Unsicherheit - Konzept und Auswirkungen für Normung und Strahlenschutz

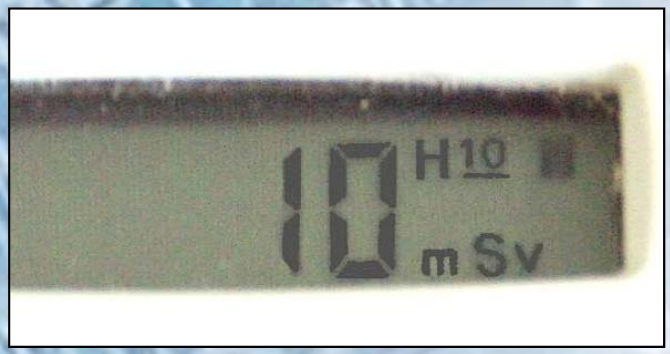
Rolf Behrens

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Inhalt

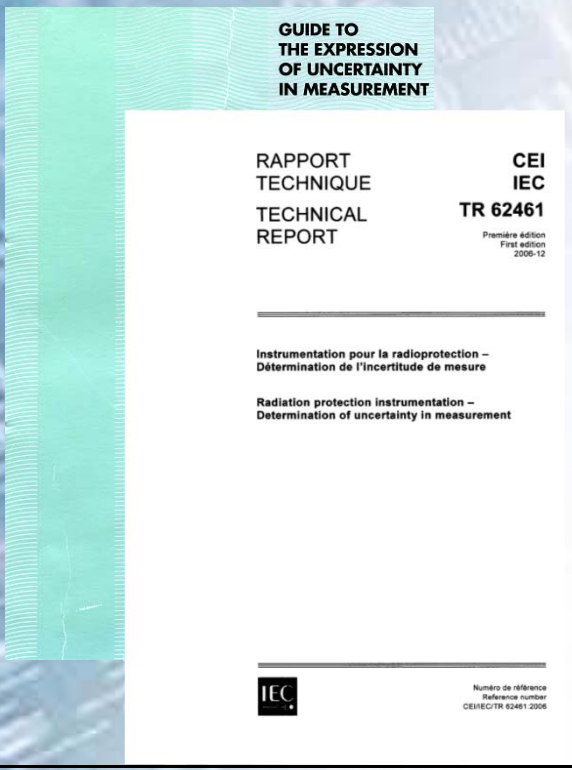
- Unsicherheit – das Konzept
- Auswirkung für die Normung
- Auswirkung für den Strahlenschutz

Unsicherheit – das Konzept



Anzeige eines Dosimeters

- Dosis = Anzeige?
- Vielleicht – vielleicht nicht!
- Unsicher???



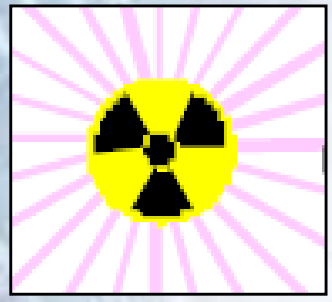
Bestimmung der Unsicherheit

Grundlagen-Literatur:

- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM (1995)
- IEC 62461 TR (Technischer Bericht): Radiation protection instrumentation – Determination of uncertainty in measurement:2006

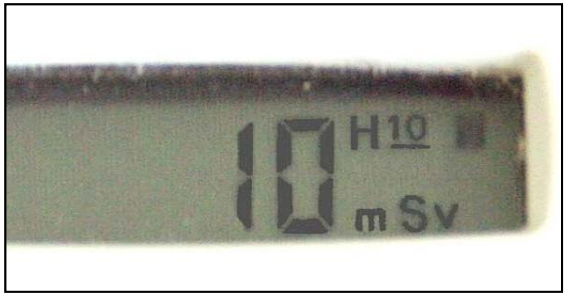
Unsicherheit - das Konzept

Zweck einer Messung:
Dosis bestimmen



Ursache

Ergebnis einer Messung:
Anzeige

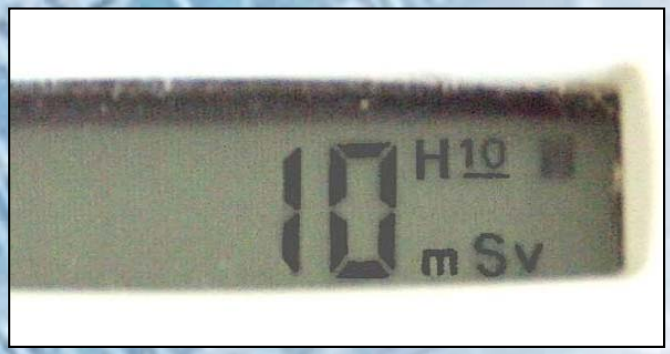


Wirkung

$$H_p(10) = N\,K(G - D)$$

Dosis = Anzeige mit Korrekturen

Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

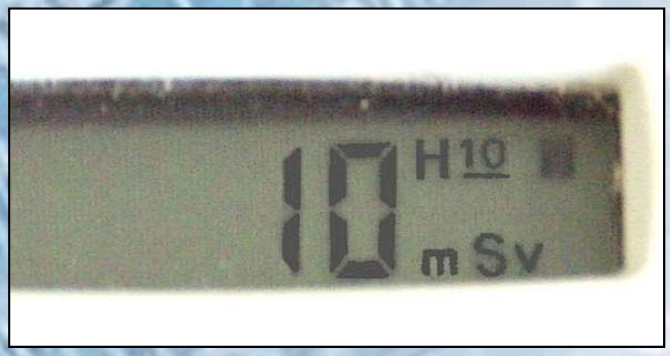
Bestimmung der Unsicherheit

Schritt für Schritt:

1. **Modellfunktion aufstellen:** $Y = f(x_i)$, z.B. $H_p(10) = N\,K\,(G - D)$ ✓
2. **Eingangsgrößen bestimmen:**
   - Wert (Schätzer): x_i
   - Standard-Unsicherheit: $u(x_i)$
   - Empfindlichkeitskoeffizient: $c_i = \partial f / \partial x_i$
3. **Variation der Eingangsgrößen ➔ Einfluss auf Ausgangsgröße**
4. **Kombination aller Beiträge zur Gesamtunsicherheit:** (ohne Korrelationen)

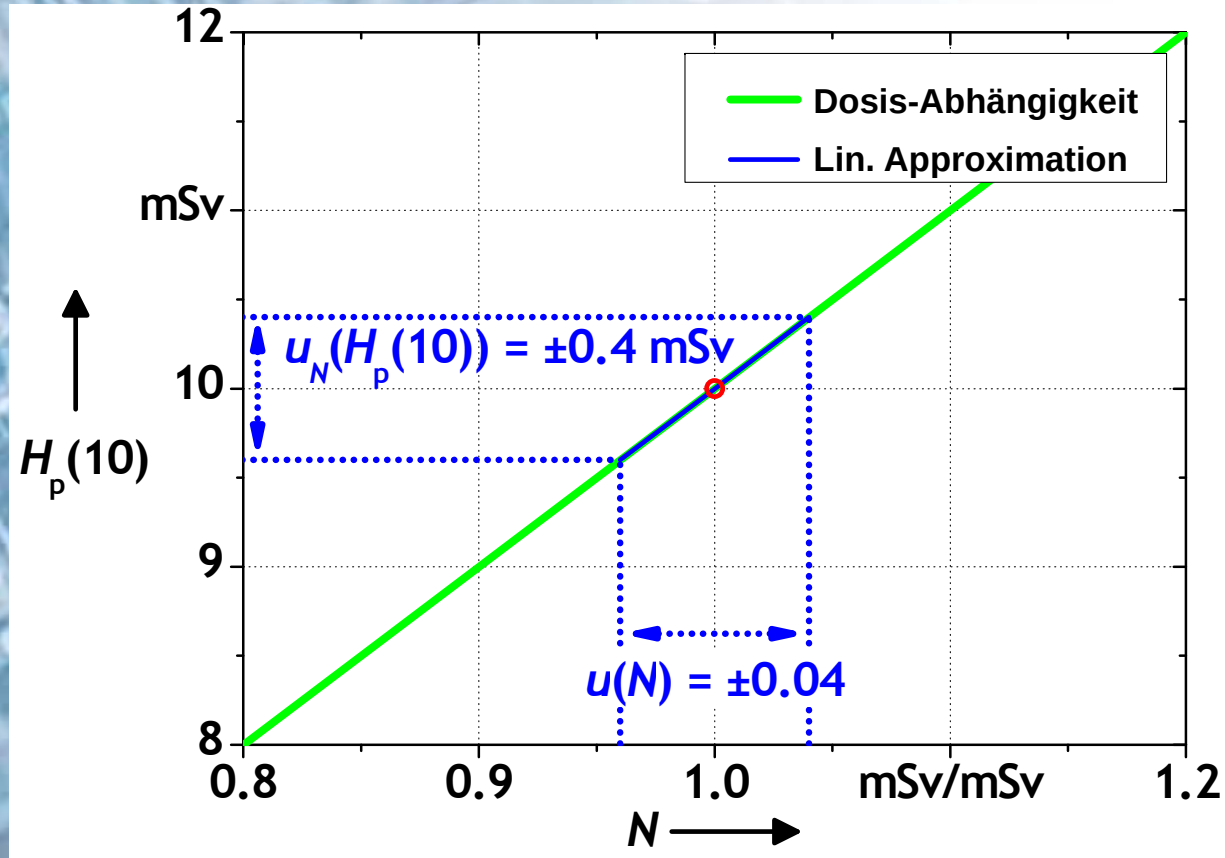
$$u_c(y) = \sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial x_1}\cdot u(x_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial x_2}\cdot u(x_2)\right]^2 + \cdots}$$

Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

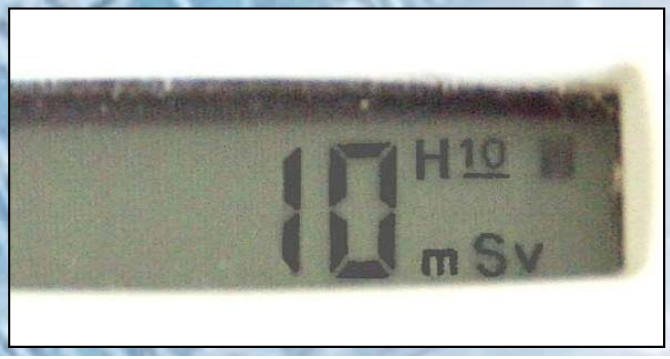
Variation der Eingangsgrößen ➔ Einfluss auf Ausgangsgröße: Kalibrierfaktor



- **Wert (Schätzer):**
  N = 1 mSv/mSv
- **Standard-Unsicherheit:**
  $u(N)$ = 0.04 mSv/mSv
- **Empfindlichkeitskoeffizient (Steigung):** $c_N = \partial H_p(10) / \partial N$
  $= K\,(G - D) = 10$ mSv *)
- **Unsicherheitsbeitrag:**
  $u_N(H_p(10)) = c_N \cdot u(N) = 0.4$ mSv

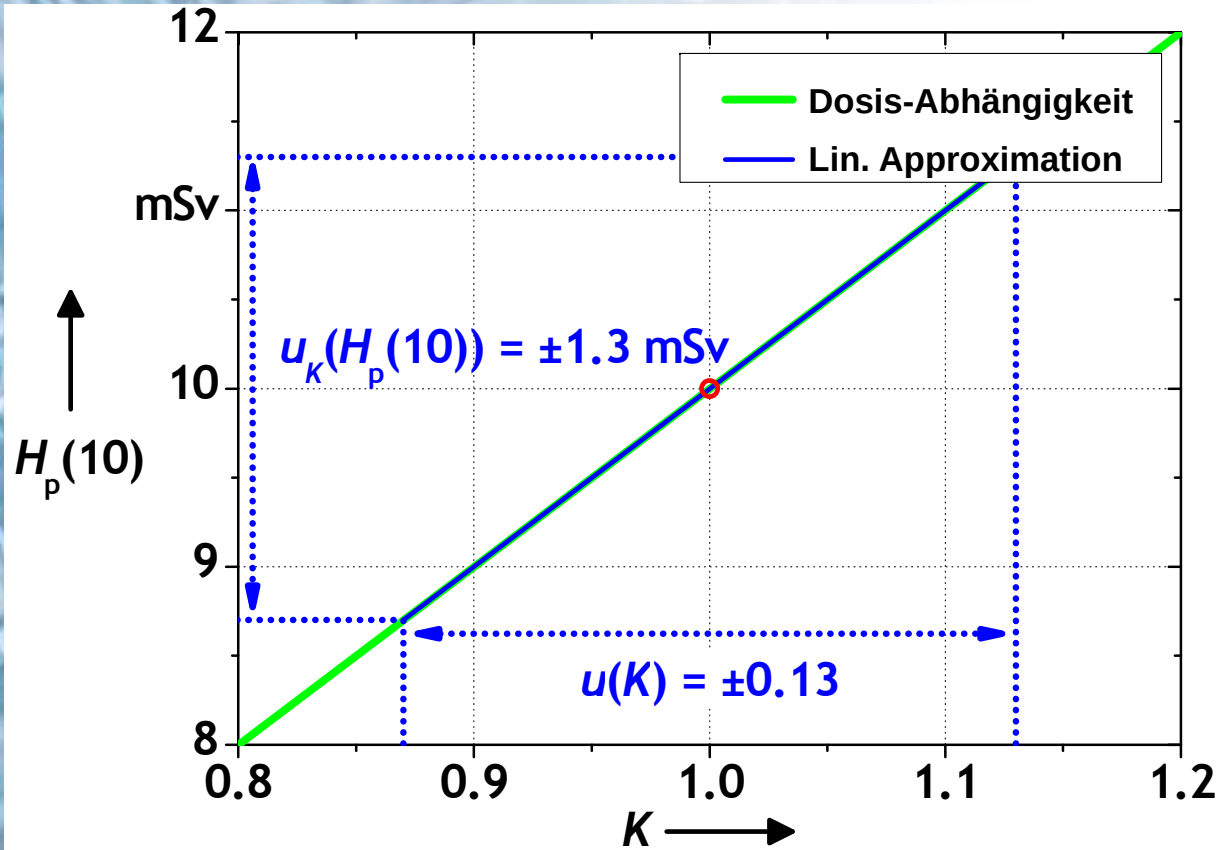
*) mit $K = 1$ und $D = 0$ mSv

Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

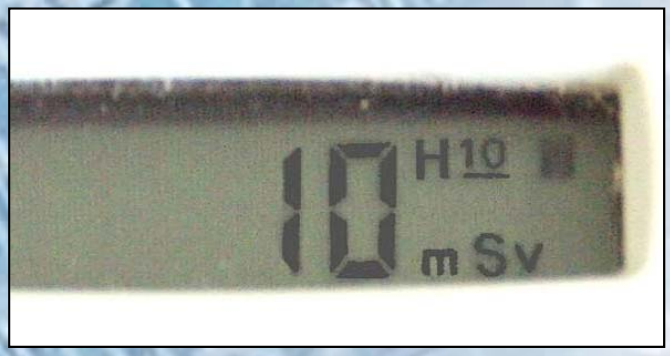
Variation der Eingangsgrößen ➔ Einfluss auf Ausgangsgröße: Korrektionsfaktor (wg. EW)



- **Wert (Schätzer):**
  $K = 1$
- **Standard-Unsicherheit:**
  $u(K) = 13\% = 0.13$
- **Empfindlichkeitskoeffizient (Steigung):** $c_K = \partial H_p(10) / \partial K$
  $= N\,(G - D) = 10\,\text{mSv}$ *)
- **Unsicherheitsbeitrag:**
  $u_K(H_p(10)) = c_K \cdot u(K) = 1.3\ \text{mSv}$

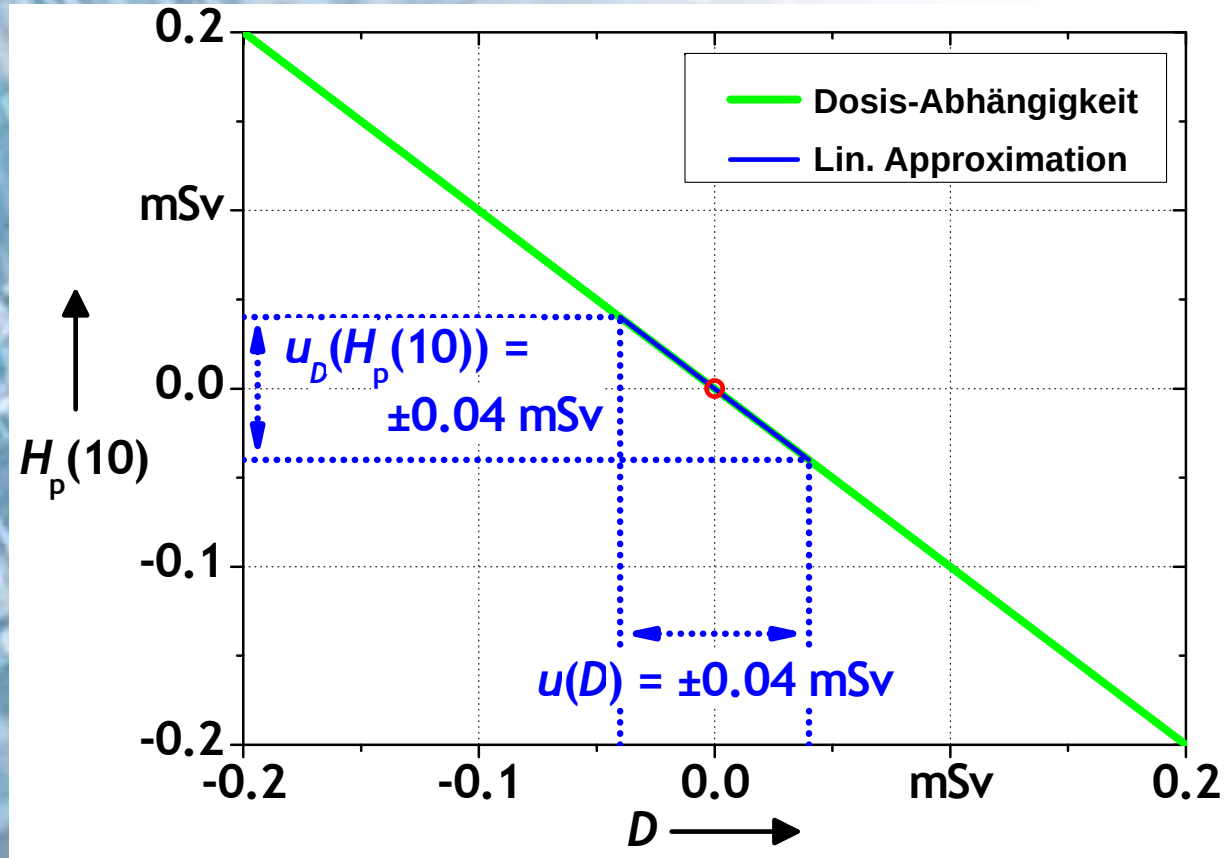
*) mit $N = 1\,\text{mSv/mSv}$ und $D = 0\,\text{mSv}$

Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

Variation der Eingangsgrößen ➔ Einfluss auf Ausgangsgröße: Abweichung (wg. Fall aus 1m)



- **Wert (Schätzer):**
  D = 0 mSv
- **Standard-Unsicherheit:**
  $u(D)$ = 0.04 mSv
- **Empfindlichkeitskoeffizient (Steigung):** $c_D = \partial H_p(10) / \partial D$
  $= -(N\,K) = -1$ mSv/mSv *)
- **Unsicherheitsbeitrag:**
  $u_D(H_p(10)) = c_D \cdot u(D) = -0.04$ mSv

*) mit $K = 1$ und $N = 1$ mSv/mSv

Unsicherheit - das Konzept

$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

Kombination aller Beiträge: Gesamt-Unsicherheitsbudget

Größe	Wert (Schätzer) x_i	Standard-unsicherheit $u(x)$	Empfindlichkeits-koeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $c_i \cdot u(x)$
N	1.00 mSv/mSv	0.04 mSv/mSv	10 mSv	0.4 mSv
K	1.00	0.13	10 mSv	1.3 mSv
G	10.0 mSv	0.5 mSv	1 mSv/mSv	0.5 mSv
D	0.00 mSv	0.04 mSv	−1 mSv/mSv	−0.04 mSv
$H_p(10)$	10.0 mSv	1.5 mSv		

$$u_c(H_p(10)) = \sqrt{[c_N \cdot u(N)]^2 + [c_K \cdot u(K)]^2 + [c_G \cdot u(G)]^2 + [c_D \cdot u(D)]^2}$$

$$= \sqrt{(0.4\,\text{mSv})^2 + (1.3\,\text{mSv})^2 + (0.5\,\text{mSv})^2 + (-0.04\,\text{mSv})^2}$$

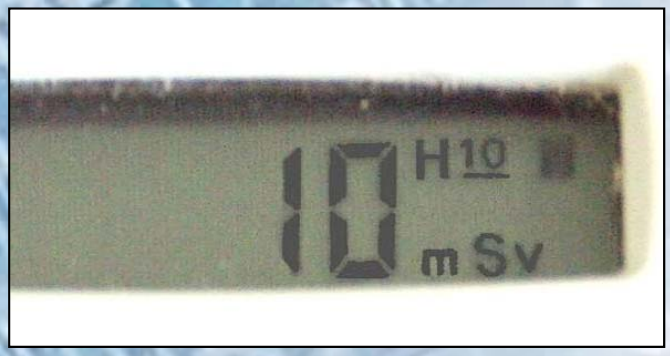
$$= 1.5\,\text{mSv} \quad \textit{(bei Korrelationen weitere Terme)}$$

Endergebnis: $H_p(10) = (10.0 \pm 3.0)$ mSv mit $k = 2$ (95 %), d.h. Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 7.0 .. 13.0 mSv

Unsicherheit – das Konzept

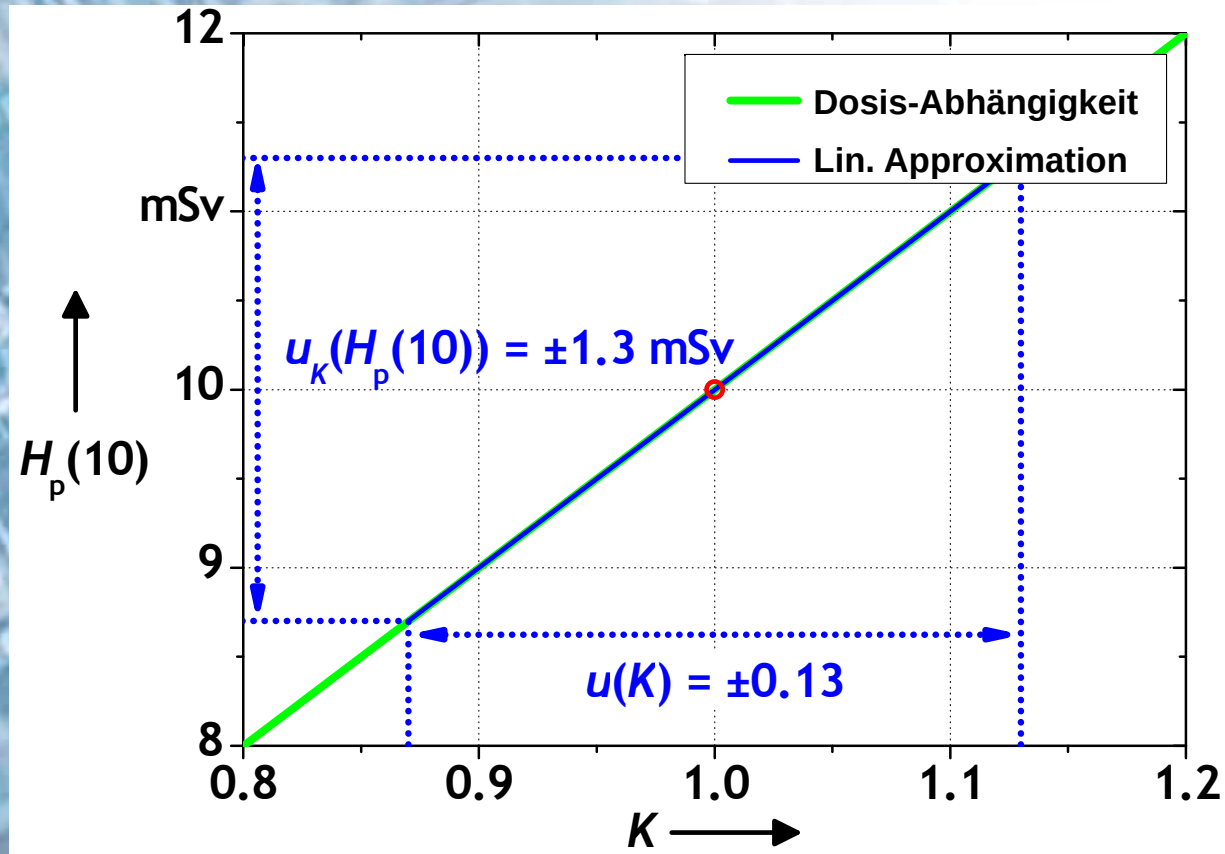
So einfach
Nun etwas Hintergrund-Info

Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

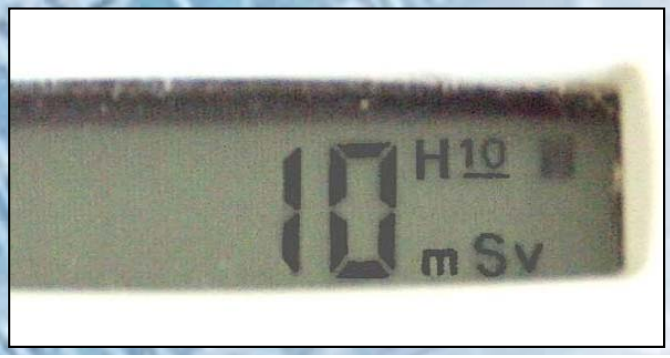
Variation der Eingangsgrößen ➔ Einfluss auf Ausgangsgröße: Korrektionsfaktor (wg. EW)



- Wert (Schätzer):
  $K = 1$
- Standard-Unsicherheit:
  $u(K) = 13\% = 0.13$

Wie wird $u(K)$ bestimmt?

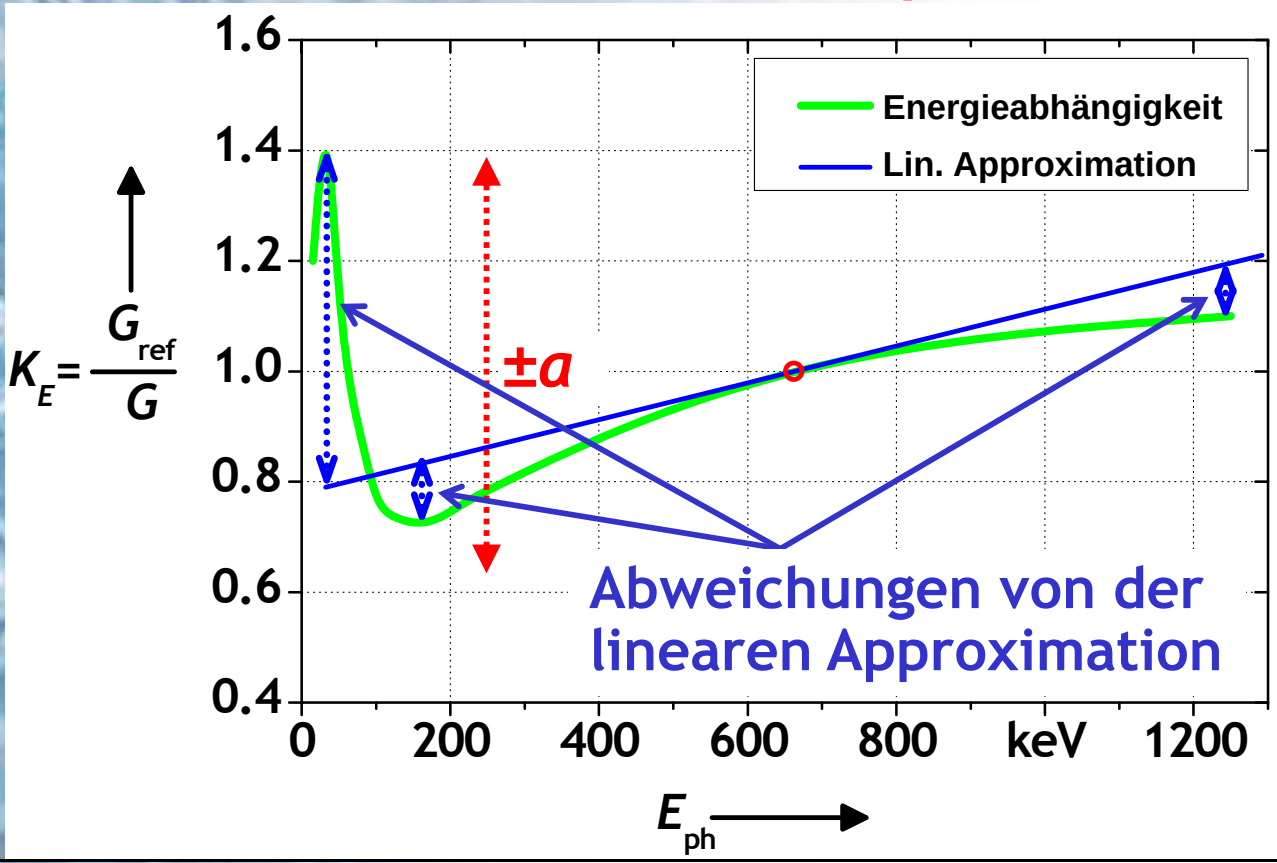
Unsicherheit - das Konzept



$$H_p(10) = N\,K\,(G - D)$$

Bestimmung von $u(K)$

Beispiel - Strahlungsenergie



- Wert (Schätzer): $K_E = 1$
- Standard-Unsicherheit: $u(E)$ = maximal
- Lineare Approximation nicht mehr gültig

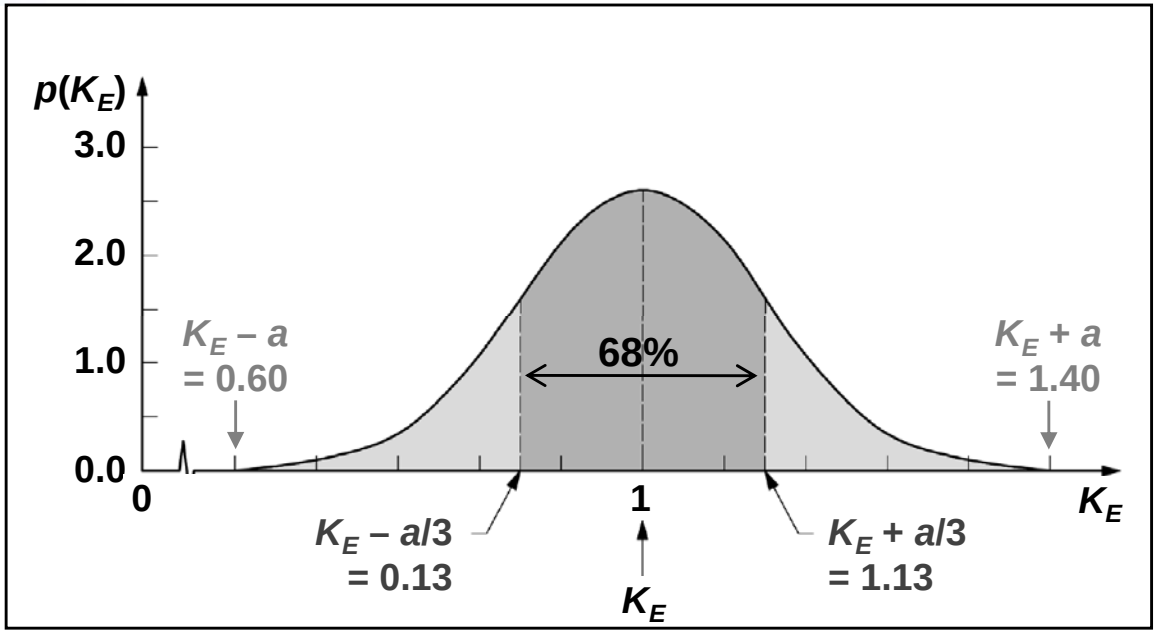
➔ GUM-Verfahren so nicht anwendbar!

➔ Ausweg: Nutze Maximalgrenzen von K_E: a = 40 % = 0.40

Unsicherheit – das Konzept

Gegeben: Maximalgrenze einer Eingangsgröße: $x \pm a$, z.B. $K_{EW} = 1 \pm 0.4$
Gesucht: Standardunsicherheit $u(x)$, d.h. 68 % der möglichen Werte von x liegen innerhalb $x \pm u(x)$.

Beispiel: Gaußverteilung für den Korrektionsfaktor wg. EW

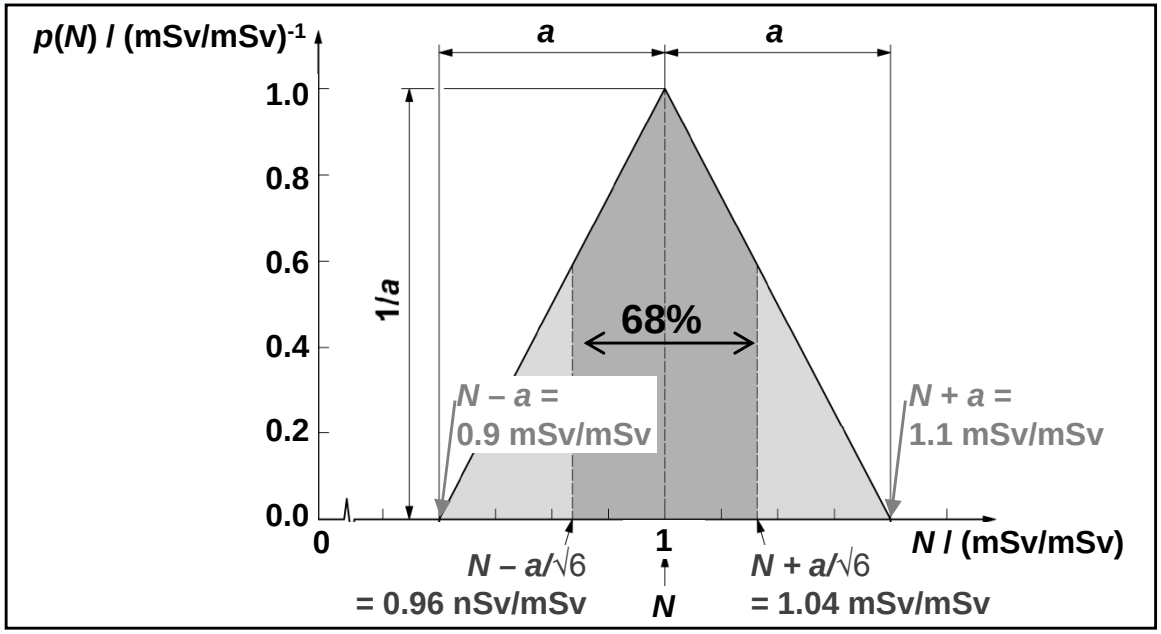


Typ der Verteilung	Standard-unsicherheit $u(x)$	Bemerkung	Beispiel
Gauß	$a/3$	99.7 % der mögl. Werte innerh. x a	Energie- und Winkelabhängigk.: $x = 1.0$ $a = \pm 0.40$ ➔ $u(x) = \pm 0.13$

Unsicherheit – das Konzept

Gegeben: Maximalgrenze einer Eingangsgröße: $x \pm a$, z.B. $N = 1 \pm 0.1$
Gesucht: Standardunsicherheit $u(x)$, d.h. 68 % der möglichen Werte von x liegen innerhalb $x \pm u(x)$.

Beispiel: Dreiecksverteilung für den Kalibrierfaktor

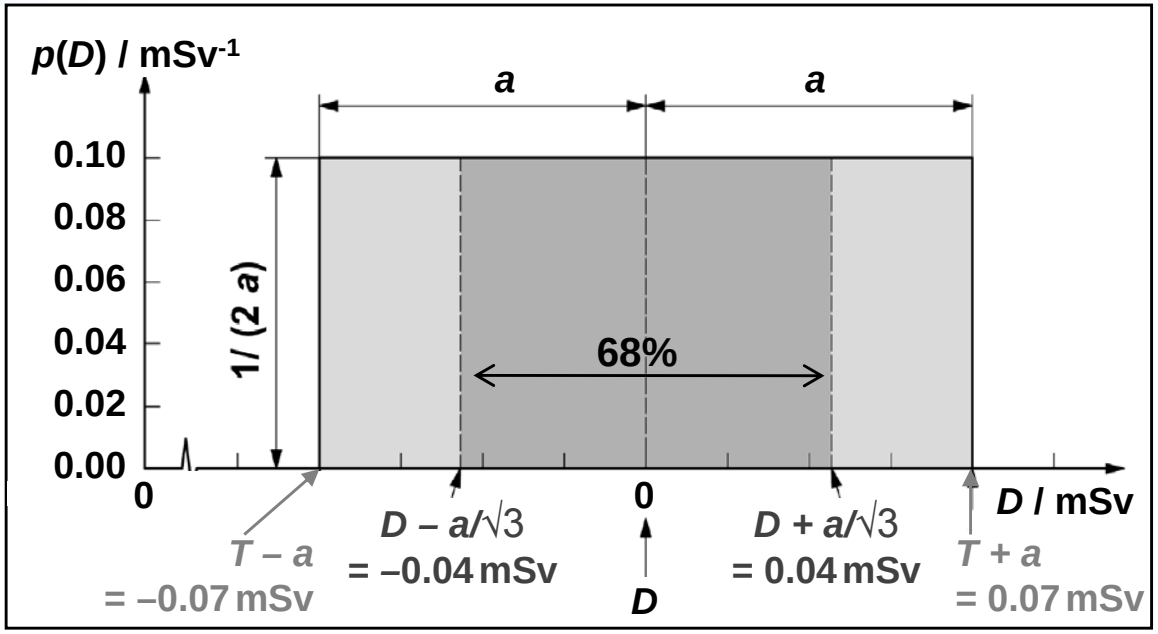


Typ der Verteilung	Standard-unsicherheit $u(x)$	Bemerkung	Beispiel
Gauß	$a/3$	99.7 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Energie- und Winkelabhängigk.: $x = 1.0$ $a = \pm 0.40 \rightarrow u(x) = \pm 0.13$
Dreieck	$a/\sqrt{6}$	100 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Kalibrierfaktor: $x = 1$ mSv/mSv $a = \pm 0.1$ mSv/mSv $\rightarrow u(x) = \pm 0.04$ mSv/mSv

Unsicherheit – das Konzept

Gegeben: Maximalgrenze einer Eingangsgröße: $x \pm a$, z.B. $D = 0 \pm 0.07$ mSv
Gesucht: Standardunsicherheit $u(x)$, d.h. 68 % der möglichen Werte von x liegen innerhalb $x \pm u(x)$.

Beispiel: Rechteckverteilung für die Abweichung wg. Fall aus 1 m



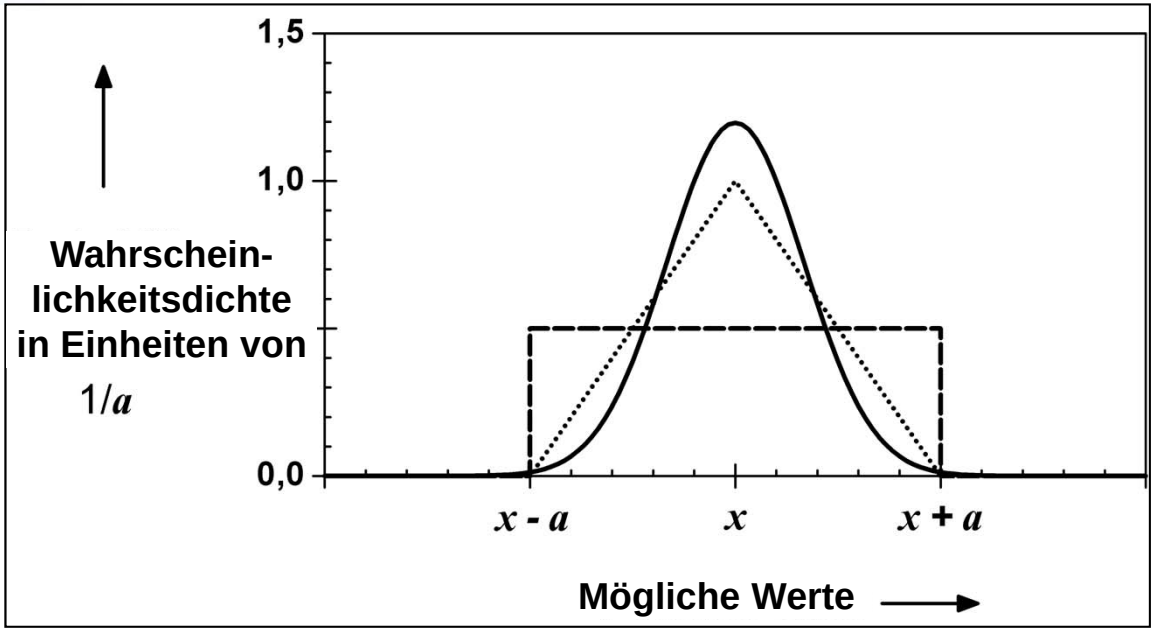
Typ der Verteilung	Standard-unsicherheit $u(x)$	Bemerkung	Beispiel
Gauß	$a/3$	99.7 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Energie- und Winkelabhängigk.: $x = 1.0$ $a = \pm 0.40 \rightarrow u(x) = \pm 0.13$
Dreieck	$a/\sqrt{6}$	100 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Kalibrierfaktor: $x = 1$ mSv/mSv $a = \pm 0.1$ mSv/mSv $\rightarrow u(x) = \pm 0.04$ mSv/mSv
Rechteck	$a/\sqrt{3}$	100 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Abweichung: $x = 0$ mSv $a = \pm 0.07$ mSv $\rightarrow u(x) = \pm 0.04$ mSv

Unsicherheit – das Konzept

Gegeben: Maximalgrenze einer Eingangsgröße: $x \pm a$

Gesucht: Standardunsicherheit $u(x)$, d.h. 68 % der möglichen Werte von x liegen innerhalb $x \pm u(x)$.

$u(x)$ ist abhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Werte von x



Typ der Verteilung	Standard-unsicherheit $u(x)$	Bemerkung	Beispiel
Gauß	$a/3$	99.7 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Energie- und Winkelabhängigk.: $x = 1.0$ $a = \pm 0.40 \rightarrow u(x) = \pm 0.13$
Dreieck	$a/\sqrt{6}$	100 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Kalibrierfaktor: $x = 1$ mSv/mSv $a = \pm 0.1$ mSv/mSv $\rightarrow u(x) = \pm 0.04$ mSv/mSv
Rechteck	$a/\sqrt{3}$	100 % der mögl. Werte innerh. $x \quad a$	Abweichung: $x = 0$ mSv $a = \pm 0.07$ mSv $\rightarrow u(x) = \pm 0.04$ mSv

Inhalt

- Unsicherheit – das Konzept
- Auswirkung für die Normung
- Auswirkung für den Strahlenschutz

Auswirkung für die Normung

Ann.: Passives Photonen-Dosimeter erfüllt die Norm IEC62387:2012

➔ Uns. folgt aus Norm-Forderungen, d.h. aus K_{EW} = 1.0 ± 0.4 …

Größe	Wert (Schätzer) x_i	Standard-unsicherheit $u(x)$	Verteilung	Empfindlichkeits-koeffizient c_i	Unsicher-heitsbeitrag $c_i \cdot u(x)$
N	1.00	0.1 / √6 = 0.041	Dreieck	10 mSv	0.41 mSv
K_n	1.00	0.1 / √3 = 0.058	Rechteck	10 mSv	0.58 mSv
K_{EW}	1.00	0.40 / 3 = 0.133	Gauß	10 mSv	1.30 mSv
…	…	…	…	…	…
G	10.0 mSv	5% x 10 mSv = 0.5 mSv	Gauß	1	0.5 mSv
D_{EMC1}	0.00 mSv	0.7 x 0.1 mSv / 3 = 0.023 mSv	Gauß	−1	−0.023 mSv
…	…	…	…	…	…
D_{drop}	0.00 mSv	0.7 x 0.1 mSv / √3 = 0.04 mSv	Rechteck	−1	−0.040 mSv
$H_p(10)$	10.0 mSv	1.9 mSv (19 %)			

Endergebnis: $H_p(10)$ = (10.0 ± 3.8) mSv mit k = 2 (95 %), d.h.
Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 6.2 .. 13.8 mSv

Auswirkung für die Normung

Ann.: Passives Photonen-Dosimeter erfüllt die Norm IEC62387:2012
➔ Uns. folgt aus Norm-Forderungen, d.h. aus K_{EW} = 1.0 ± 0.4 …

Endergebnis: $H_p(10)$ = (10.0 ± 3.8) mSv mit k = 2 (95 %), d.h.
Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 6.2 .. 13.8 mSv

- **unterschiedliche Dosimeter**
- **unterschiedlichen Eigenschaften**
- **Anzeige kann um > Faktor 2 (!) unterschiedlich sein obwohl Normen erfüllt sind.**

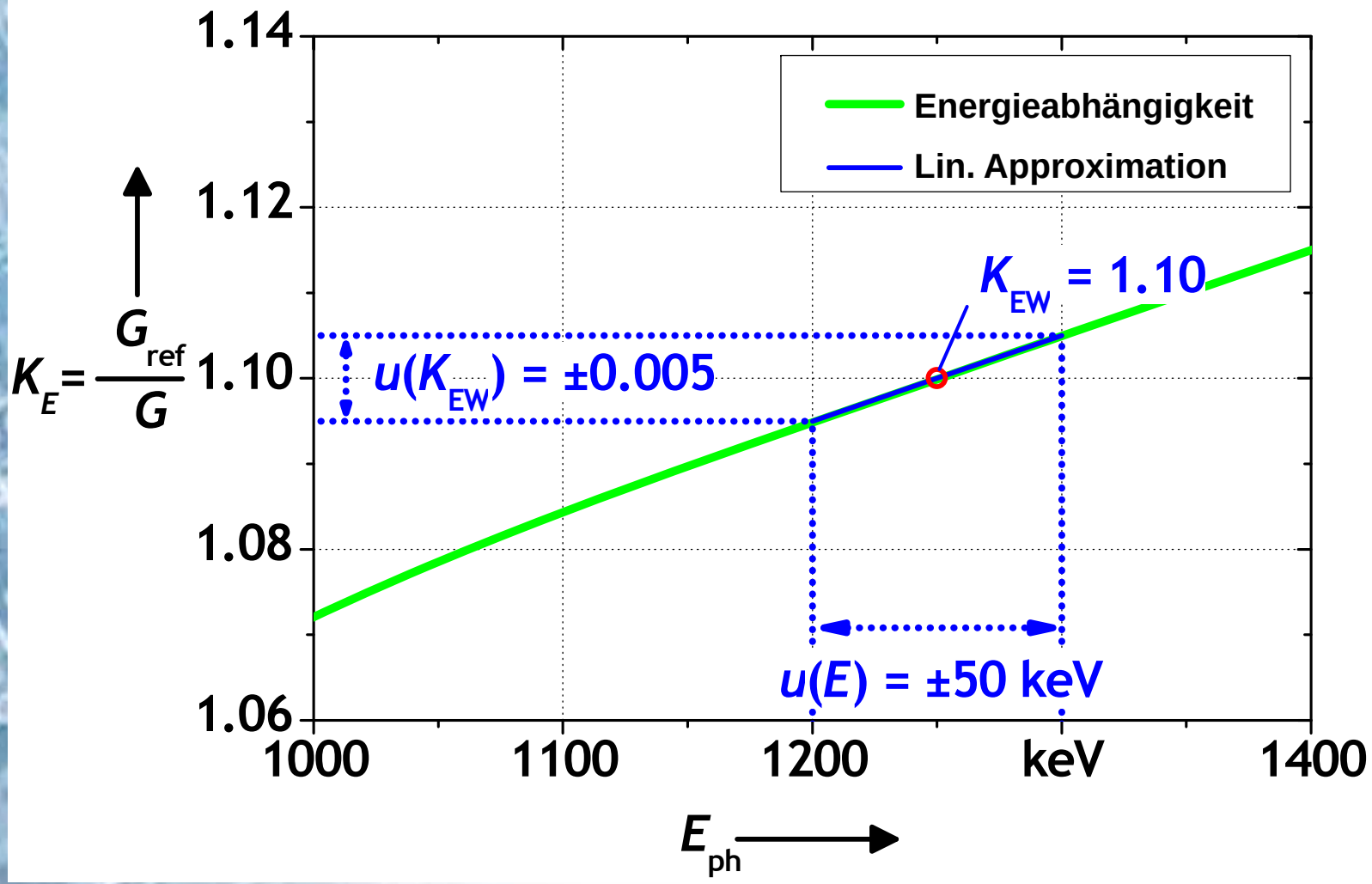
Inhalt

- Unsicherheit – das Konzept
- Auswirkung für die Normung
- Auswirkung für den Strahlenschutz

Auswirkung für den Strahlenschutz

Ann.: Einige Einflussgrößen bekannt ➔ wende Korrekturen an,

z.B. K_{EW} = 1.10 ± 0.005, da ^{60}Co-Strahlung …



Auswirkung für den Strahlenschutz

Ann.: Einige Einflussgrößen bekannt ➔ wende Korrekturen an, z.B. K_{EW} = 1.10 ± 0.005, da ^{60}Co-Strahlung …

Größe	Wert (Schätzer) x_i	Standard-unsicherheit $u(x)$	Verteilung	Empfindlichkeits-koeffizient c_i	Unsicher-heitsbeitrag $c_i \cdot u(x)$
N	1.00	0.04 / √6 = 0.016	Dreieck	12 mSv	0.19 mSv
K_n	1.05	0.04 / √3 = 0.017	Rechteck	11 mSv	0.19 mSv
K_{EW}	1.10	0.005	Gauß	10 mSv	0.05 mSv
…	…	…	…	…	…
G	10.0 mSv	1% x 10 mSv = 0.1 mSv	Gauß	1.2	0.12 mSv
D_{EMC1}	0.00 mSv	0.7 x 0.1 mSv / 3 = 0.023 mSv	Gauß	−1.2	−0.027 mSv
…	…	…	…	…	…
D_{drop}	0.00 mSv	0.7 x 0.1 mSv / √3 = 0.04 mSv	Rechteck	−1.2	−0.047 mSv
$H_p(10)$	11.6 mSv	0.5 mSv (4.4%)			

Endergebnis: $H_p(10)$ = (11.6 ± 1.0) mSv mit k = 2 (95 %), d.h. Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 10.6 .. 12.6 mSv

Auswirkung für den Strahlenschutz

- **Kenntnis gering:**
  Dosimeter erfüllt Norm und ist für Strahlungsfeld geeignet

  Endergebnis: $H_p(10)$ = (10.0 ± 3.8) mSv mit k = 2 (95 %), d.h.
  Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 6.2 .. 13.8 mSv

- **Bester Schätzer = Anzeige; Unsicherheit groß**

- **Kenntnis hoch:**
  Strahlungsfeld und Umgebungsbedingungen gut bekannt

  Endergebnis: $H_p(10)$ = (11.6 ± 1.0) mSv mit k = 2 (95 %), d.h.
  Dosis liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall 10.6 .. 12.6 mSv

- **Bester Schätzer ≠ Anzeige; Unsicherheit klein**

- **Intervalle überlappen ➔ Auswertungen konsistent**

Vielen Dank - Fragen?

Unsicherheit - Konzept und Auswirkungen für Normung und Strahlenschutz

Rolf Behrens

Physikalisch-Technische Bundesanstalt