

Unsicherheiten bei der Bestimmung von Unsicherheiten?

Georg Thomann

Amt für Natur und Umwelt,
Graubünden, Schweiz

Abstract

Schallimmissionen werden heute meistens mit Computerprogrammen flächendeckend berechnet oder in bestimmten Fällen punktuell gemessen.

Meist fehlen Angaben zur Unsicherheit der berechneten resp. gemessenen Werte, wobei meist auch grosse Unsicherheit darin besteht, wie nun die Unsicherheit zu bestimmen ist.

Zudem fehlen Anweisungen, wie die Rechts- und Vollzugspraxis mit den Ergebnissen dieser Unsicherheitsbetrachtung umgehen soll.

Mit Hilfe einfacher methodischer Ansätze wird aufgezeigt, dass die Bestimmung der Unsicherheit keine Hexerei oder gar Woodoo-Zauber ist, sondern notwendig ist, um die Qualität der vorliegenden Berechnungen resp. Messungen einschätzen zu können.

Dann wird ein Konzept vorgestellt, wie bei der gesetzlichen Beurteilung von Schallimmissionen die Unsicherheiten berücksichtigt werden könnte.

Fahrplan

- Was soll das eigentlich mit der Unsicherheit und was meint man damit?
- Wie objektiviert / ermittelt man die Unsicherheit?
- Mit welchen Unsicherheiten kämpft die Akustik?
- Die Unsicherheit ist quantifiziert – und dann?

**Sicher ist, dass nichts sicher ist. Selbst das
nicht. (Joachim Ringelnatz)**

**WAS SOLL DAS EIGENTLICH MIT DER
UNSICHERHEIT?**

Was soll das mit der Unsicherheit?

- Ich habe verschiedene Messungen durchgeführt. Wie vergleiche ich diese? Welche ist "besser" resp. "genauer"?
- Ich habe gerechnet. Zur Kontrolle habe ich noch eine Messung gemacht. Die Messung weicht von der Berechnung ab. Was ist "richtig"? Wie gehe ich mit der Abweichung um?
- Es liegen zwei Berechnungen vor. Sie liefern unterschiedliche Resultate. Was "stimmt" nun?
- Meine Berechnungen werden in weitergehenden Untersuchungen verwendet, indem sie mit anderen Messgrößen korreliert werden. Ich weiss, dass meine Berechnungen "Fehler" aufweisen. Wie wirken sich diese aufs Ergebnis der nachfolgenden Analysen aus?

Illustration 1:

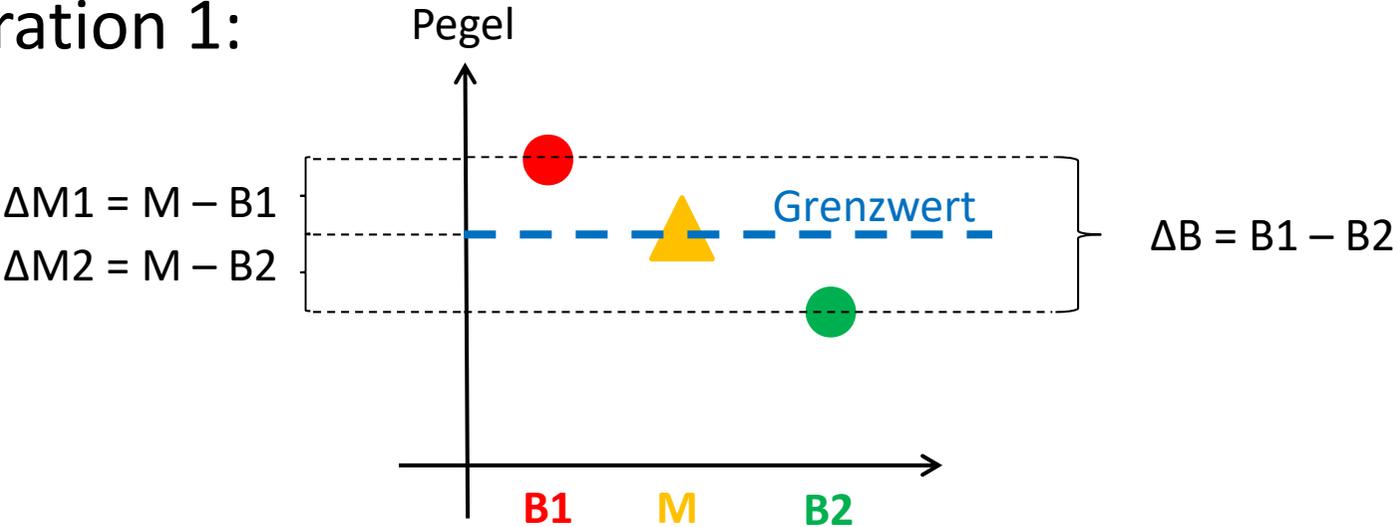
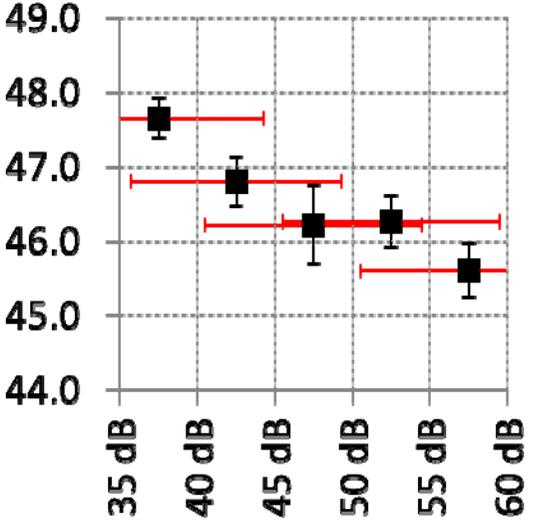
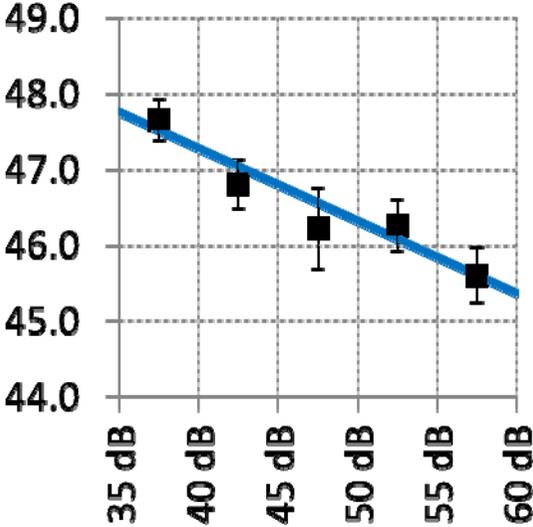
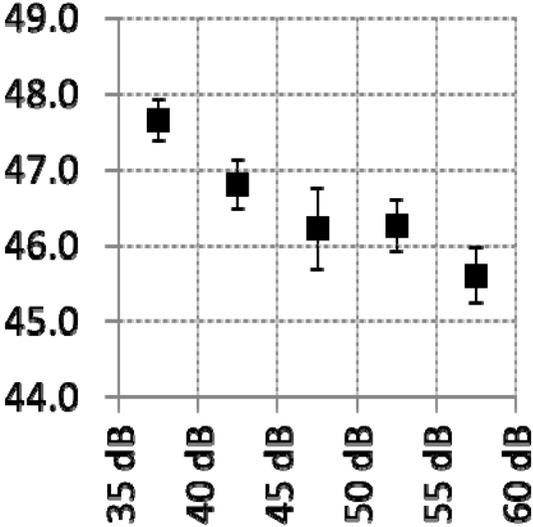


Illustration 2:

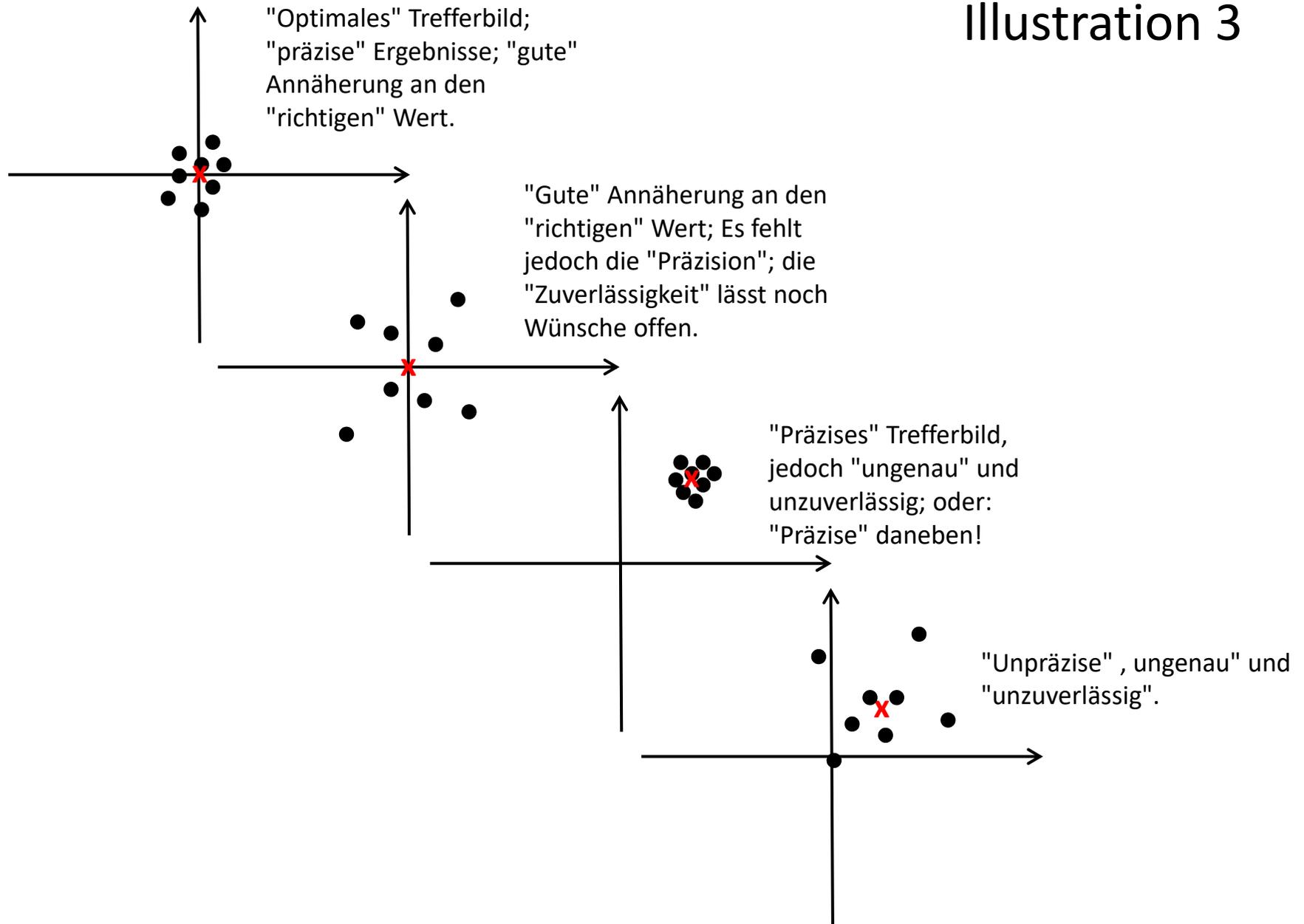


Was meint man mit Unsicherheit?

- "Der Fehler der Berechnung soll so gering wie möglich sein!"
- "Die Berechnung muss genauer werden!"
- "Die Messung ist viel zu ungenau!"
- "Die Präzision der Messung wird massiv erhöht!"
- "Die Genauigkeit der Berechnung kann gerade noch akzeptiert werden!"
- "Das Augenmerk wird auf die Optimierung der Messung gelegt!"
- "Die Berechnungen sind so unzuverlässig wie die Messungen!"
- "Der Mittelungspegel wird mit hoher Zuverlässigkeit berechnet!"

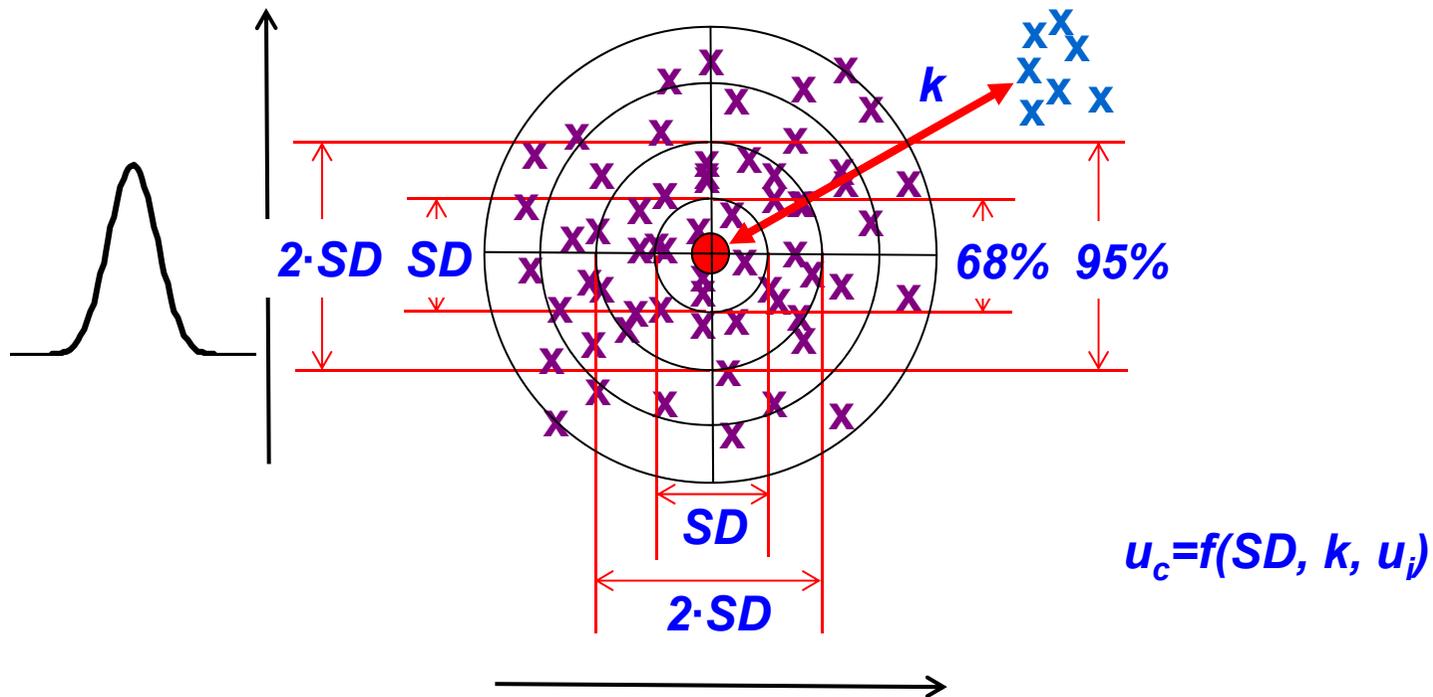
Die Krux der Sprache!

Illustration 3



**Wie können verschiedene
Messungen und
Berechnungen vergleichbar
gemacht werden?**

Unsicherheit: Ein dem Ergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden können **[GUM]**



Standardunsicherheit Typ A und Typ B:

- **Typ A:** Aus statistischen Analysen; wird der Standardabweichung (SD) gleich gesetzt; reduziert sich für den Mittelwert mit der zunehmenden Anzahl von Beobachtungen (N). $SE = \frac{SD}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{VAR}}{\sqrt{N}}$ **Standard Error**
- **Typ B:** Aus Beiträgen aller einschlägigen Informationen über die Variabilität der Messgröße; systematische Effekte; lässt sich nicht reduzieren mit zunehmender Anzahl von Beobachtungen.

Kombinierte Standardunsicherheit:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial f_i} \cdot u_i \right)^2 + 2 \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{l>k}^n \frac{\partial F}{\partial f_k} \cdot \frac{\partial F}{\partial f_l} \cdot u_{kl}$$

Kovarianzen

Gauss'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$u_c^2 = \sum_i c_i^2 \cdot u_i^2$$

"Fehlervarianzen" mit: $c_i = \frac{\partial F}{\partial f_i}$ **Sensitivitäts-Koeffizient**

Erweiterte, kombinierte Standardunsicherheit:

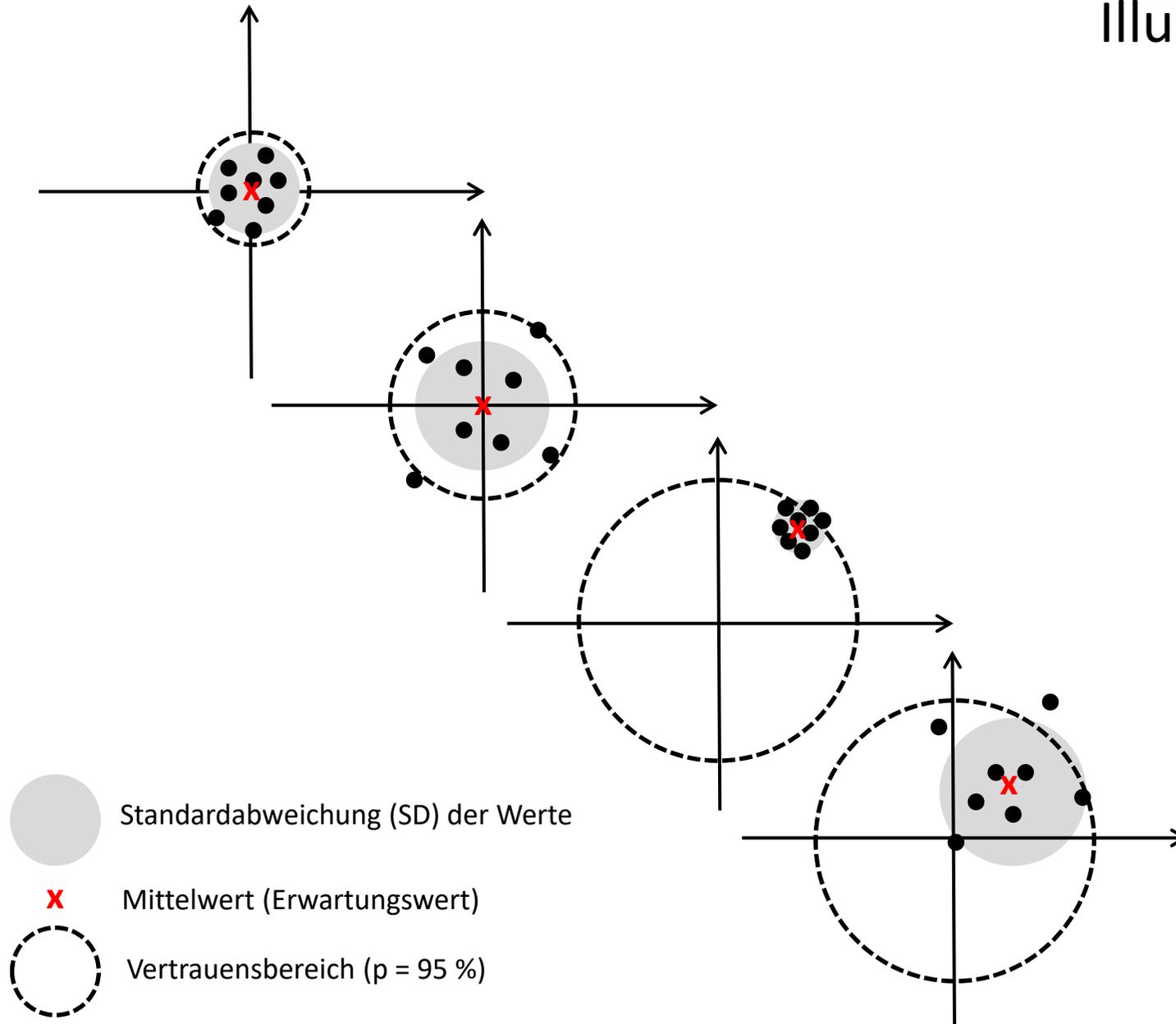
$$U_p = k_p \cdot u_c$$

Erweiterungs-faktor

Vertrauens-, Signifikanz- oder Konfidenzniveau

p =	68%	80%	90%	95%	99%	99.7%
k =	1.00	1.28	1.65	1.96	2.58	3.00

Illustration 3

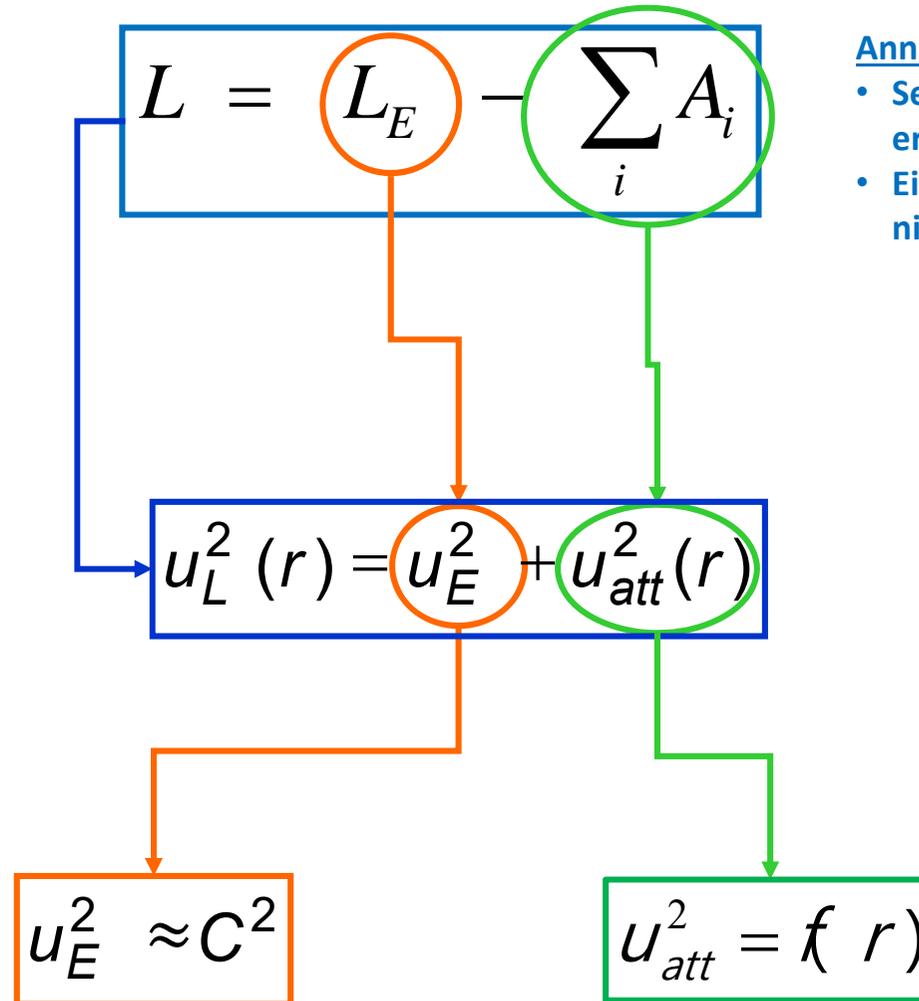


Merkmale

- Der arithmetisch Mittelwert ist die beste Schätzung für den wahren, jedoch unbekanntem Wert.
- Die Schwankung statistisch unabhängiger Werte um ihren Mittelwert wird durch die Varianz (VAR) beschrieben; sie entspricht der mittleren quadratischen Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert.
- Die Wurzel aus der Varianz heißt Standardabweichung (SD); sie ist ein Maß für die Streuung der Einzelmessungen.

Merkmale

- Die Standardabweichung beschreibt nur die Schwankungsbreite von Einzelmessungen um den Mittelwert. Damit ist noch nichts über die Unsicherheit des Mittelwerts gesagt.
- **Mit der Angabe einer Standardabweichung ist das Problem der Unsicherheitsabschätzung noch nicht erledigt.**
- **Ein Resultat ohne Unsicherheitsabschätzung ist unbrauchbar und daher a priori falsch!**
[Robert Hofmann]

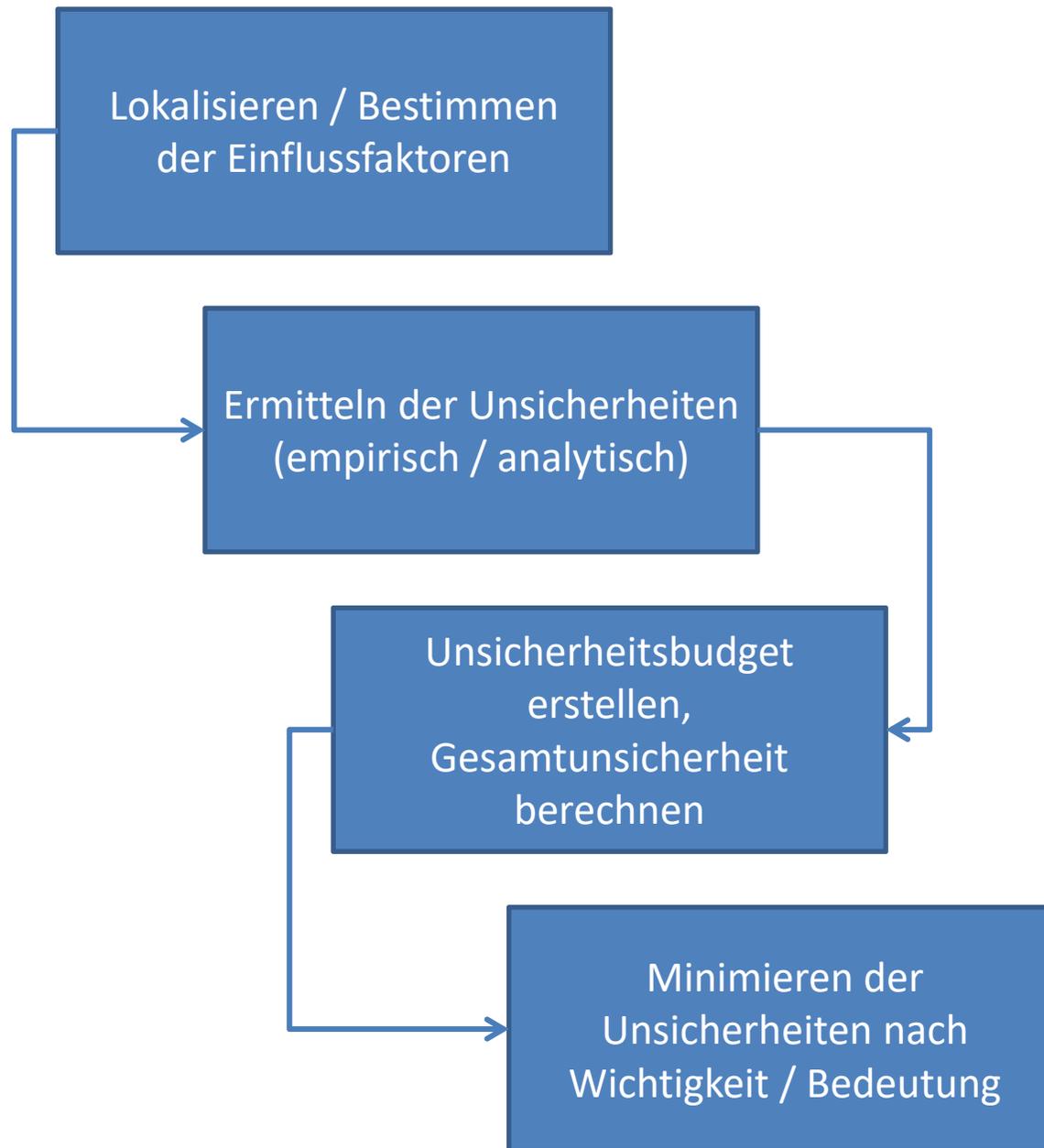


Annahmen:

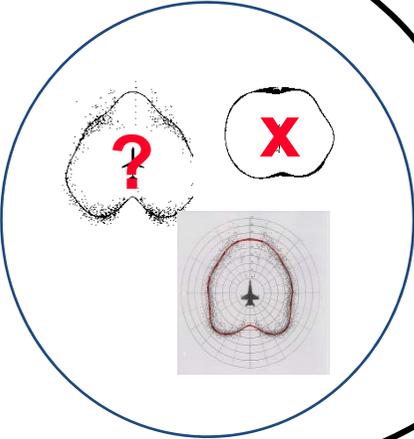
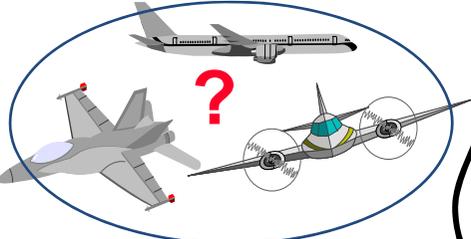
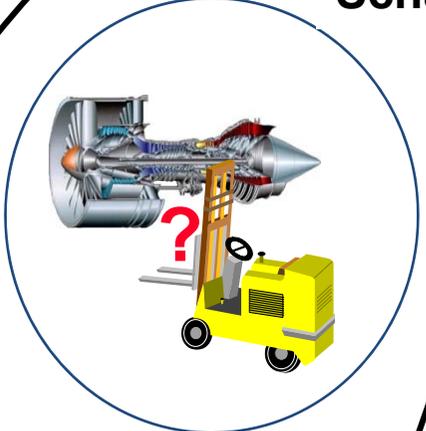
- Sensitivitätskoeffizienten in erster Näherung gleich 1
- Einflussfaktoren korrelieren nicht

Typ B:
konstant

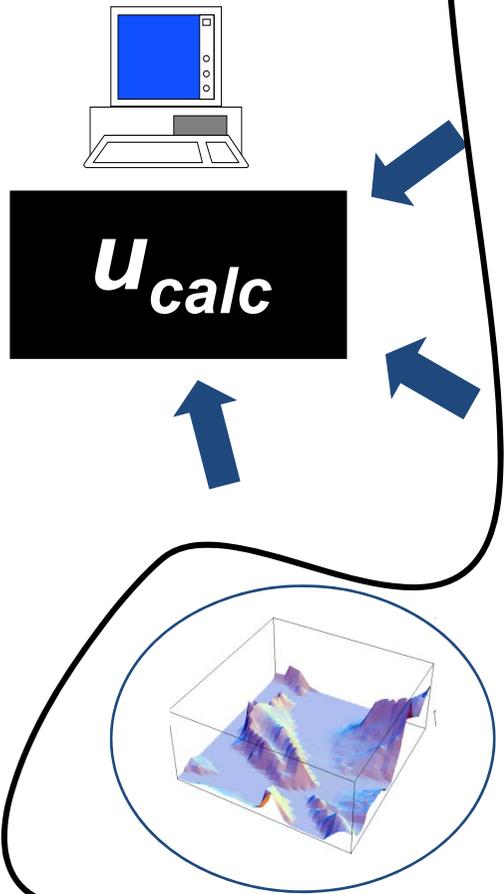
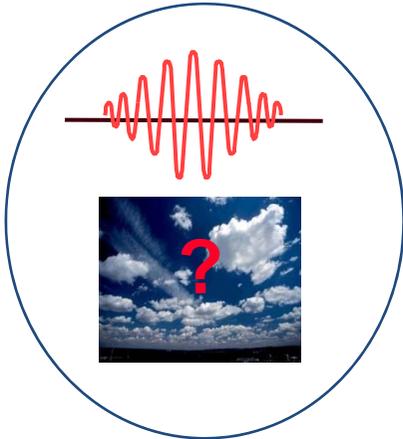
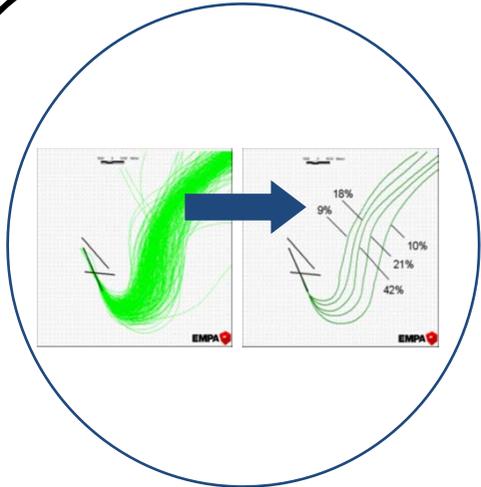
Typ A:
Wird kleiner mit N

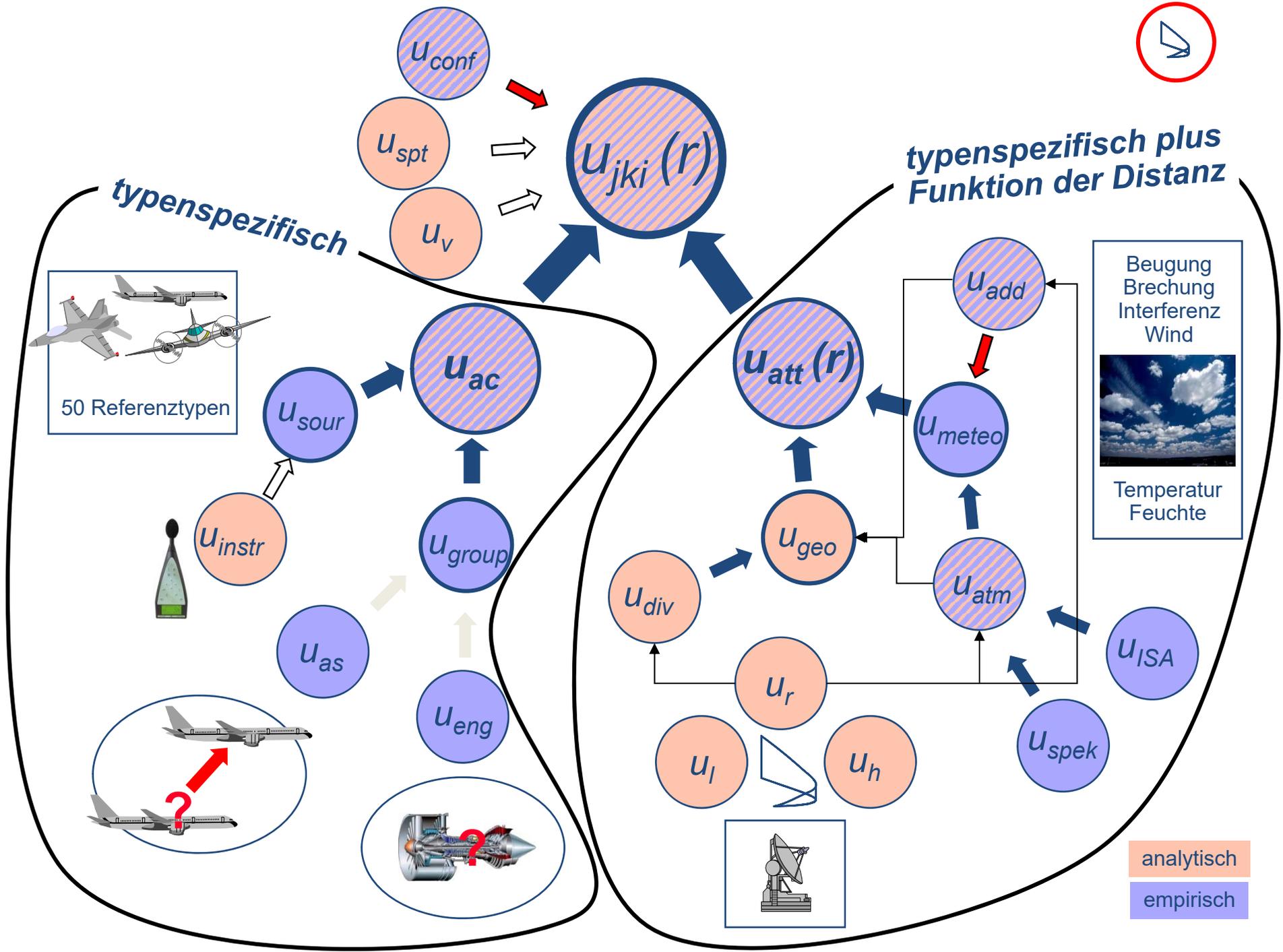
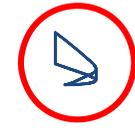


Flugzeug als Schallquelle

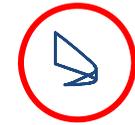


Ausbreitungsvorgänge



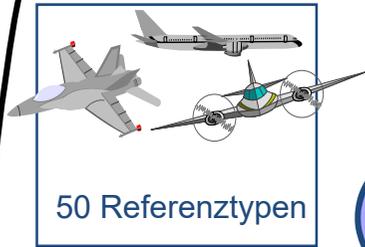


Einzelereignispegel

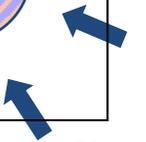
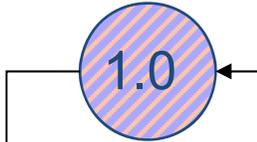
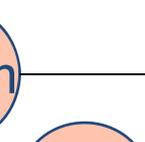
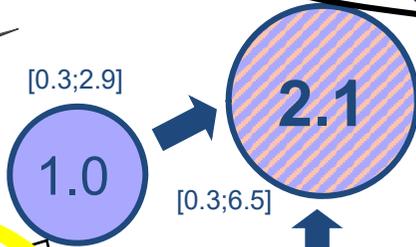
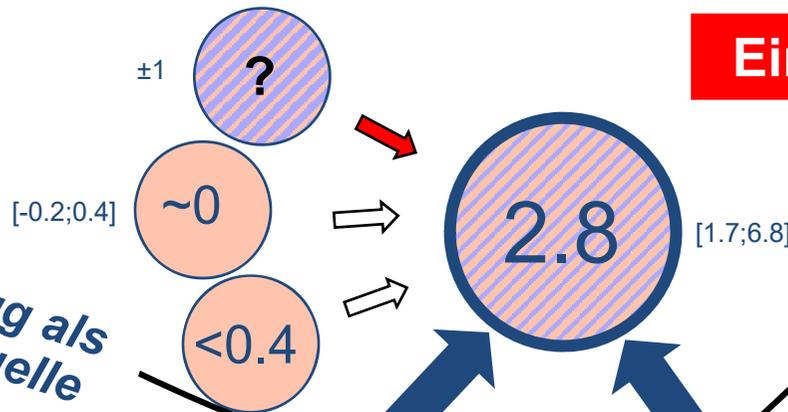
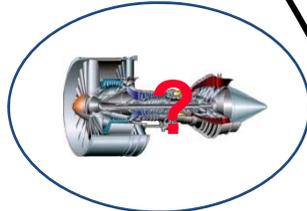
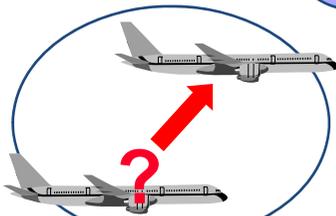


Ausbreitungsvorgänge

Flugzeug als Schallquelle



50 Referenztypen



Beugung
Brechung
Interferenz
Wind

Temperatur
Feuchte



analytisch
empirisch

Mittlerer Einzelereignispegel

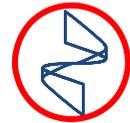


$$\bar{L}_{AE\ jk} = \frac{1}{m_{jk}} \sum_{i=1}^{m_{jk}} 10^{0.1 \cdot L_{AE\ ijk}}$$

$$\frac{\partial \bar{L}_{AE\ jk}}{\partial L_{AE\ ijk}}$$

$$u_{jk}^2 = \frac{\sum_i \left(u_{L_{AE,ijk}} \cdot 10^{0.1 \cdot L_{AE,ijk}} \right)^2}{\left(\sum_i 10^{0.1 \cdot L_{AE,ijk}} \right)^2}$$

$j :=$ Flugzeugtyp; $k :=$ Route



$$Leq_T = 10 \cdot \lg \left(\sum_k \sum_j N_{jk} \cdot 10^{0.1 \cdot \bar{L}_{AEjk}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{t_0}{T} \right)$$

$$u_{Leq}^2 = u_{calc}^2 = \frac{\sum_k \sum_j \left(u_{jk} \cdot N_{jk} \cdot 10^{0.1 \cdot \bar{L}_{AEjk}} \right)^2}{\left(\sum_k \sum_j N_{jk} \cdot 10^{0.1 \cdot \bar{L}_{AEjk}} \right)^2}$$

$$\frac{\partial Leq}{\partial \bar{L}_{AEjk}}$$

$j :=$ Flugzeugtyp; $k :=$ Route

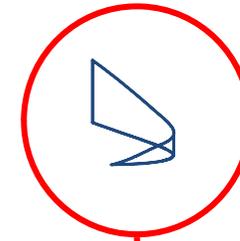
**Unsicherheit eines
Einzelflugs**

Fehlerfortpflanzung

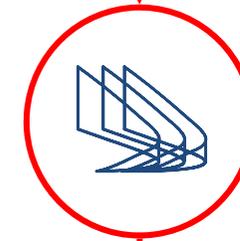
**Unsicherheit mehrere
Flüge desselben Typs auf
derselben Route**

Fehlerfortpflanzung

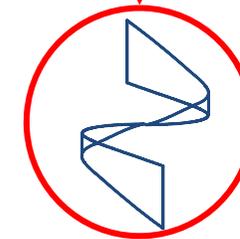
**Unsicherheit aller Flüge
auf allen Routen**



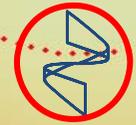
$$\frac{\partial \bar{L}_{AE\ jk}}{\partial L_{AE\ jk}}$$



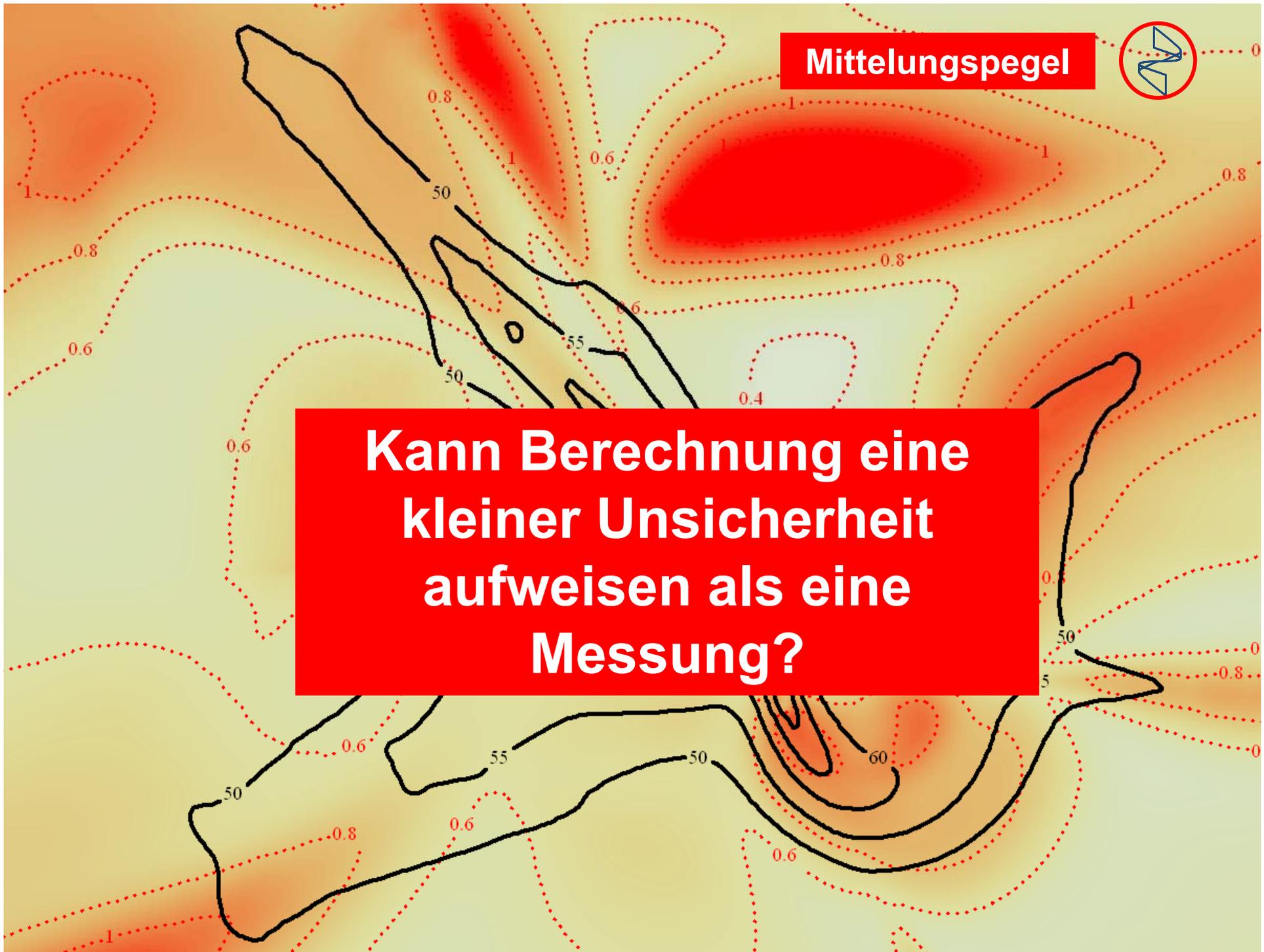
$$\frac{\partial L_{eq}}{\partial \bar{L}_{AE\ jk}}$$

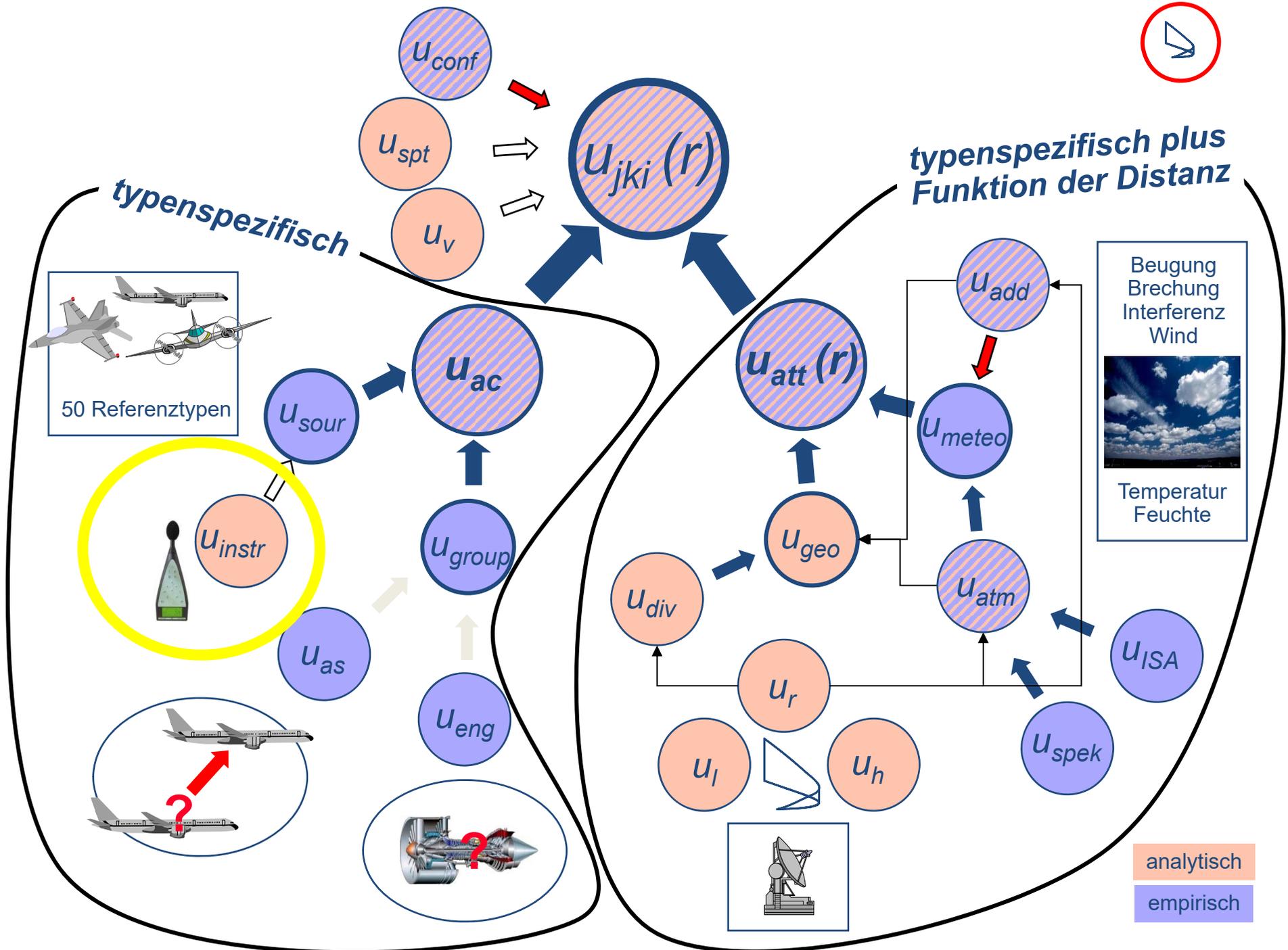
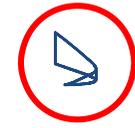


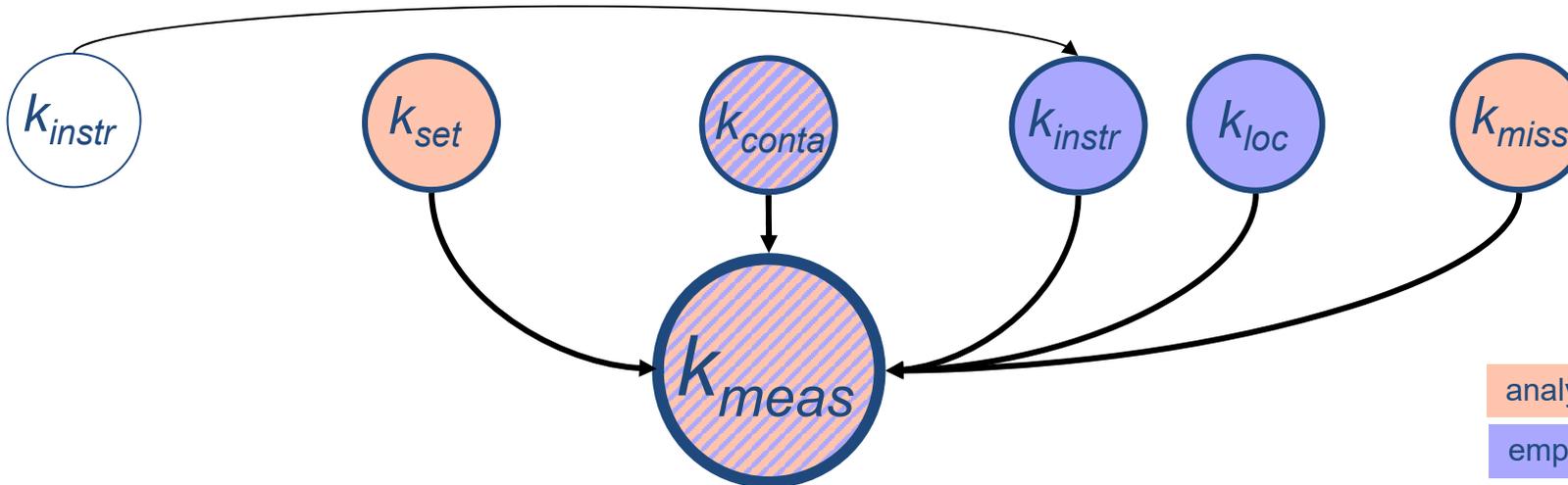
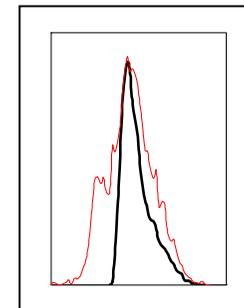
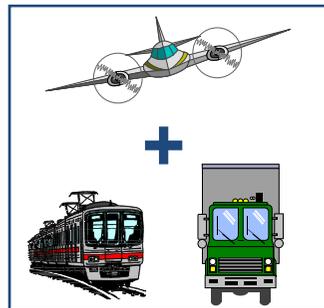
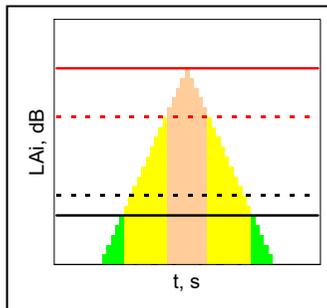
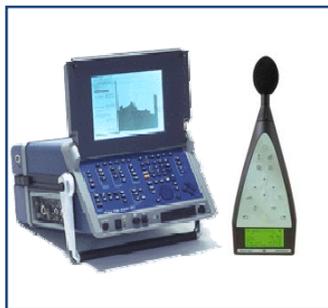
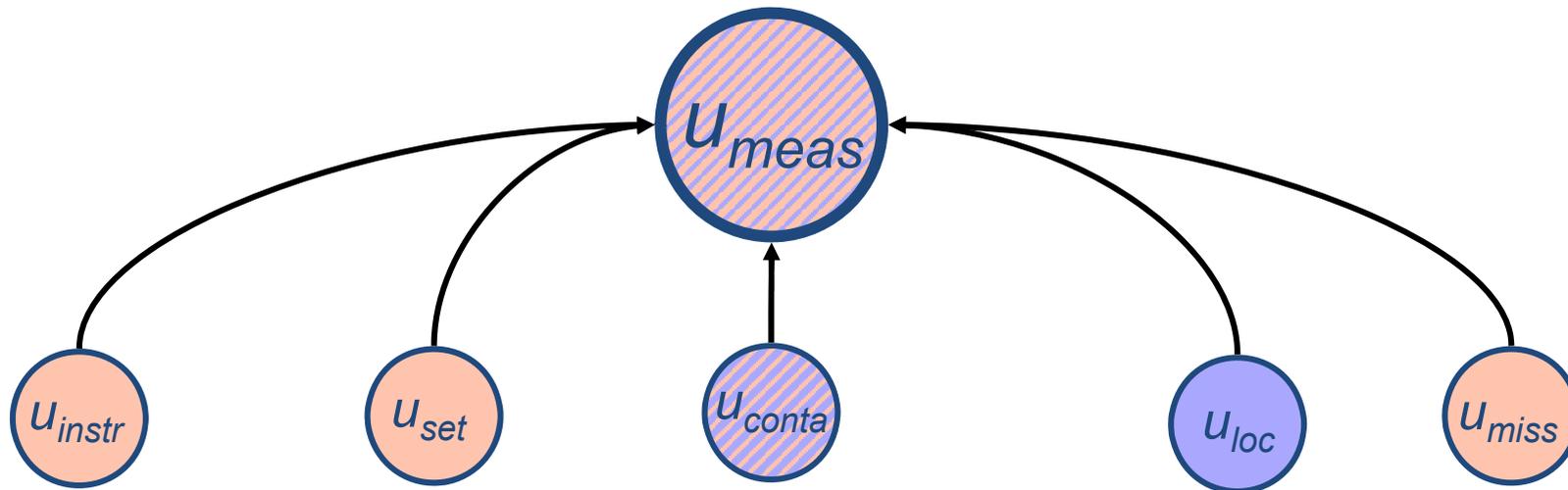
Mittelungspegel



**Kann Berechnung eine
kleiner Unsicherheit
aufweisen als eine
Messung?**

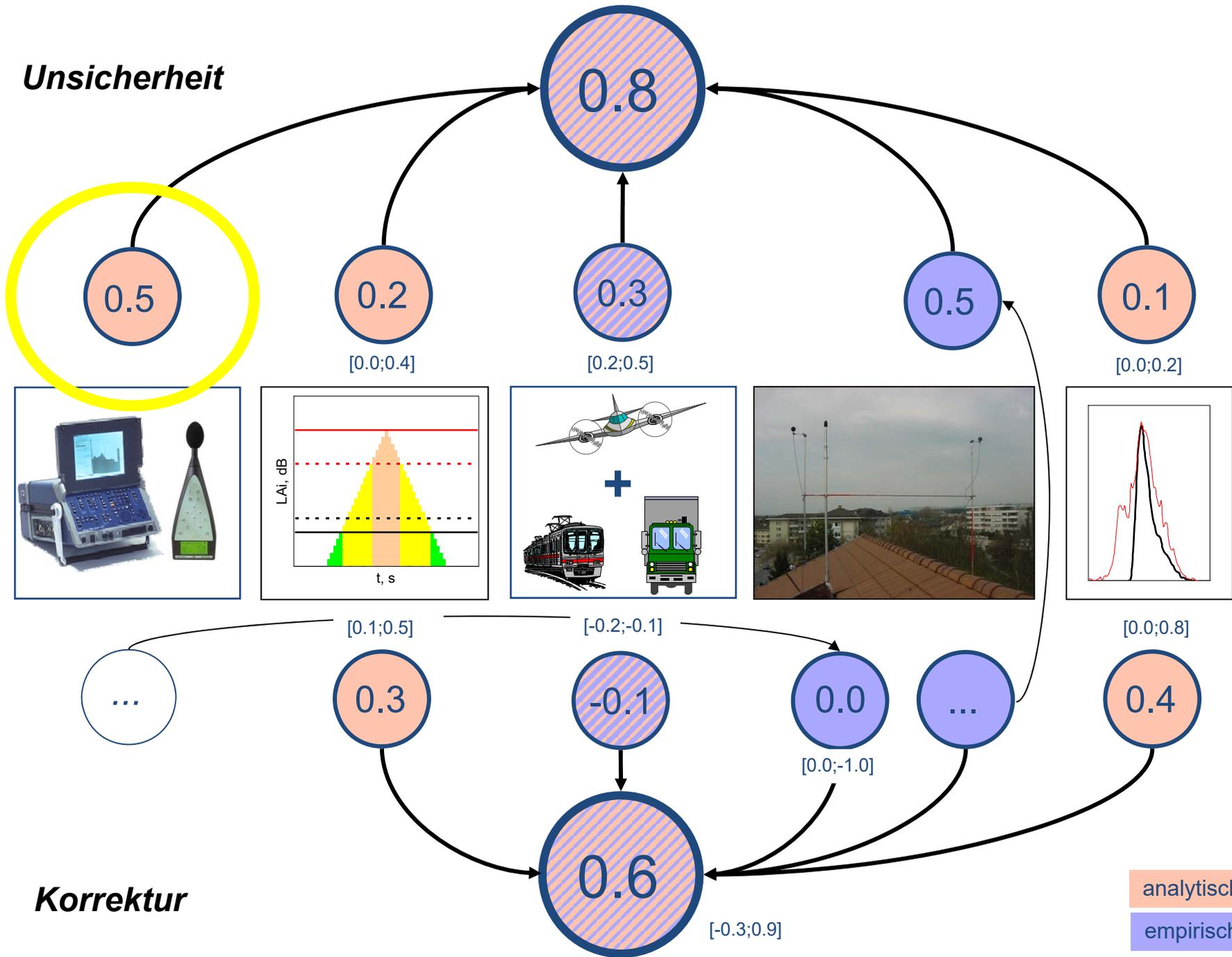






analytisch
empirisch

Unsicherheit



Korrektur

analytisch
empirisch

Unsicherheitsbudget

Einflussfaktoren		Fluglärm	Strassenlärm	Eisenbahnlärm
Emission	Schalleistung / Emission	42%	22%	22%
	Richtwirkung	11%	6%	5%
	Geschwindigkeit	7%	3%	9%
	Verkehrsmenge	2%	6%	0%
	E Verkehrszusammensetzung	66%	46%	48%
	Fahrbahnzustand	0%	4%	4%
	Reifeneigenschaften / Radeigenschaften	0%	6%	5%
	Beschleunigungsverhalten	0%	0%	0%
	Andere Effekte	0%	0%	1%
Transmission	Geometrische Dämpfung / Position der Quelle	7%	1%	1%
	Bodendämpfung	11%	9%	9%
	Bewuchsdämpfung	0%	6%	5%
	Luftabsorption	7%	4%	3%
	T Temperatur	34%	48%	47%
	Wetter	0%	9%	9%
	Abschirmung durch Bebauung	0%	6%	5%
	Abschirmung durch LSW	0%	6%	5%
	Reflexionen	3%	4%	4%
I Lagegenauigkeit des Empfangspunkts	0%	6%	5%	

Dummywerte

E = Emission

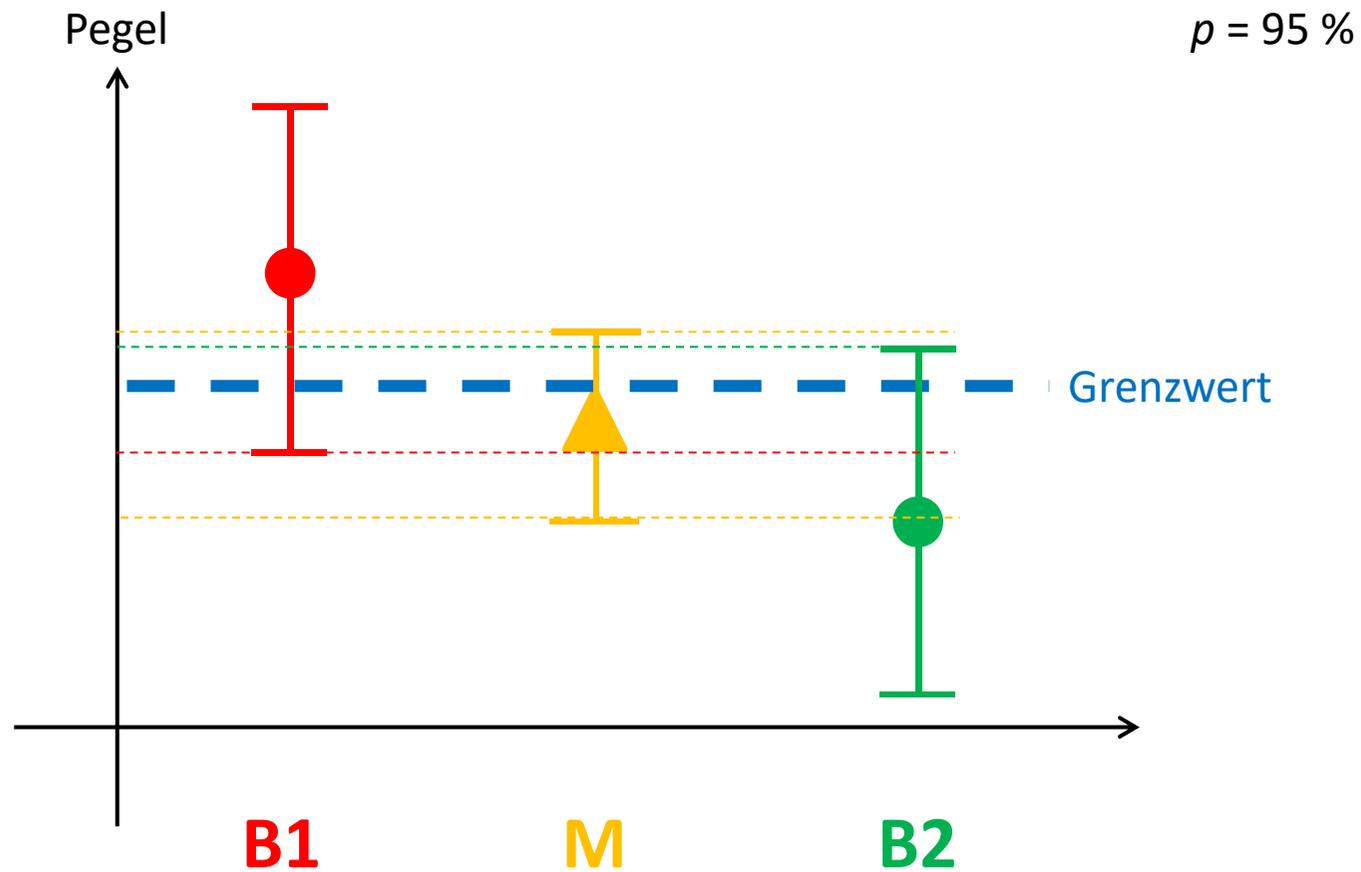
T = Transmission

I = Immission

Merkmale

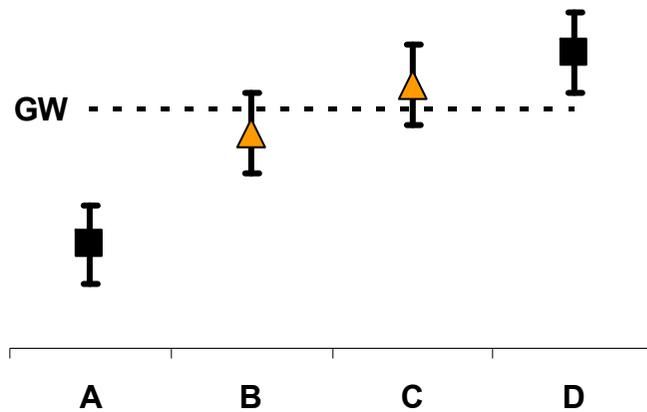
- In der Umweltakustik interessiert in den meisten Fällen die Unsicherheit des Mittelungspegels.
- Dieser ist in der Regel kleiner als die Unsicherheit eines Einzelereignispegels.
- Die Unsicherheit einer Berechnung kann nicht tiefer sein als die Unsicherheit der Messausrüstung – sofern den Berechnungen in irgendeiner Form Messungen zugrunde liegen.
- Eine Unsicherheit lässt sich meist abschätzen, denn die analytischen Methoden und empirischen Daten stehen zur Verfügung oder lassen sich erschliessen.

Vergleich verschiedener Werte

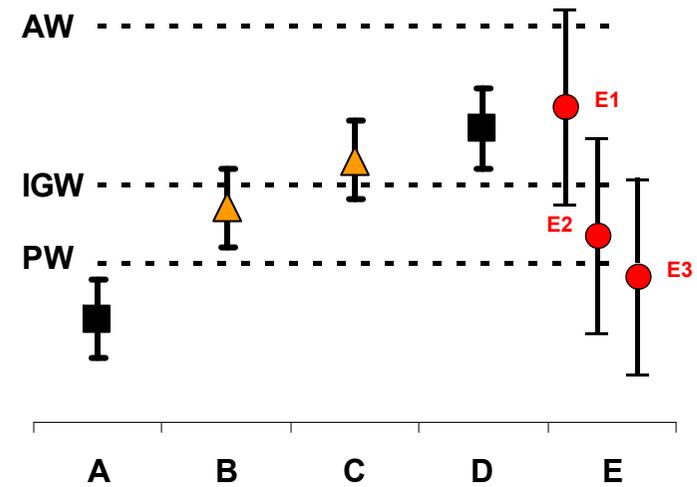


Vergleich mit Grenzwerten

Ein Grenzwert

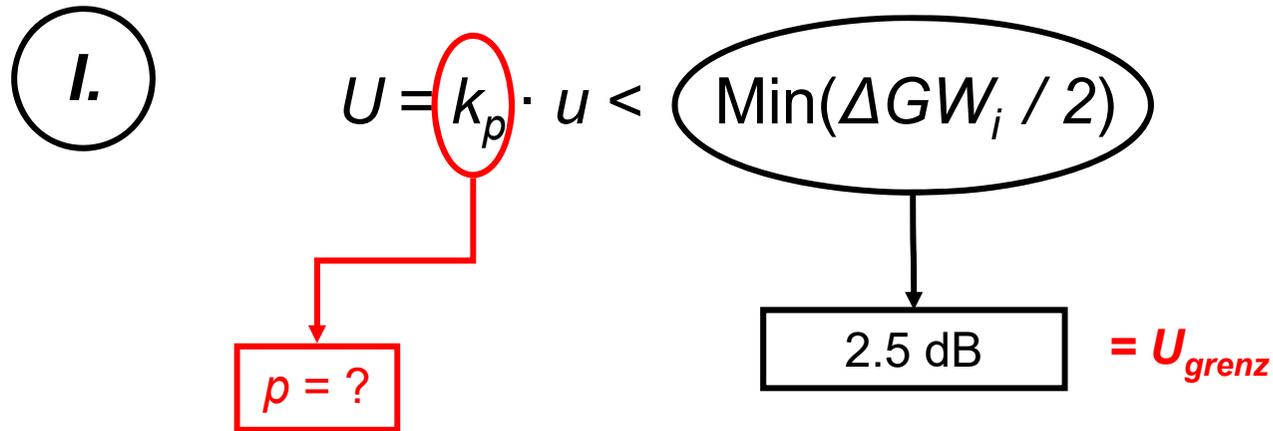


Mehrere Grenzwerte



**Die Fälle E1, E2 und E3
sollen vermieden werden!**

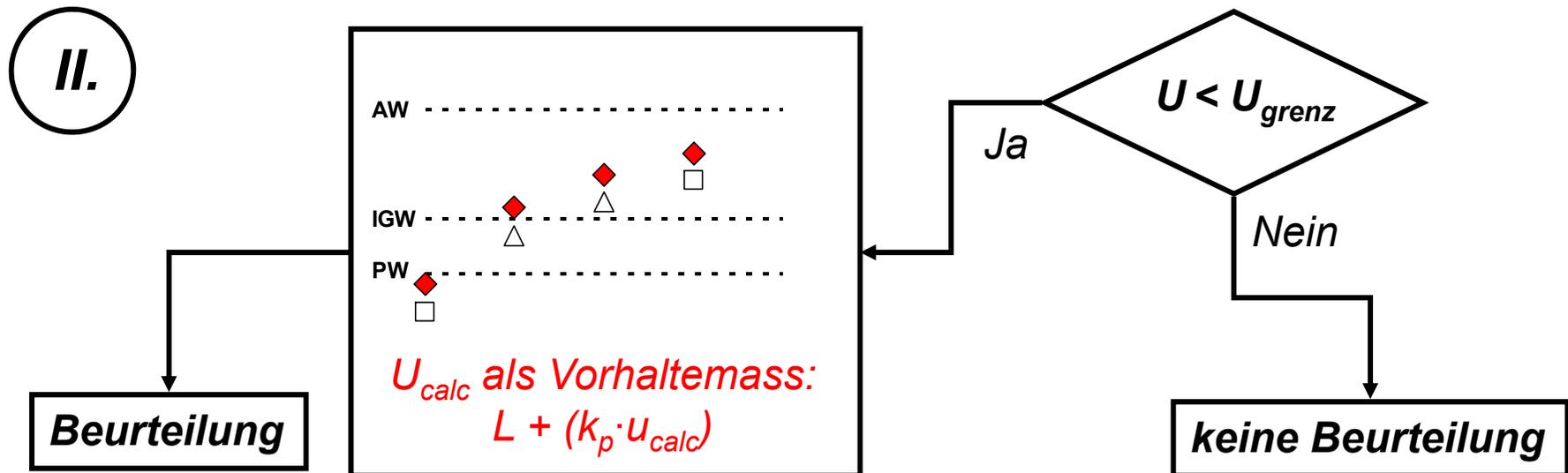
Vergleich mit Grenzwerten



Grenzunsicherheit:

Einführen einer Grenzunsicherheit im Sinne einer gerade noch tolerierbaren Unsicherheit, wobei zur Beurteilung der Grenzwertüberschreitung als Konvention der Mittelwert gilt.

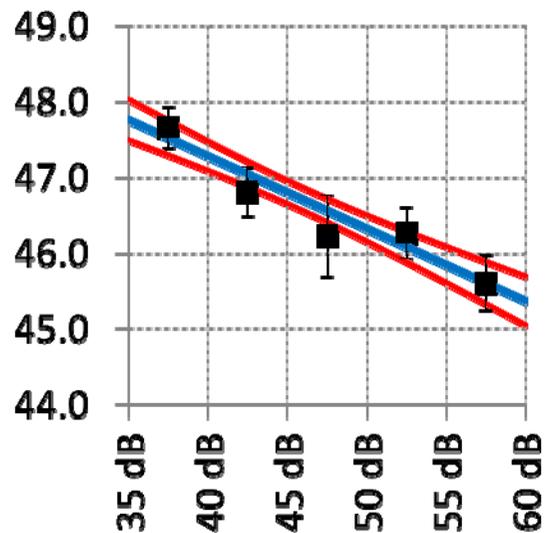
Vergleich mit Grenzwerten



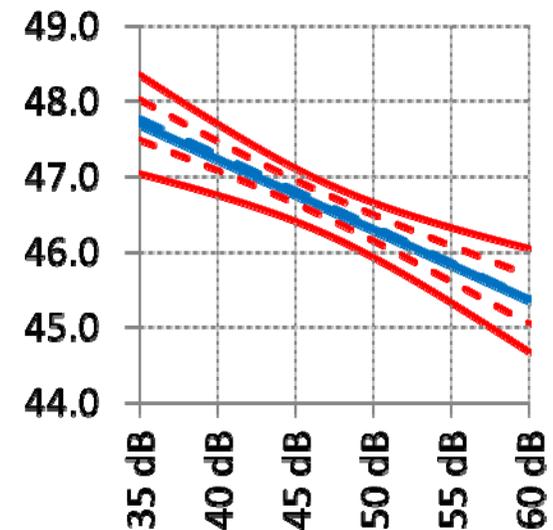
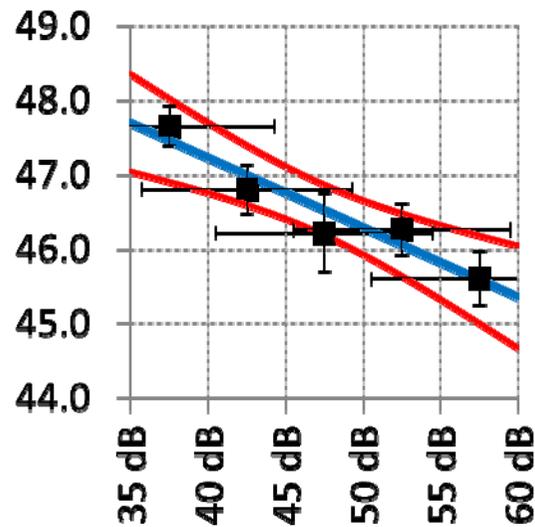
Unsicherheit als Vorhaltemass:

Unsicherheit zur Berechnung oder Messung schlagen und dann Beurteilung vornehmen. Dadurch hat der Lärmverursacher ein Interesse an der Verbesserung der Methode.

Berücksichtigung der Unsicherheit akustischer Pegelwerte



Je geringer der Zusammenhang zwischen Pegel und (erfragter) Wirkung, desto geringer der Einfluss der Pegelunsicherheit.



Fazit

- Zu jeder Berechnung oder Messung gehört eine Abschätzung der Unsicherheit, denn nur so lassen sich Berechnungen und Messungen vergleichen sowie eine angemessene Beurteilung vornehmen.
- Die Methoden zur Bestimmung der Unsicherheit stehen zur Verfügung; man muss sie nur nutzen.
- Gesetzlich relevante Beurteilungen sollten sich auf den ermittelten Wert stützen, wobei dieser eine noch zu definierende Unsicherheit auf einem noch zu definierenden Vertrauensniveau einzuhalten hat.
- Werden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, ist die Ermittlung mit verbesserten Methoden oder Modellen zu wiederholen im Bestreben die Unsicherheit zu reduzieren.
- Ist dies nicht möglich, ist anzugeben, auf welchem Vertrauensniveau die vorgegebene Unsicherheit eingehalten werden kann. Der definitive Entscheid liegt dann bei der beurteilenden Behörde.