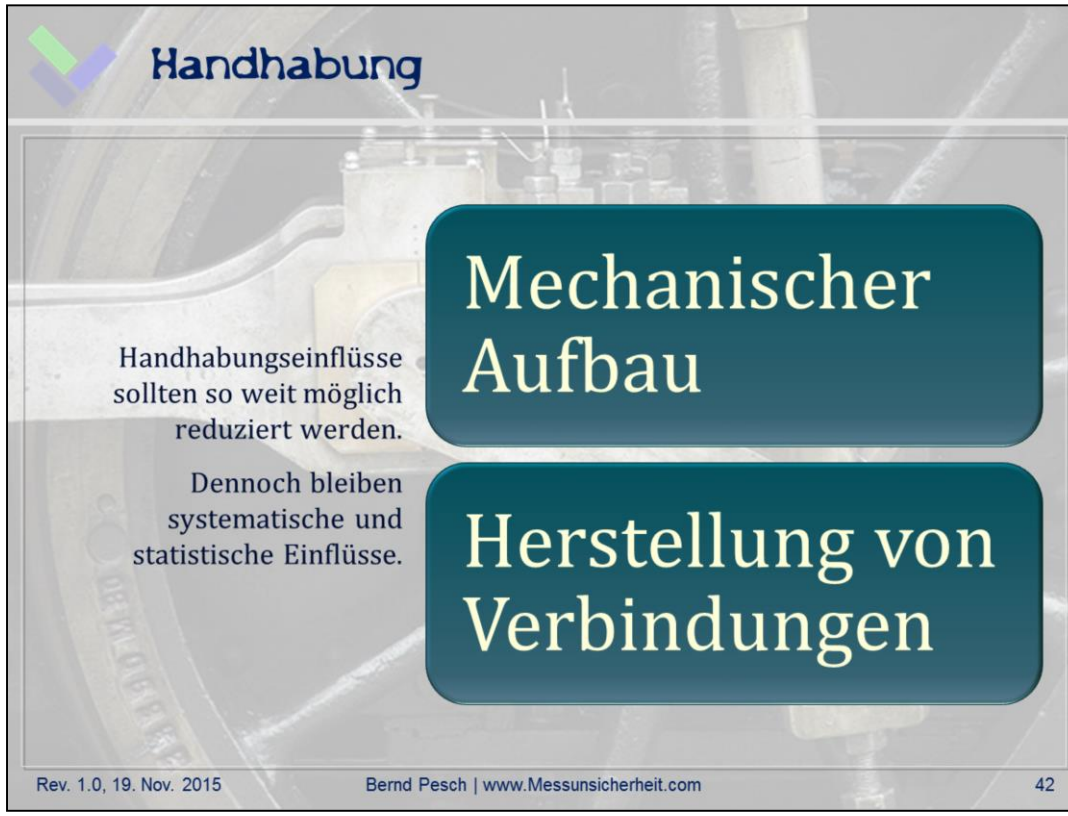
Indikator
Indikator ist in unserem Beispiel die Darstellung des DMA-Signals (und gegebenenfalls die Umrechnung in die Maßeinheit Drehmoment).
Beobachtbare Schwankung
Bei anzeigenden Messmitteln werden üblicherweise folgende Eigenschaften gesondert betrachtet:
Auflösung der Anzeige
Rev. 1.0, 19. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
40

(Hilf-)messmittel

Alle Komponenten im Messaufbau werden auf ihre Beeinflussung der Messgröße untersucht.

Die betrifft nicht nur „klassische“ Messmittel, sondern beispielsweise auch Leitungen und Konnektoren.

- Signaldämpfung
- Signalformung
- Übergangswiderstände
- Kapazitive/induktive Last


Handhabung
Handhabungseinflüsse sollten so weit möglich reduziert werden.
Dennoch bleiben systematische und statistische Einflüsse.
Mechanischer Aufbau
Herstellung von Verbindungen
Rev. 1.0, 19. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
42

Natürlich gehen persönliche Fähigkeiten mit die Messunsicherheit ein.

Beispiel: durch Messunsicherheit darf keine Bewertung der Arbeitsleistung eines Technikers herrühren. Ansonsten würde er unter wirtschaftlichem Druck (Gehalt, Bewertungen, Beförderungen) bestrebt sein, möglichst kleine Messunsicherheiten anzugeben, auch wenn diese nicht gerechtfertigt werden können.

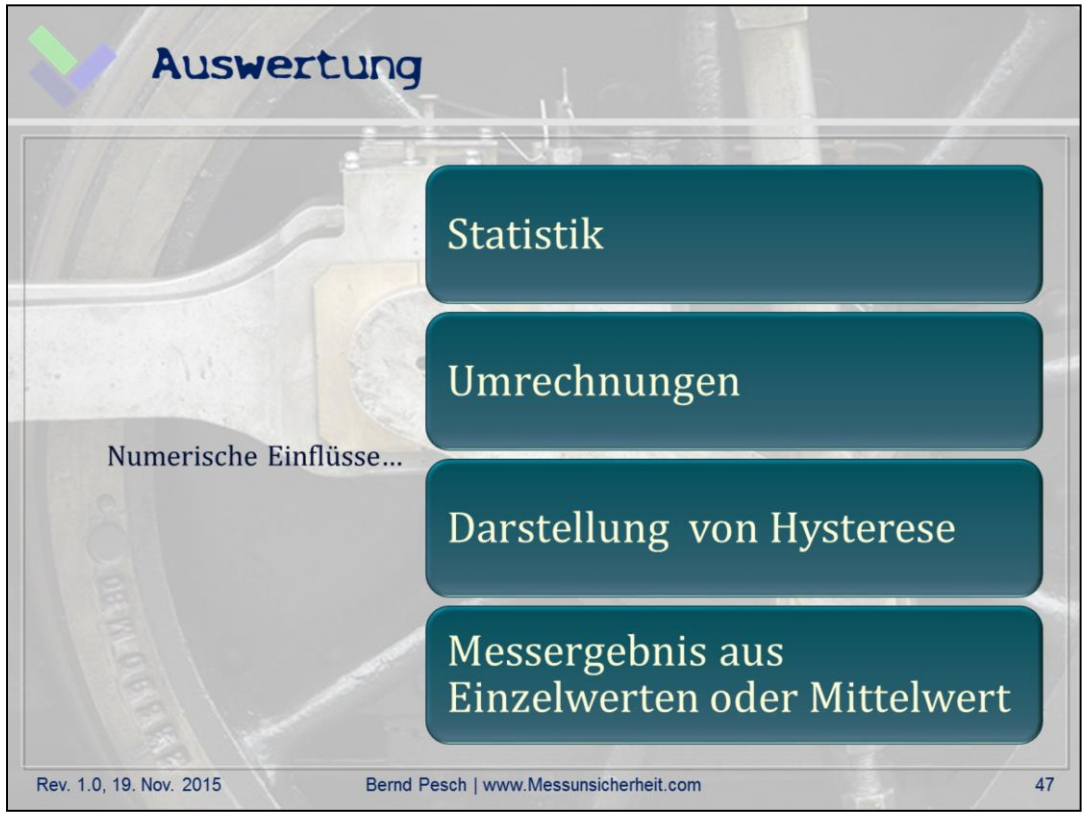
Fehlergrößen sind keine Messunsicherheitseinflüsse!

Fehlerhafte Messungen werden prinzipiell verworfen und nicht weiter betrachtet.

So ist gewährleistet, dass aus (erkannten) Fehlern keine Messunsicherheiten werden.

Im Gegensatz zu den Fehlern sind derartige Einflüsse als Messunsicherheitseinflüsse mit zu betrachten.

Messverfahren
Verfahrensmerkmale, die maßgeblich die Messunsicherheit beeinflussen sind beispielsweise
Vorbereitung (Aktivierung)
Wiederholpräzision
Anzahl der Messungen
Zeitlicher Ablauf der Messung
Rev. 1.0, 19. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
46


Auswertung
Statistik
Umrechnungen
Numerische Einflüsse...
Darstellung von Hysterese
Messergebnis aus Einzelwerten oder Mittelwert
Rev. 1.0, 19. Nov. 2015
Bernd Pesch | www.Messunsicherheit.com
47

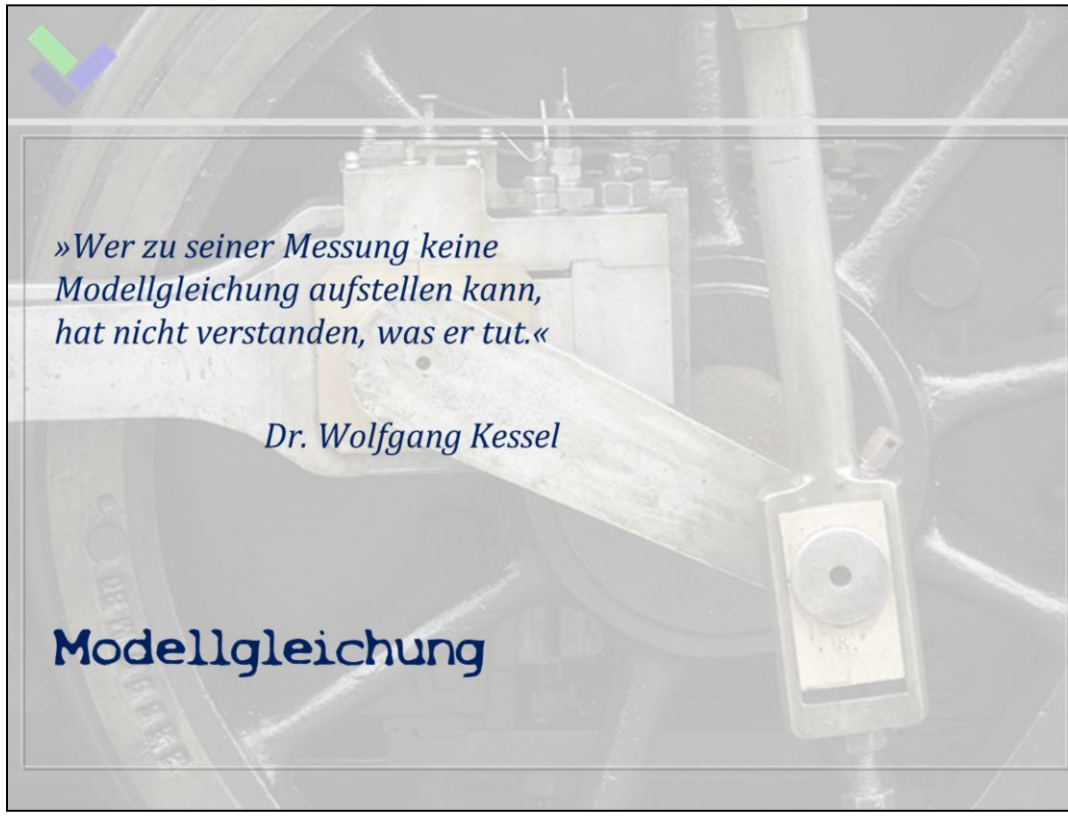
Eigenschaften des Prüflings

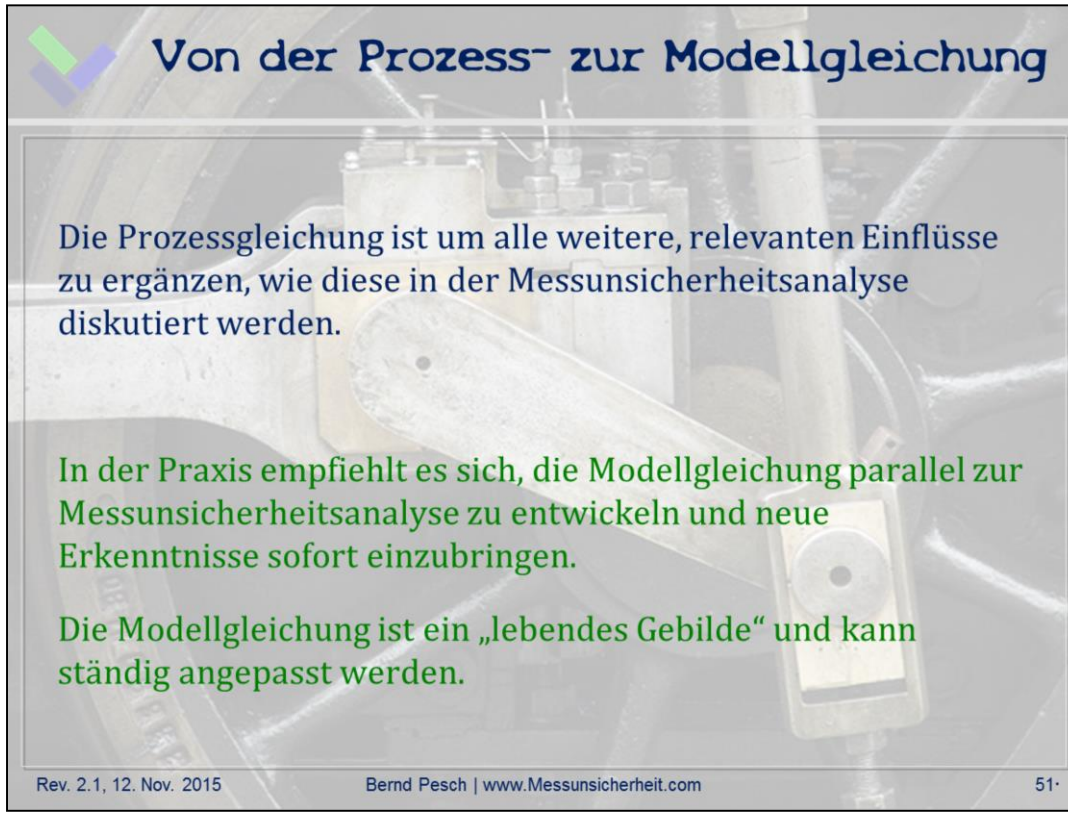
Der Prüfling ist nicht nur Träger der Messgröße, sondern beeinflusst auch die Möglichkeit der Bestimmung seiner Eigenschaften…

DMS: Dehnungsmessstreifen

- Nullpunktdefinition
- Rauschen
- Kabel und Konnektoren
- Verschmutzung
- Vorspannung der DMS

Zu beachten ist, dass zu relevanten Messunsicherheitseinflüssen zu überlegen ist, ob deren Dimension nicht einfach eingenommen werden soll, sondern durch entsprechende Messungen ermittelt werden muss. So ist es in vielen Fällen notwendig, Temperatur und relative Feuchte ebenfalls rückführbar zu messen.


»Wer zu seiner Messung keine
Modellgleichung aufstellen kann,
hat nicht verstanden, was er tut.«
Dr. Wolfgang Kessel
Modellgleichung



Mit den Bedürfnissen der Modellgleichung ist im wesentlichen gemeint, dass die Eingangsgrößen in der notwendigen Form (Beispiel: absolut oder relativ) formuliert werden.

Ein Platzhalter für unbekannte Einflüsse

Nicht numerisch festlegbare (Messunsicherheits-)Einflüsse werden (üblicherweise) mit einem kleinen Delta, δ, gekennzeichnet.

Hinter dem δ-Term steht eine Verteilung, die die Wahrscheinlichkeit des Antreffens einer Eingangsgröße an einem bestimmten Wert als Funktion beschreibt.

Verteilung = Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) oder Probability Density Function (PDF)

Zu 1, 2: Die Linearität und Differenzierbarkeit ist Voraussetzung zur Anwendung der Berechnungsmethoden des klassischen GUMs.

3 ergibt sich aus dem idealen Modell, der Prozessgleichung

4 ist der Grund der Ermittlung der Messunsicherheit

5, 6 ist auf dem ersten Blick eine triviale Forderung. Jedoch gibt es in der Praxis durchaus auch (falsche) Modelle, in denen Unsicherheitseinflüsse derart eingebracht wurden, dass das Modell 5 und/oder 6 nicht mehr erfüllt, wenn der Faktor herausgestrichen wird. Beispiel: m * δm

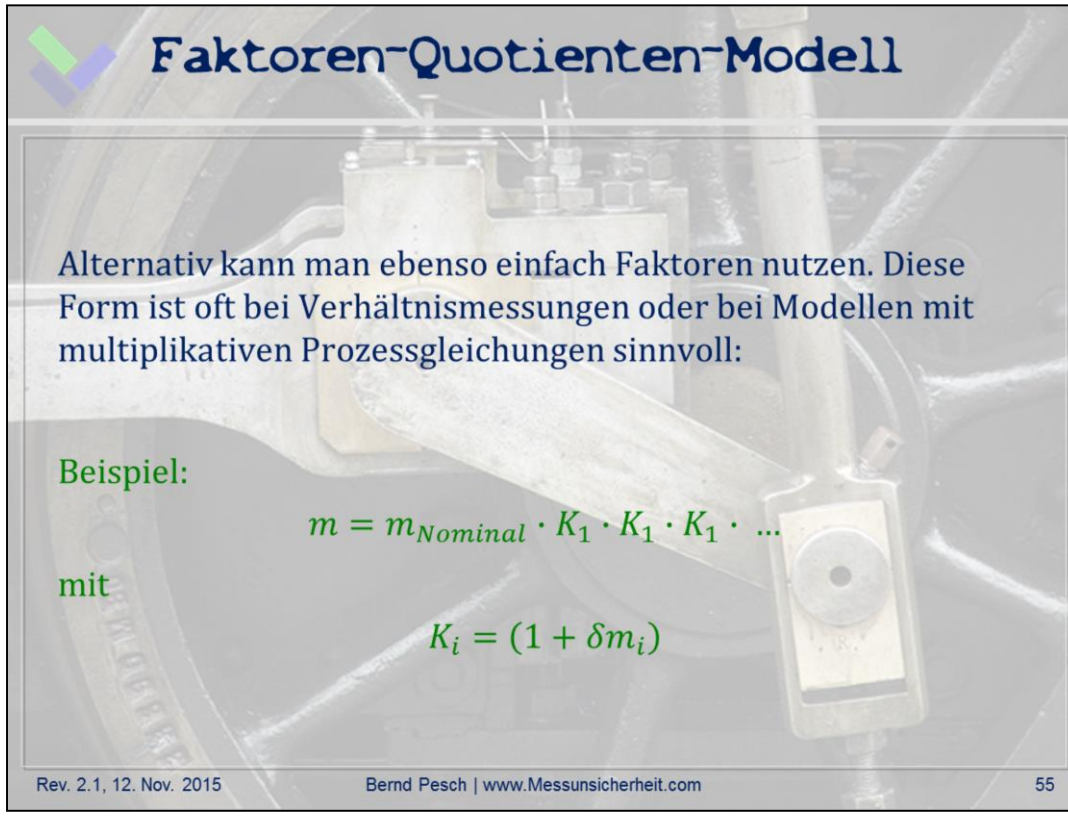
Summanden-Differenzen-Modell

Im einfachsten Modell können alle Eingangsgrößen additiv kombiniert werden. Dieses Modell ist für viele Direktmessungen anwendbar.

Ein derart einfaches Modell ist anzustreben, da es die Forderungen (fast automatisch) erfüllt.

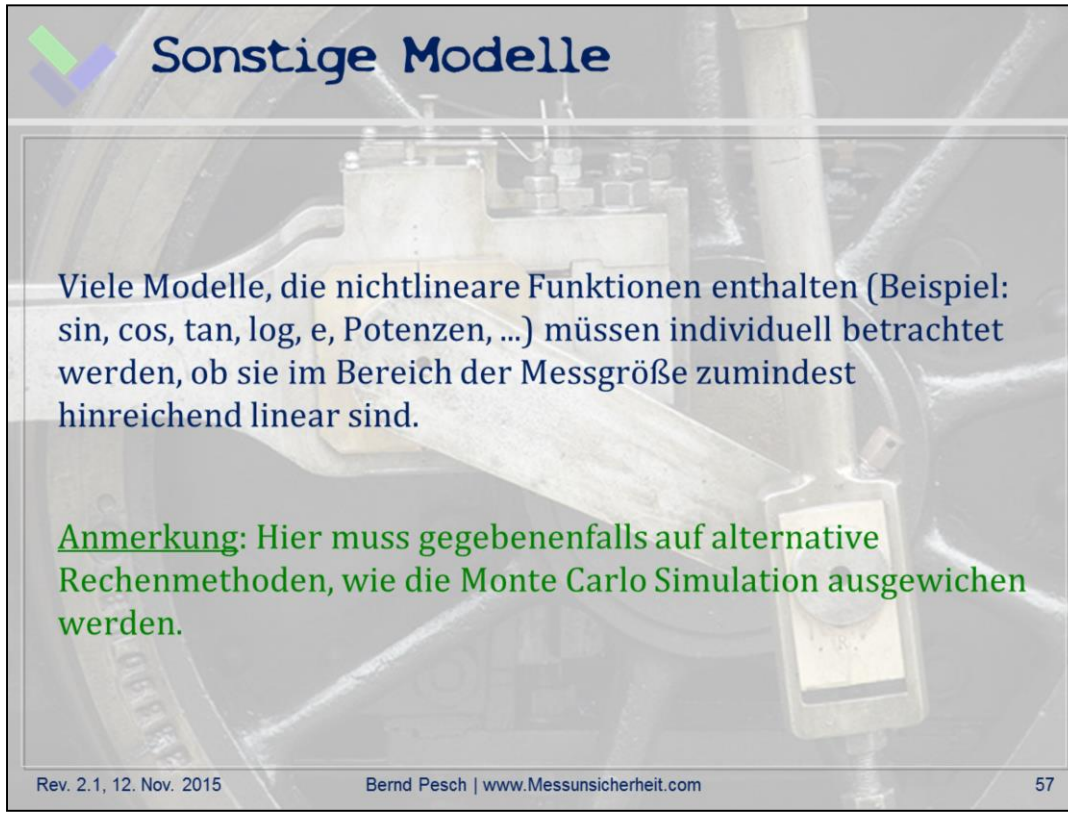
Beispiel:

$$m = m_{Nominal} + \Delta m + \delta m_1 + \delta m_2 + \cdots$$



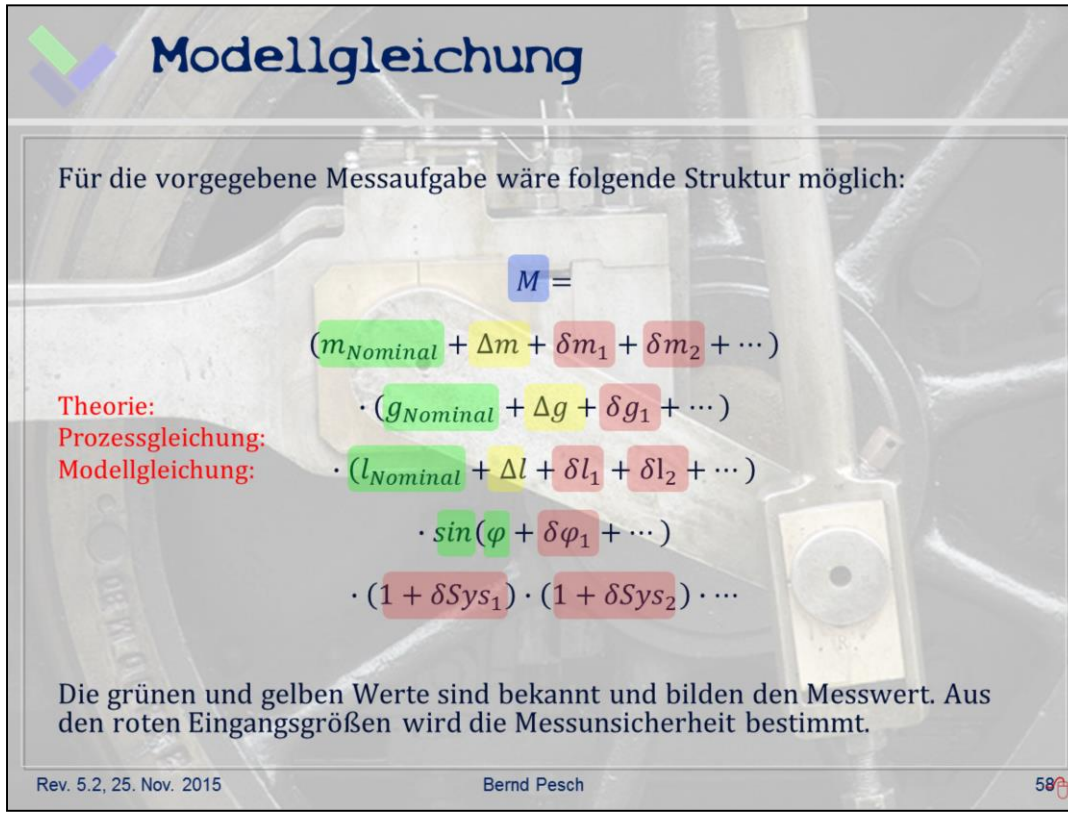
Beide Modelle sind in vielen Fällen ineinander umrechenbar. Beim Faktoren-Quotienten-Modell sollte man allerdings aufmerksam auf die physikalische Korrektheit (Einheiten) achten.

Jedoch sollte man das Mischen verschiedener Formen vermeiden, da bei weiteren Berechnungsschritten Probleme auftreten können.



Allgemeine Empfehlungen zum Begriff „hinreichend linear“ sind nicht einfach zu treffen. Jede Unlinearität ist wiederum eine Abweichung vom Modell, die ihrerseits einen Unsicherheitseinfluss beiträgt. Hier existieren Widersprüche zu den Voraussetzungen des klassischen GUM.

Empfehlung: Man kann das Modell zunächst als linear annehmen und berechnen. Anschließend betrachtet man ein kleines Intervall um den Messwert herum (Vorschlag k=4, wenn später k=2 angegeben werden soll). Für dieses Intervall der vierfachen Standardabweichung des Mittelwertes sollten auf Basis der Modellgleichung Messwerte simuliert werden. Ergibt die Simulation, dass die Messwerte bei x=x0-4*k, x=x0 und x=xo+4k weniger als 5% der (erweiterten) Messunsicherheit auseinander liegen, ist das Modell hinreichend linear für die Anwendung des klassischen GUMs.

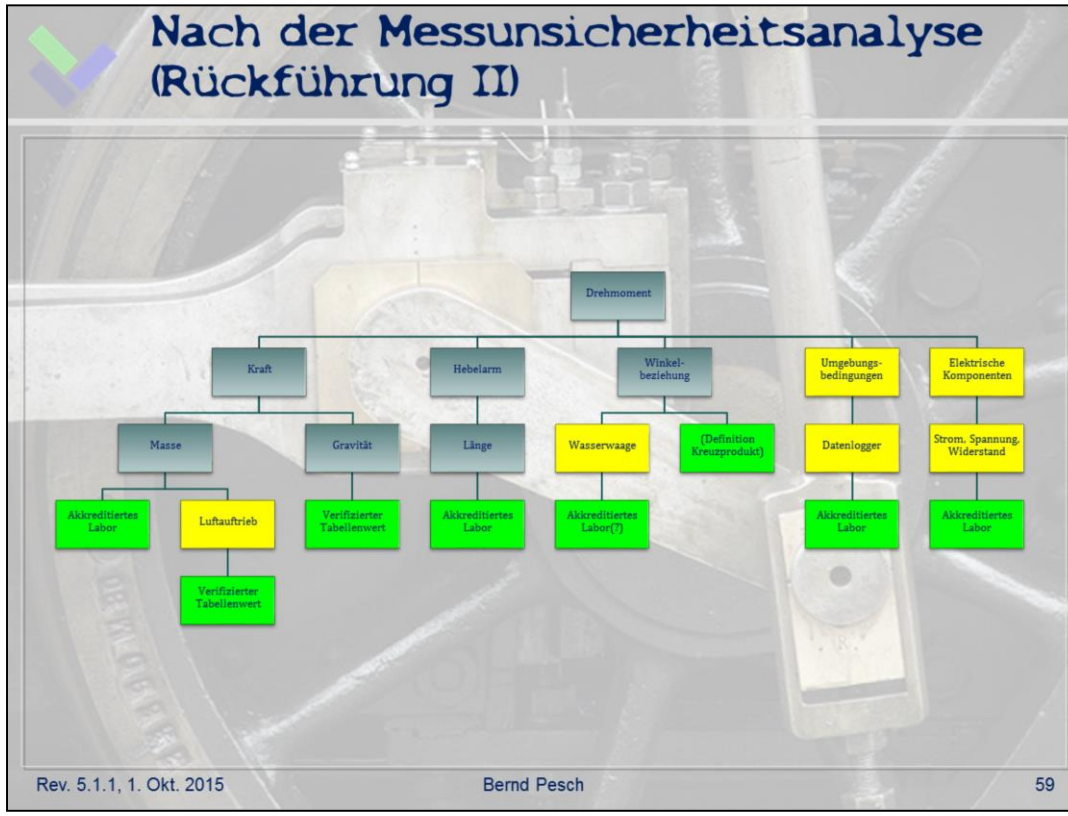


Problematisch ist die Mischung die Summanden und Faktoren. Zwar ist die weitere Berechnung prinzipiell möglich, aber zumindest bei manuellem Umsetzen aufwendig.

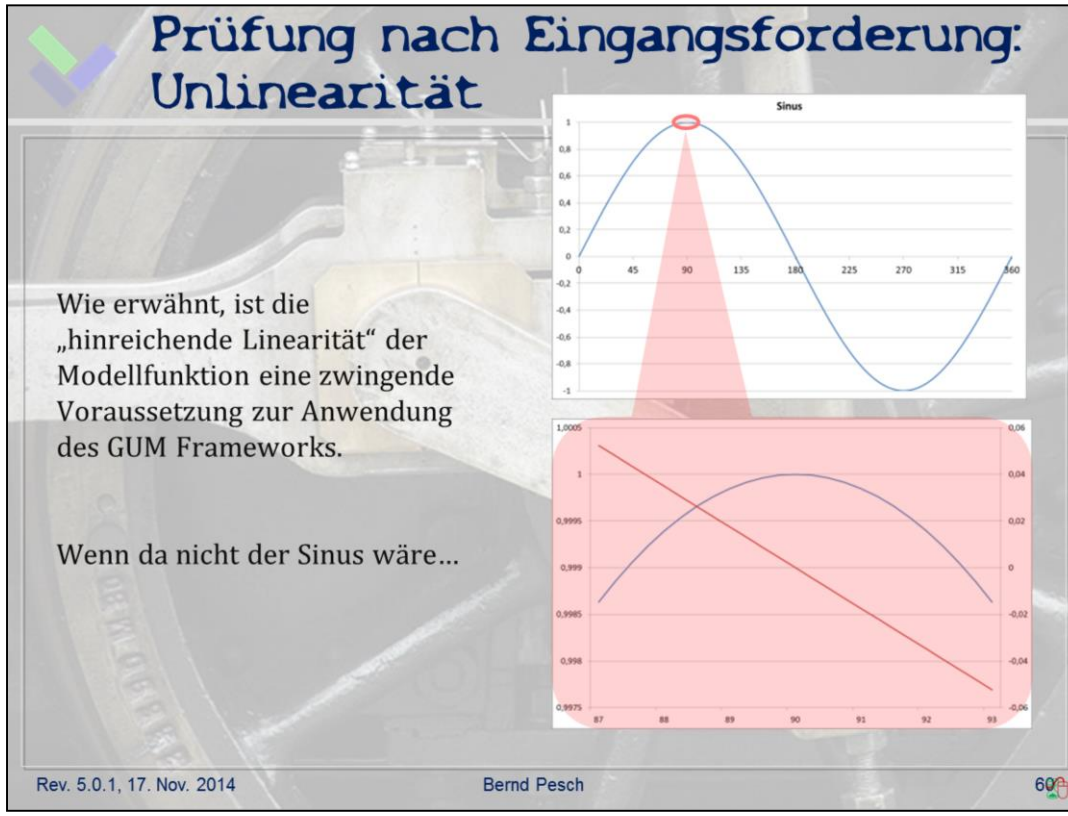
Man sieht immer wieder, dass man derartige Modelle ohne weitere Überlegungen in Berechnungswerkzeuge, wie die GUM-Workbench, eingibt und hierbei einige Forderungen an die Modellgleichung übersieht. Insbesondere beim Mischen von absoluten und relativen Eingangsgrößen können Fehler auftreten, die später nicht mehr gefunden werden! Das Mittel der Wahl ist eine Tabellenkalkulation und Aufstellung segmentierter Bilanzen.

Die Segmentierung in Teilmodelle ist immer dann zulässig, wenn keine Korrelationen über die Modelle hinweg bestehen. Dies kann hier ausgeschlossen werden, wenn zunächst nach den physikalischen Grundgrößen dieser Gleichung getrennt wird.

Auf den Sinus gehen wir später noch ein.



Gelb unterlegt sind neu zu betrachtende Anteile. Hierbei werden nun auch elektrische Komponenten mit aufgeführt. Inwieweit eine Notwendigkeit der Rückführung besteht, ist nicht pauschal zu beantworten und ergibt sich aus der Relevanz der einzelnen Messunsicherheitsbeiträge.



Im Falle der Drehmomentkalibrierung ist der Sinus in aller Regel eine unkritische Funktion. Die zulässige Abweichungen vom rechten Winkel zwischen Hebelarm und Kraft wird gemäß DIN 6789 auf maximal 3 Grad beschränkt.

In diesem Intervall ist eine hinreichende Linearität für die Anwendung nach JCGM 100:20008 gegeben.

Prüfung nach Eingangsforderung: Korrelation

Das Modell sollte auf Korrelationen hin untersucht werden.

Sind diese deutlich vertreten, müssen sie später in der Berechnung berücksichtigt werden.

Temperatur

- Wirkt auf Hebelarmlänge
- Luftauftrieb
- DMS und Trägerkörper

Elektrische Belastung

- Kombination zwischen Messaufnehmer in Messbrücke

Differenzmessverfahren

- Fast immer liegen deutliche Korrelationen vor (Verwendung der gleichen Messanordnung)

Merci beaucoup!

Weitere Informationen und Kontakt über:

www.Messunsicherheit.com