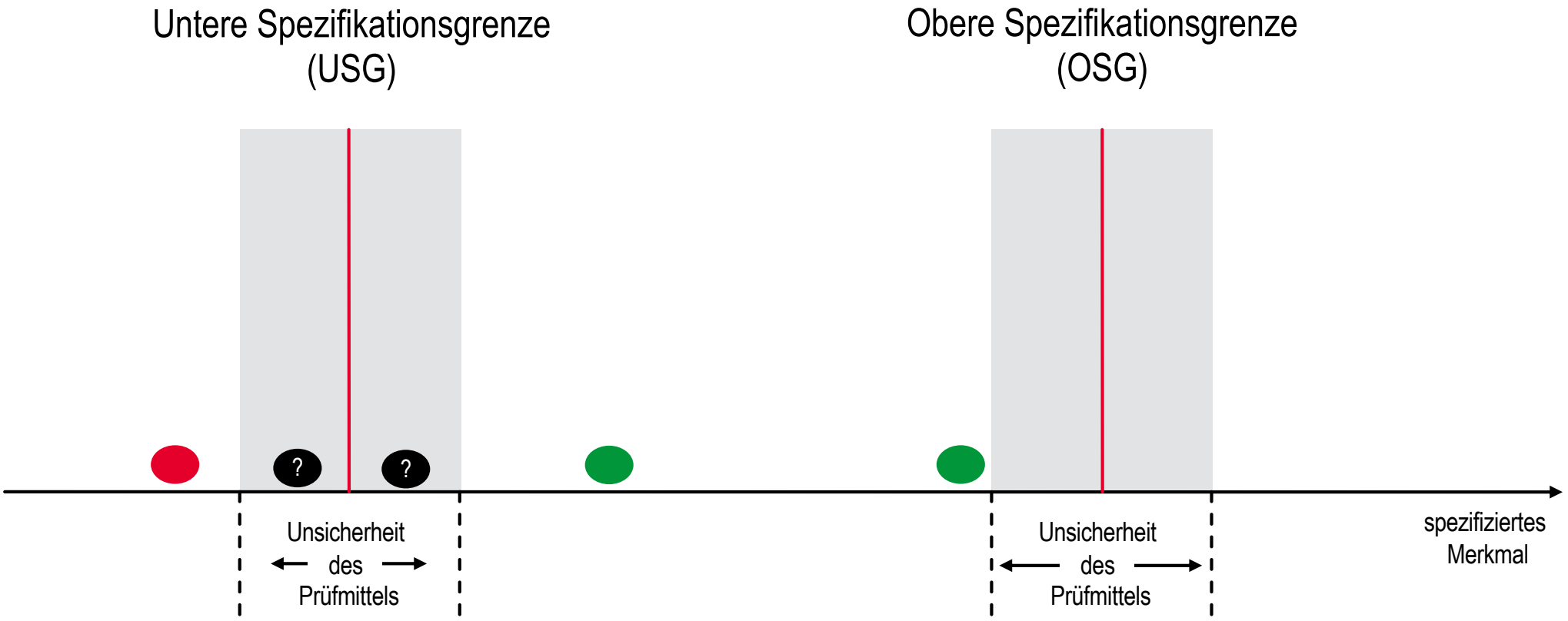
10. Measure – Messsystemanalyse (MSA)

Qualität und Zuverlässigkeit von Prüfsystemen bewerten

Problemstellung

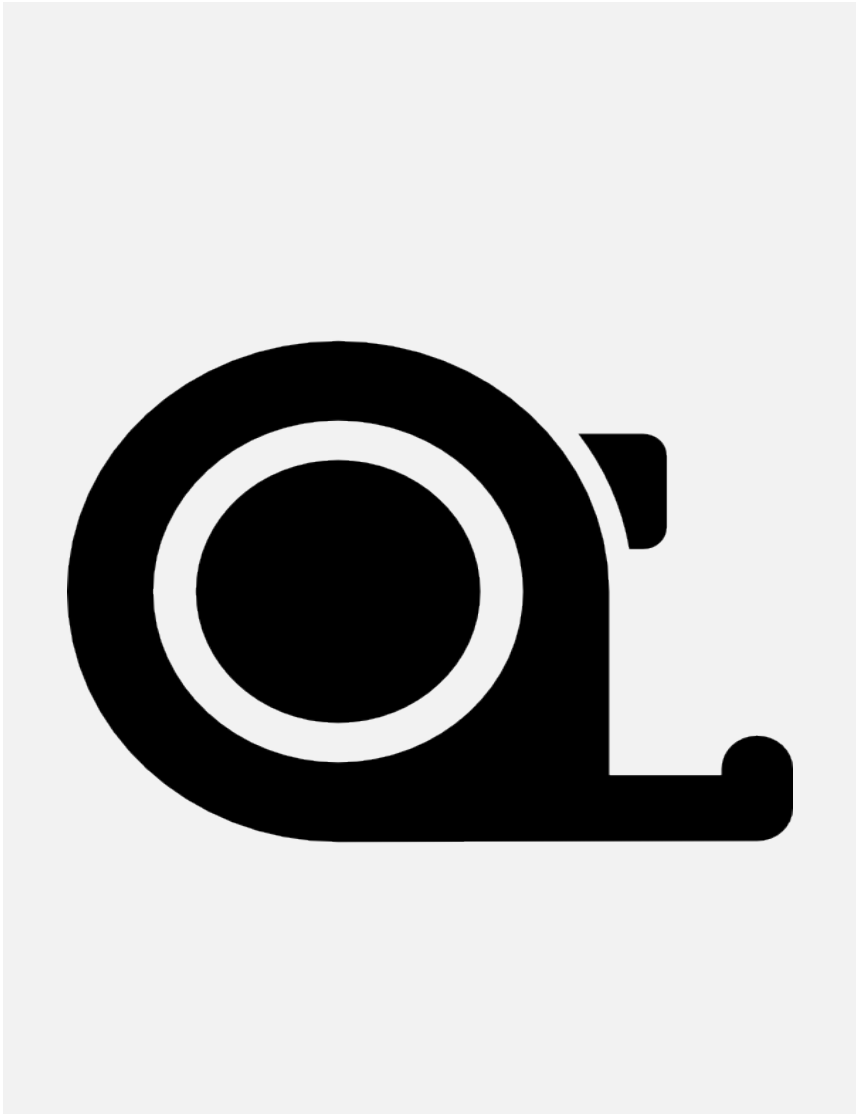
Falls ein Messfehler vorliegt, bleiben wir im Unklaren über die Annehmbarkeit eines Produkts oder einer Dienstleistung.



Konsequenzen von Messfehlern

Test - Entscheidung	Wirkliche Situation: gutes Produkt	Wirkliche Situation: schlechtes Produkt
Produkt annehmen	Lieferung eines guten Produkts	Lieferung eines fehlerhaften Produkts
Produkt ablehnen	Gutes Produkt wird aussortiert	Schlechtes Produkt wird aussortiert

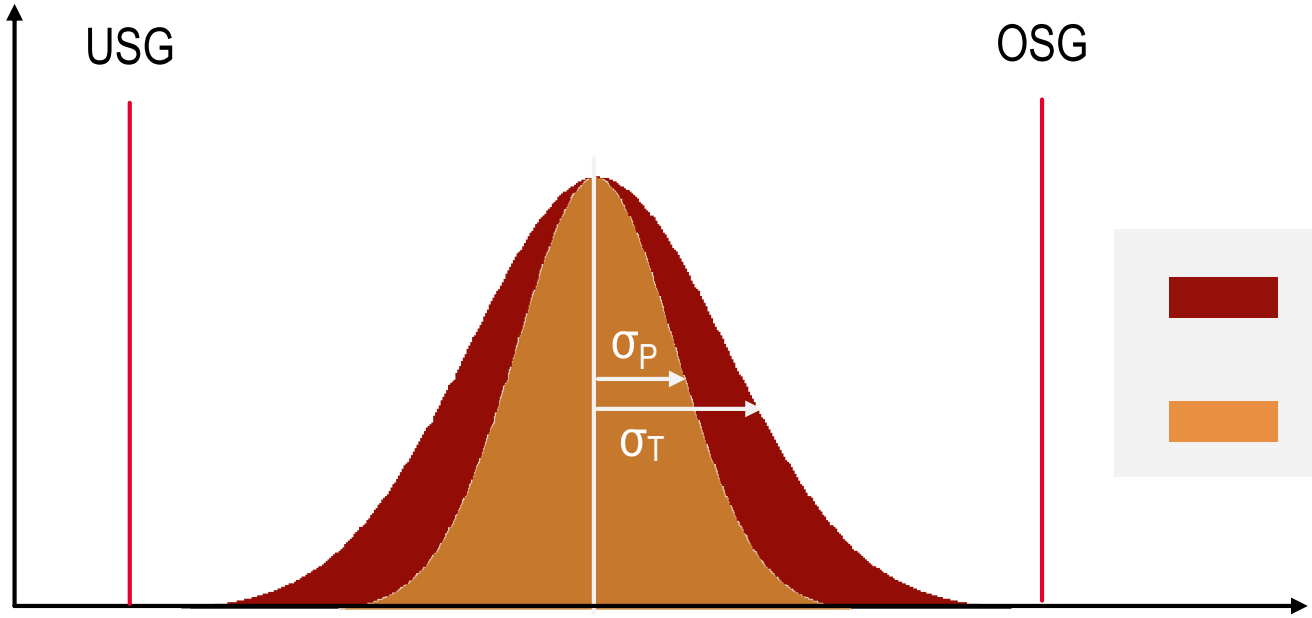
Eignung eines Messsystems



Ein Messsystem (Messverfahren) gilt als geeignet, wenn:

- Die Ergebnisse des einzelnen Prüfers (des einzelnen Systems) wiederholbar sind.
- Die Ergebnisse von Prüfer zu Prüfer (von System zu System) reproduzierbar sind.
- Die Gesamtstreuung des Messsystems klein gegen die Toleranz ist.
- Die Gesamtstreuung des Messsystems klein gegen die Prozessstreuung ist.
- Die Ergebnisse zeitlich stabil sind.

Die Varianz der Messung geht in die Datenwerte ein



nach außen sichtbare Streuung

Tatsächliche Prozessstreuung

Gesamte (beobachtete) Varianz =
Varianz des Prozesses + Varianz der Messmethode

$$\sigma_T^2 = \sigma_p^2 + \sigma_m^2$$

Ideal: $\sigma_m \sim 0$

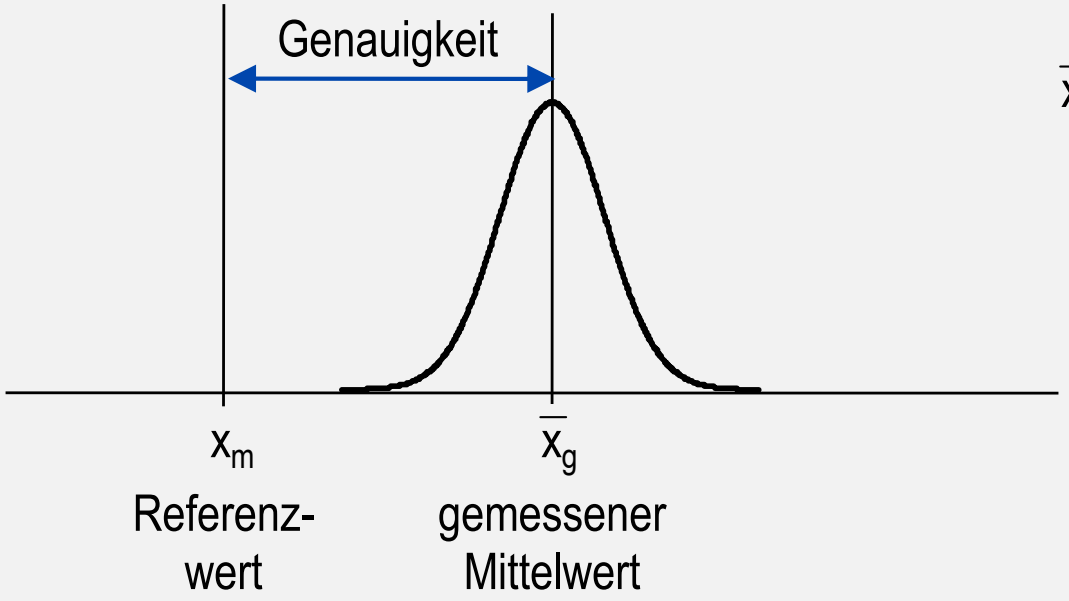
Die Elemente der Messvarianz

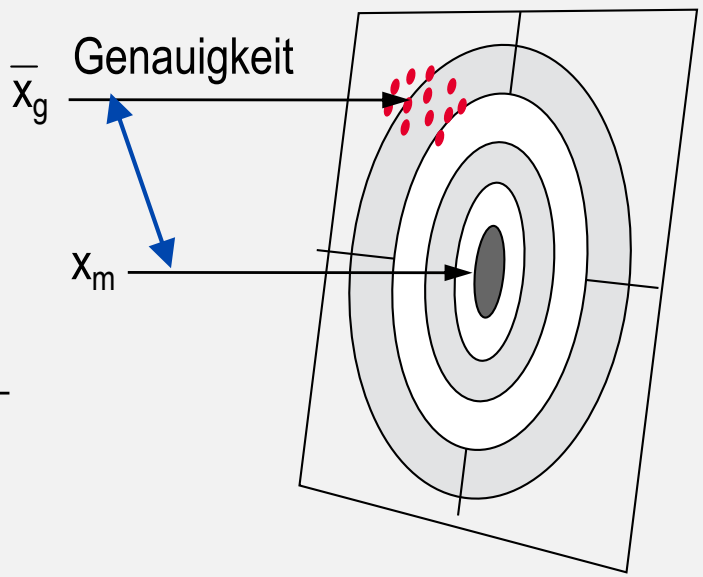
International	Deutsch	Erklärung
Bias (Accuracy)	Genauigkeit / Systematische Messabweichung	Die Differenz zwischen dem Mittelwert der Messungen und dem tatsächlichen Mittelwert eines Referenzmusters (Testmuster)
Linearity	Linearität	Die Unterschiede in der Mittelwertverschiebung über den Arbeitsbereich des Messmittels
Repeatability	Wiederholbarkeit (Wiederholpräzision)	Die Messabweichung mehrerer Messungen von einem Teil mit einem Messgerät und einem Bediener*
Reproducibility	Reproduzierbarkeit (Vergleichspräzision)	Die mittlere Messabweichung bei der Messung eines Teils mit einem Messgerät aber verschiedenen Bedienern*
Stability	Stabilität	Die Messabweichung bei der wiederholten Messung eines Teiles über einen längeren Zeitraum

*anstelle von Bediener kann hier auch System verstanden werden

Genauigkeit – Systematische Messabweichung

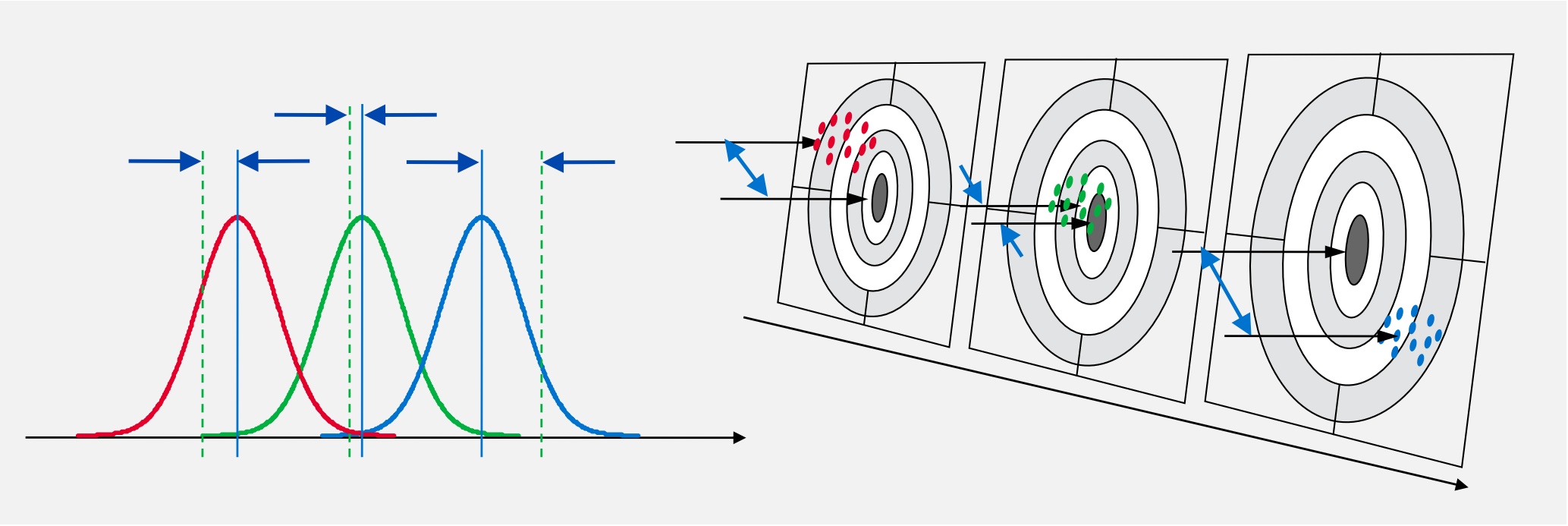
- Die systematische Messabweichung (auch: Genauigkeit) beschreibt die Abweichung zwischen dem Mittelwert der Ergebnisse des Messsystems bei wiederholtem Messen und dem Referenzwert des Merkmals.
- Das zu messende Teil ist ein Normal (Referenzwert), dessen Wert mit Präzisions-Messsystemen ermittelt wurde und das auf ein nationales oder internationales Normal zurückführbar sein muss.





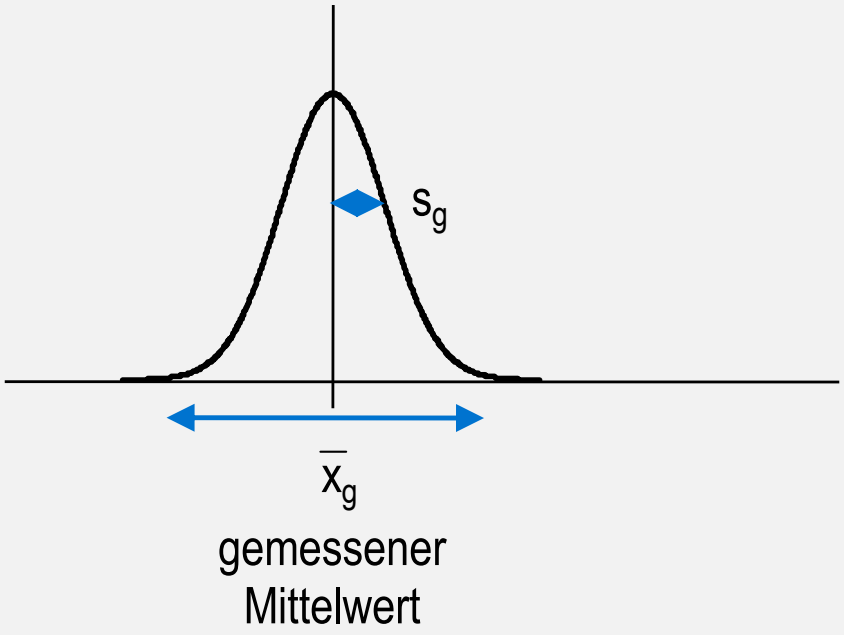
Linearität

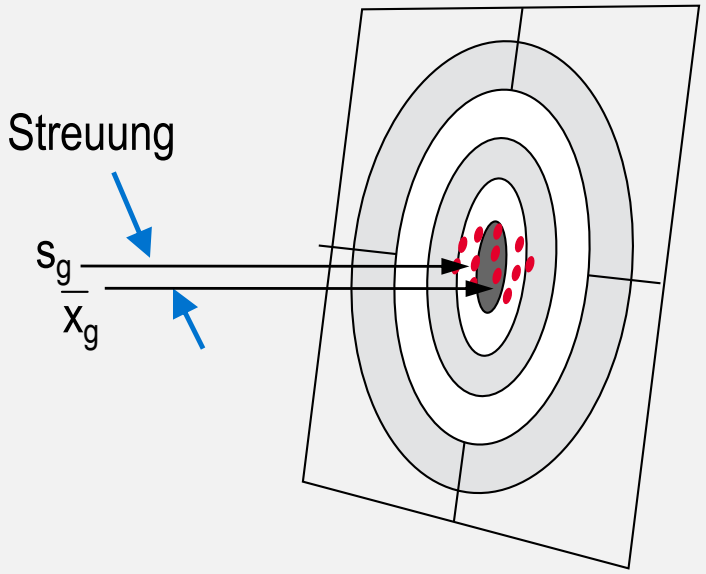
- Linearität bedeutet einen konstant bleibenden Zusammenhang zwischen der Ausgangsgröße und der Eingangsgröße eines Messmittels bei deren Änderung.
- Ist die Genauigkeit an verschiedenen Stufen des Messbereichs unterschiedlich, ist das Messsystem nicht-linear.



Wiederholpräzision (Repeatability)

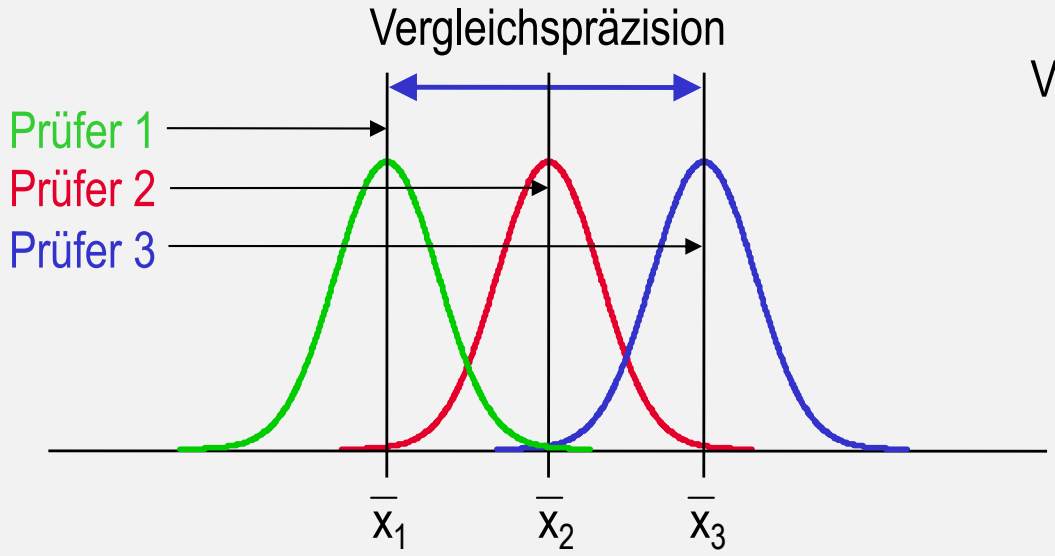
- Die Wiederholpräzision ist die Fähigkeit eines Messgerätes, bei wiederholtem Messen derselben Messgröße nahe beieinander liegende Ergebnisse zu liefern.
  - Gleicher Prüfling
  - Gleicher Prüfer
  - Gleiches Messgerät
  - Gleiche Umgebungsbedingungen

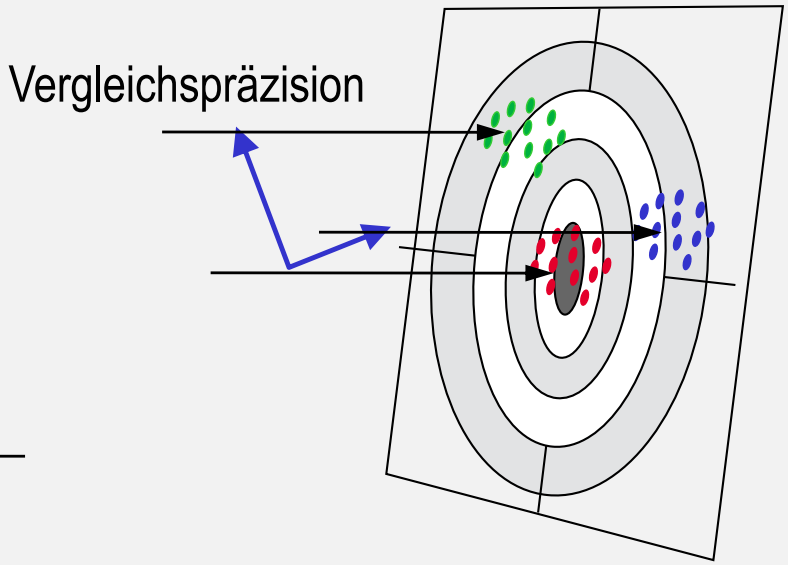




Vergleichspräzision (Reproducibility)

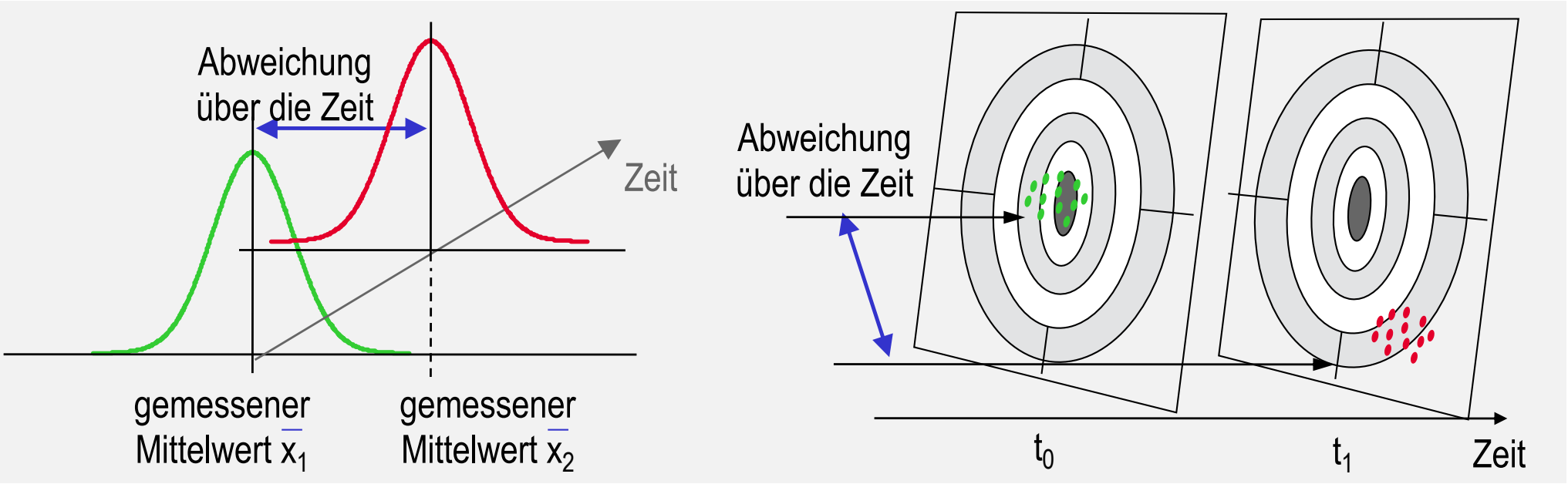
- Die Vergleichspräzision ist ein Maß für die Streuung zwischen Messergebnissen derselben Messgröße, gewonnen unter veränderten Messbedingungen.
- Wiederholte Messung des gleichen Merkmals am gleichen Prüfteil mit unterschiedlichen Prüfern (oder Systemen).



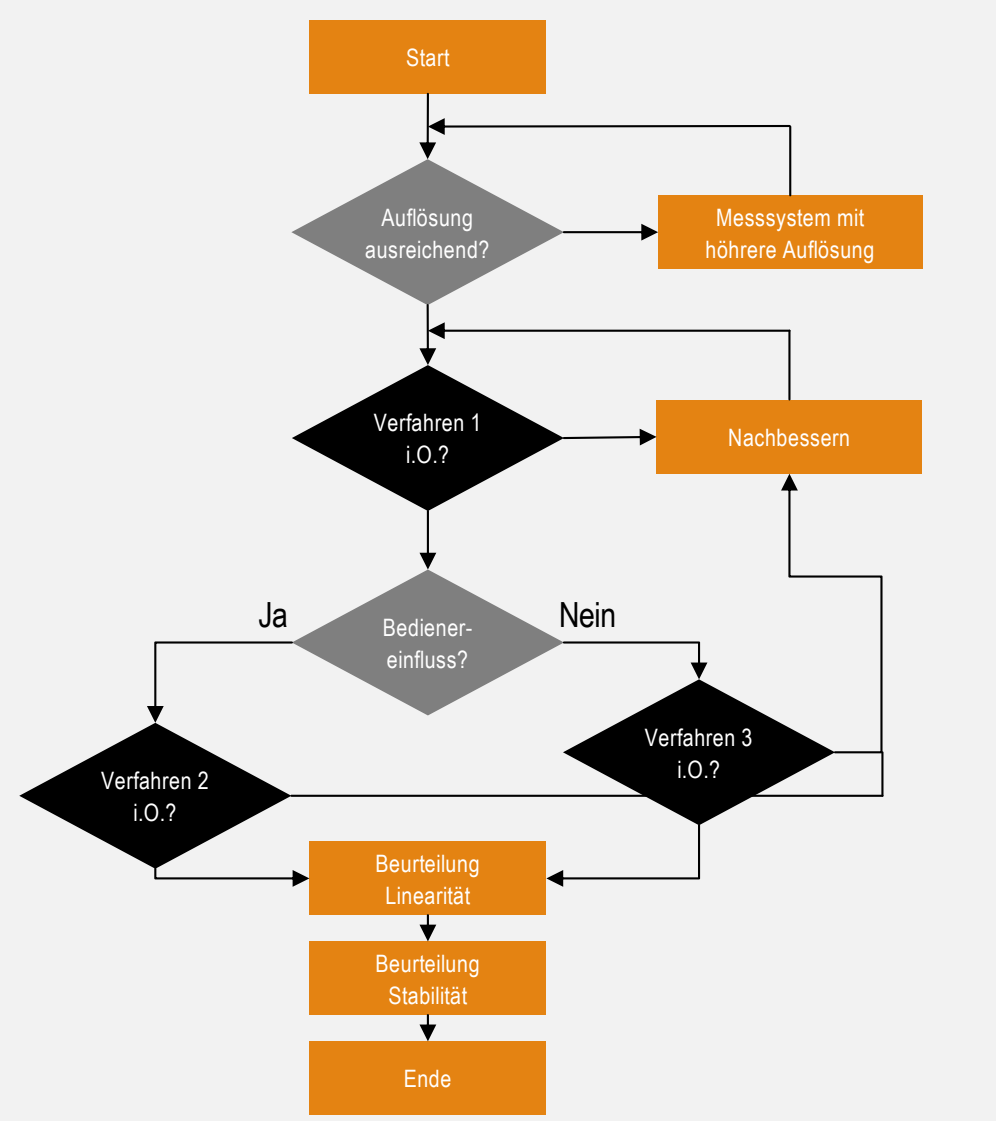


Messbeständigkeit / Stabilität

- Fähigkeit eines Messsystems, seine metrologischen Merkmale zeitlich unverändert beizubehalten.
- Wiederholte Messung des gleichen Merkmals zu festgelegte Zeitabständen
  - Prüfteil, Gerätebediener (Gutachter), Messgeräte und Umgebung bleiben gleich



Verfahren für den Fähigkeitsnachweis (MSA)



- Für den Fähigkeitsnachweis von Messsystemen haben sich verschiedene Methoden als sinnvoll herausgestellt.
- Je nach Verfahren können die verschiedenen Unsicherheits-komponenten ermittelt werden.

Prüfmittelbewertungsverfahren 1, 2 und 3

Verfahren 1

Dieses Verfahren dient der Beurteilung von neuen und geänderten Messsystemen, bevor diese eingesetzt werden.

- Bewertung anhand cg und cgk Indizes
- cg / cgk > 1,33

$$C_g = \frac{0{,}2 \cdot T}{4 \cdot s_g}$$

$$Bi = \left| \bar{x}_g - x_m \right|$$

$$C_{gk} = \frac{0{,}1 \cdot T - Bi}{2 \cdot s_g}$$

Verfahren 2

Verfahren 2 findet zur Beurteilung von neuen und vorhandenen Messsystemen statt.
Die Beurteilung erfolgt dabei unter möglichst realen Bedingungen, d.h. die Untersuchung wird am Einsatzort, mit original Mess-objekten und den Prüfern vor Ort durchgeführt.

- Die Beurteilung wird anhand des sogenannten% R&R Kennwertes festgestellt.

Verfahren 3

Bei Verfahren 3 handelt es sich um einen Sonderfall von Verfahren 2.
Diese Vorgehensweise wird bei Messsystemen ohne Bediener-einfluss angewendet.

- Die Beurteilung dieses Messverfahrens erfolgt ebenfalls anhand des% R&R Kennwerts.
- Es wird in Analogie zu Verfahren 2 die gleiche Abkürzung verwendet, obwohl eigentlich die Vergleichspräzision (Reproducibility) null ist.

11. Measure – Messung der Prozessleistung

Relevante Prozesskenngrößen identifizieren und bewerten

Definition: Merkmal

Bei statistischen Erhebungen werden bestimmte Eigenschaften oder

- Größen (**Merkmale**) erfasst, die bei allen
- Objekten (**Merkmalsträger**) der Grundgesamtheit vorhanden sind.

Diese Merkmale können in bestimmten

- **Ausprägungen** auftreten.

Merkmalsträger:	Personen	Fahrzeug
Merkmal:	Alter	Fahrzeugart
Ausprägung:	Alter in Jahren	PKW, LKW, Motorrad

Diskrete Merkmale

Man spricht von einem **diskreten Merkmal**, wenn es:
Nur endlich viele oder abzählbar unendlich viele Ausprägungen annehmen kann.

Beispiele:

- Kinderzahl einer Familie (theoretisch unendlich, aber stets eine ganze Zahl!)
- „Augen“ beim Würfeln (nur 6 Stufen möglich: 1, 2, 3, 4, 5, 6)
- Farben einer Ampel (nur drei Farben möglich: rot, gelb, grün)
  (Hier: attributives Merkmal)
- Anzahl defekter Einheiten (max. so viel wie produziert,
  aber stets eine ganze Zahl!)

Stetige (kontinuierliche) Merkmale

(Variabel, Quantitativ)

Ein Merkmal ist **stetig**, wenn es jeden beliebigen reellen Wert (zumindest in einem bestimmten Intervall) annehmen kann.

Beispiele:

- Körpergröße (cm)
- Entfernung: Wohnung / Arbeitsstätte (km)
- Dauer eines Arbeitsvorgangs (s)
- Gewicht (kg)

Skalenniveaus

Welche Beziehungen bestehen zwischen den Ausprägungen der Merkmale,
also „wie unterscheiden sie sich?“

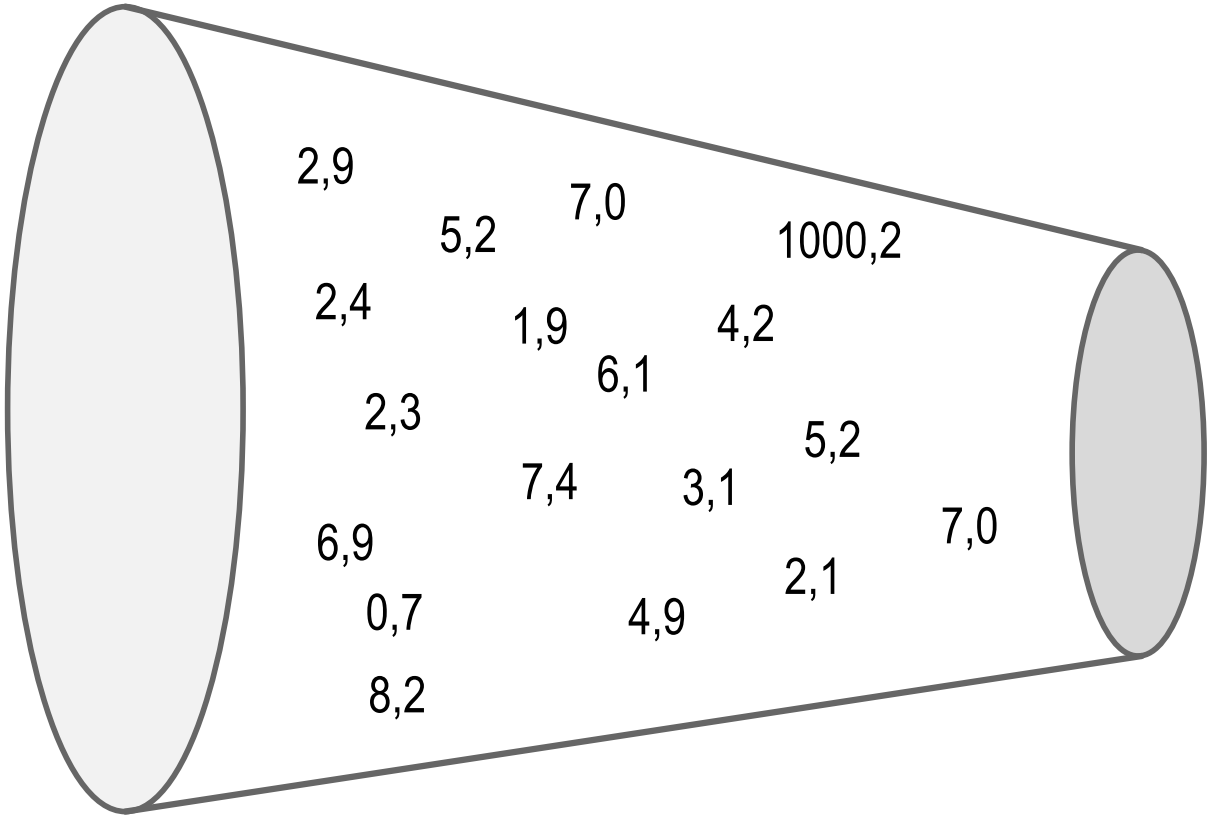
1. Nominal: Gleichheit / Ungleichheit
2. Ordinal: Rangfolge, größer - kleiner
3. Intervall: Gleicher Abstand, Differenzen
4. Verhältnis: Verhältnisse / Quotienten (Nullpunkt vorhanden)

Beispiele:

- Nominal: Farbe, Religion, Geschlecht
- Ordinal: Schulnote, Dienstgrad, Tabellenplatz
- Intervall: Temperatur (°C), Baujahr
- Verhältnis: Gewicht, Einkommen, Preis

Statistische Kenngrößen

- Mit Hilfe statistischer Kenngrößen sollen aus dem unübersichtlichen „Daten-Friedhof“ repräsentative Werte bzgl. der mittleren Lage und Streuung abgeleitet werden.
- Durch diese Datenkomprimierung werden natürlich auch Informationen verloren gehen!



n = 18
$\bar{x}$ = 59,7
$\tilde{x}$ = 4,7
R = 999,5
s = 234,7

Typische Kennwerte von Messgrößen

Bezeichnung	Formel	Erläuterung
Mittelwert	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$	Arithmetisches Mittel der betrachteten Wertegruppe x_i mit den Elementen x_1 bis x_n
Median	$\tilde{x}$	Der mittlere Datenwert einer Datengruppe, von dem aus gleich viele kleinere wie größere Werte existieren.
Spannweite (Range)	$R = x_{max} - x_{min}$	Die Datenspanne ist der Wertebereich zwischen dem größten und kleinsten Datenwert einer Menge.
Varianz	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	Varianz ist die gemittelte Summe der Quadrate der einzelnen Abweichungen vom Mittelwert.

Mittlere Lage

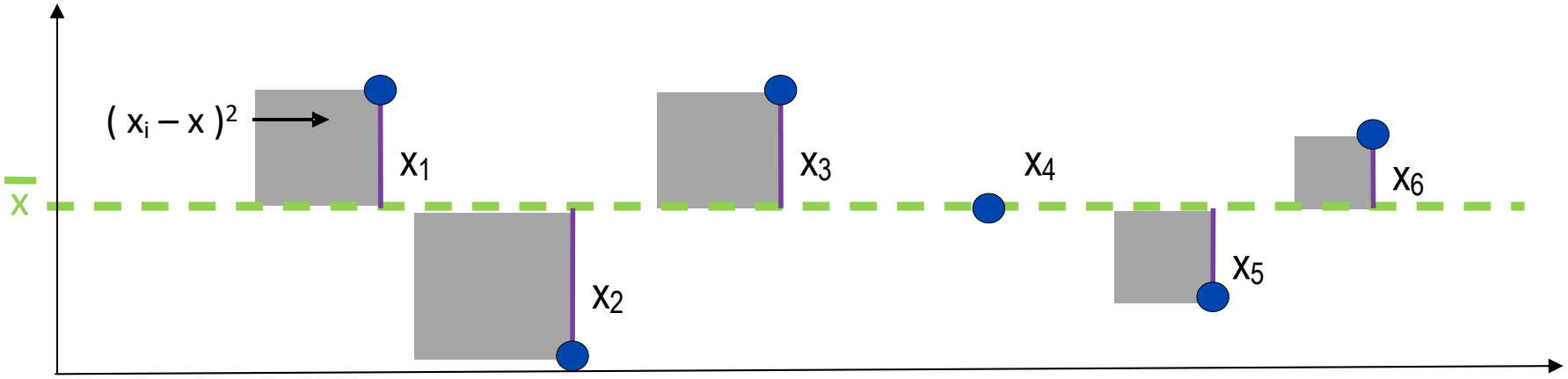
Bezeichnung	Formel	Erläuterung
Arithmetisches Mittel	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$	Basiert auf Summenbildung. Alle Werte werden berücksichtigt. Reagiert stark auf Ausreißer.
Median (Zentralwert)	Wert in der Mitte der geordneten Datenliste (1, 3, 4, 5, **7**, 8, 8, 9, 120)	Es liegen jeweils 50% rechts und links dieses Wertes. Unempfindlich gegen Ausreißer. Absolute Werte der Daten spielen keine Rolle.
Modalwert (häufigster Wert)	Der Wert, der am häufigsten in der Datentabelle auftritt (1, 3, 4, 5, 7, **8**, **8**, 9, 120)	Nur ein Wert wird berücksichtigt. Reagiert nicht auf Ausreißer.

Streuungsparameter

Bezeichnung	Formel	Erläuterung
Mittlere Abweichung	$\frac{\sum_{i=1}^{n} \lvert x_i - \bar{x} \rvert}{n - 1}$	Alle Werte werden berücksichtigt. Reagiert auf Ausreißer.
Mittlere quadratische Abweichung (Varianz)	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	Berücksichtigt Abweichungen stärker als die mittlere Abweichung. Alle Werte werden berücksichtigt. Reagiert auf Ausreißer.
Range	Differenz: Max. - Min.	Nur 2 Werte werden berücksichtigt. Einfach zu berechnen. Reagiert extrem auf Ausreißer.

Berechnung der Standardabweichung

Bezeichnung	Formel	Erläuterung
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	Dieselbe Einheit wie die Messwerte „Üblicher Parameter“. Besondere Rolle bei der Normal-verteilung.



Qualitätskennzahlen

Qualitätskennzahlen

- Yield (Ertrag, Ausbeute)
- First pass Yield
- Y(RTP) Rolled Throughput Yield
- Y (Norm) Normalized Yield
- PPM Parts per million
- DPU Defects per Unit
- DPMO Defects per million opportunities
- OEE Overall equipment effectiveness
- Ausschussgrad
- Nacharbeitsgrad

Qualitätskennzahlen – Teil 1

Yield (Ertrag, Ausbeute)

Yield = (Anzahl fehlerfreier Einheiten / Anzahl Einheiten gesamt).
Entspricht im Deutschen dem Qualitätsgrad.

First pass Yield

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt den ersten Prozessdurchlauf fehlerfrei durchläuft.

Y(RTP) Rolled Throughput Yield

Rolled Throughput Yield ist die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Einheit jeden einzelnen Schritt des gesamten Prozesses fehlerfrei durchläuft. Er wird aus dem Produkt der First pass Yields der einzelnen Prozessschritte berechnet.

Y (Norm) Normalized Yield

Normalized Yield ist das geometrische Mittel des Rolled Troughput Yield (n-te Wurzel, mit n = Anzahl der Prozessschritte).

Qualitätskennzahlen – Teil 2

PPM Parts per million

PPM = (Defekte Teile / Teile gesamt) x 1.000.000
PPM misst die Qualität aus Kundensicht, d. h., ein Teil wird als defekt gezählt, wenn mindestens ein Fehler vorhanden ist.

DPU Defects per Unit

DPU (Defects per Unit) gibt die durchschnittliche Anzahl der Fehler pro Teil an. DPU= (Anzahl Fehler gesamt / Anzahl Einheiten gesamt)

DPMO Defects per million opportunities

DPMO = (Anzahl der Fehler / (Anzahl der verarbeiteten Einheiten x Anzahl der Fehlermöglichkeiten pro Einheiten)) x 1.000.000
Aus dem berechneten DPMO Wert wird aus der untenstehenden Tabelle der entsprechende Sigma Wert ermittelt. Die drei Qualitätskennzahlen DPMO, ppm und DPU ergeben zusammen ein umfassendes Bild der Prozessleistung – es ist durchaus zu empfehlen, alle drei Kennzahlen zu nutzen.

Qualitätskennzahlen – Teil 3

OEE Overall equipment effectiveness

OEE (Overall equipment effectiveness) oder Gesamtanlageneffektivität (GAE) ist eine Kennzahl in der Produktion. Sie definiert den Prozentsatz zu der eine Anlage, in einer vorgegebenen Geschwindigkeit, Qualitätsprodukte produziert. Achtung: Berechnung der OEE nicht einheitlich!

Ausschussgrad

Ausschussgrad = Ausschussmenge / Gesamtmenge

Nacharbeitsgrad

Nacharbeitsgrad = Nacharbeitsmenge / Gesamtmenge

Qualitätskennzahlen – Beispiel (1)

Beispiel Rechnungslegung

Mögliche Fehler:

- Falsche Mengenangabe
- Falscher Einheitspreis
- Rechenfehler (Menge x Preis)
- Falscher Adressat

Geprüft wurden 200 Rechnungen

(10 Rechnungen pro Tag an 20 aufeinanderfolgenden Tagen)

Anzahl gefundener Fehler:

Falsche Mengenangabe	1
Falscher Einheitspreis	2
Rechenfehler (Menge x Preis)	0
Falscher Adressat	1

Anm.: Es waren nur 3 Rechnungen fehlerhaft, da eine Rechnung 2 Fehler aufwies!

Qualitätskennzahlen – Beispiel (2)

Berechnung DPMO

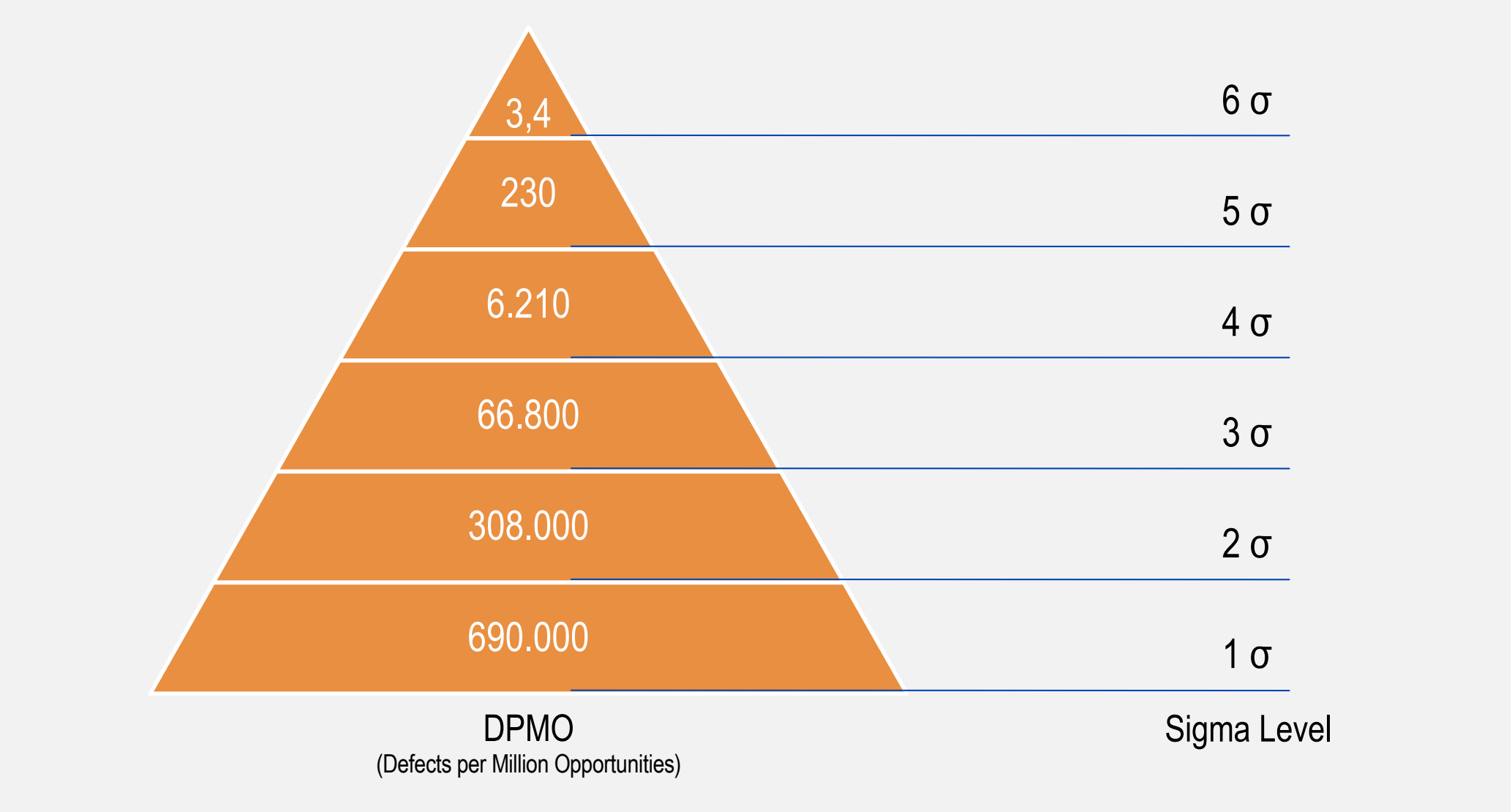
- Anzahl Fehler: D = 1 + 2 + 0 + 1 = 4
- Anzahl der verarbeiteten Einheiten: N = 200
- Anzahl Fehlermöglichkeiten: O = 4

$$DPMO = \frac{D}{N * O} * 1.000.000 = \frac{4}{200 * 4} * 1.000.000 = 5.000$$

$$ppm = \frac{3 \text{ fehlerhafte Rechnungen}}{200 \text{ Rechnungen}} * 1.000.000 = 15.000$$

$$DPU = \frac{4 \text{ Fehler}}{200 \text{ Rechnungen}} = 0.02$$

Sigma Level zu DPMO



Sigma Level zu DPMO & Yield

Sigma Level	DPMO	fehlerhaft %	fehlerfrei %	Kurzfristiger C_{pk}	Langfristiger C_{pk}
1	691.462	69 %	31 %	0,33	–0,17
2	308.538	31 %	69 %	0,67	0,17
3	66.807	6,7 %	93,3 %	1,00	0,5
4	6.210	0,62 %	99,38 %	1,33	0,83
5	233	0,023 %	99,977 %	1,67	1,17
6	3,4	0,00034 %	99,99966 %	2,00	1,5
7	0,019	0,0000019 %	99,9999981 %	2,33	1,83

Das Histogramm: Datenverteilungen visualisieren

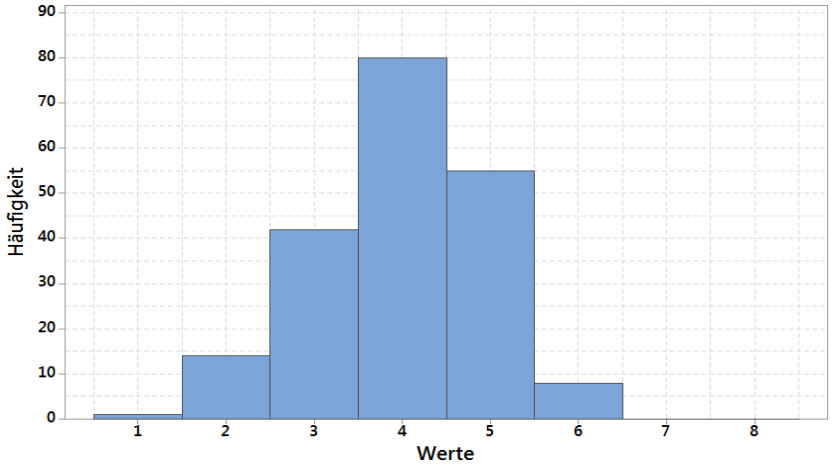
Um was geht es?

Aus einem unübersichtlichen „Datenfriedhof“ werden die Daten grafisch als Häufigkeitsverteilung in Klassen dargestellt. Dadurch lassen sich auf einen Blick die **mittlere Situation**, die **Streuung** der Daten und eventuelle **Ausreißer** erkennen.

Die Säulenhöhe entspricht dabei der Anzahl der gefundenen Daten in der zugehörigen Datenklasse.

Wann soll man das Histogramm anwenden?

- Immer dann, wenn größere Datenmengen (n > 20) vorliegen, die man darstellen möchte.
- Es sind dadurch erste Rückschlüsse auf die Ursachen der Datenverteilung möglich.



Interpretation:

- Eingipflige, symmetrische Verteilung
- Mittlere Lage bei etwa 4
- Range von etwa 1 bis 6

Histogramm: Regeln für die Klasseneinteilung

1. Gleiche Klassenbreite
2. Anzahl k der Klassen i.d.R. zwischen 6 und 30

$$k = \sqrt{n} \qquad (Faustregel)$$

3. Klassen dürfen nicht überlappen.
4. Klassenbreite berechnet sich aus der Anzahl Klassen und der Spannweite.
5. Auf „sinnvolle“ Klassenbreite und Min / Max runden.

Die y-Achse kann i.d.R. entweder:

- **absolut** (Balkenhöhe entspricht der tatsächlichen Anzahl der Daten in der Klasse) oder
- **relativ** (Balkenhöhe entspricht dem Prozentsatz der Daten der Klasse bezogen auf die gesamte Anzahl der Daten) angegeben werden.

Beispiel: 100 erwachsene Männer

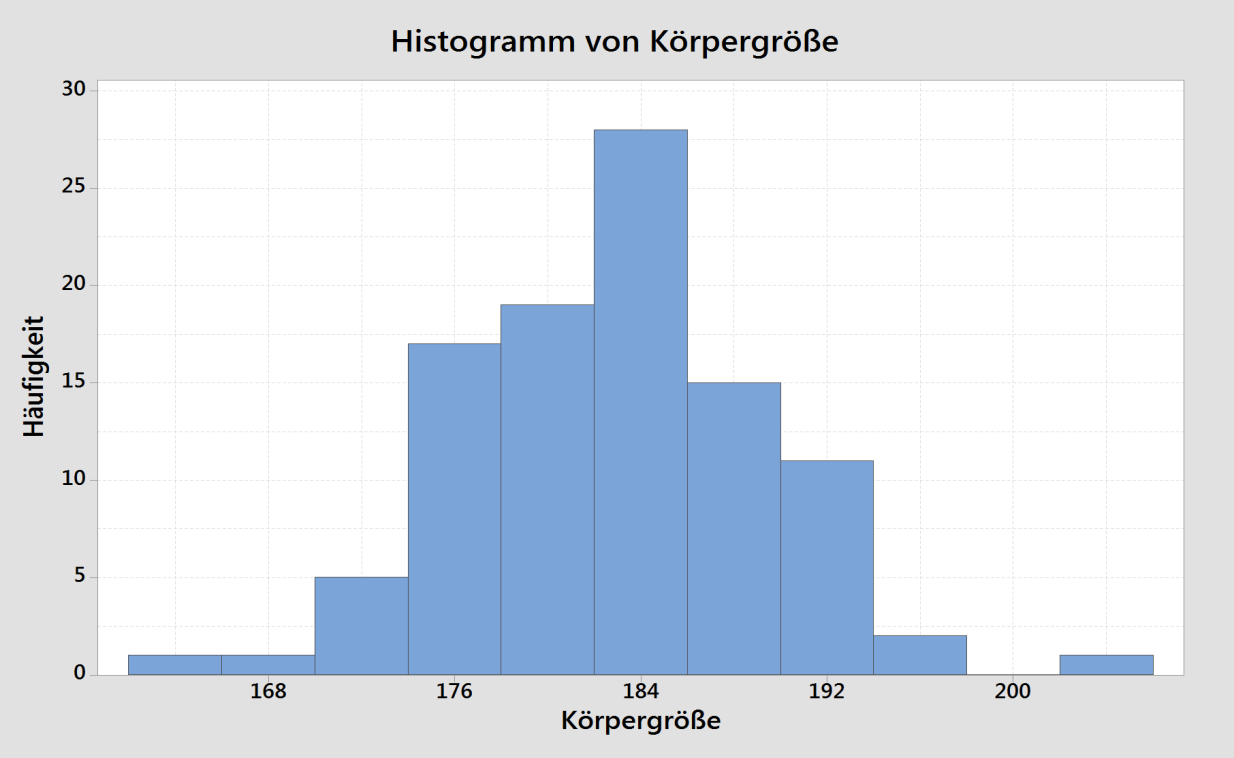
Basis: 100 Messwerte (Körpergrößen von 100 Männern in cm)

- Um die richtige **Anzahl der Klassen** zu finden, wird zuerst der kleinste und größte Wert der Tabelle gesucht (Range):
- Min = 157 cm Max = 199 cm → Range = (Max – Min) = 42 cm
- Es gilt die Faustregel für die optimale Anzahl der Klassen (k):
  k = Wurzel (n), wobei n die Anzahl der Messwerte ist (hier n =100)
- Mit Wurzel (100) = 10 sollte man also etwa 10 Klassen benutzen, die den gesamten Range von 42 cm abdecken, damit ergibt sich eine Klassenbreite von:

Klassenbreite
= Range / Anzahl Klassen = 42 cm / 10 = 4,2 cm pro Klasse
→ 4 cm / Klasse, damit benötigt man 11 Klassen.

Histogramm: 100 erwachsene Männer

Basis: 100 Messwerte (Körpergrößen von 100 erwachsenen Männern in cm)



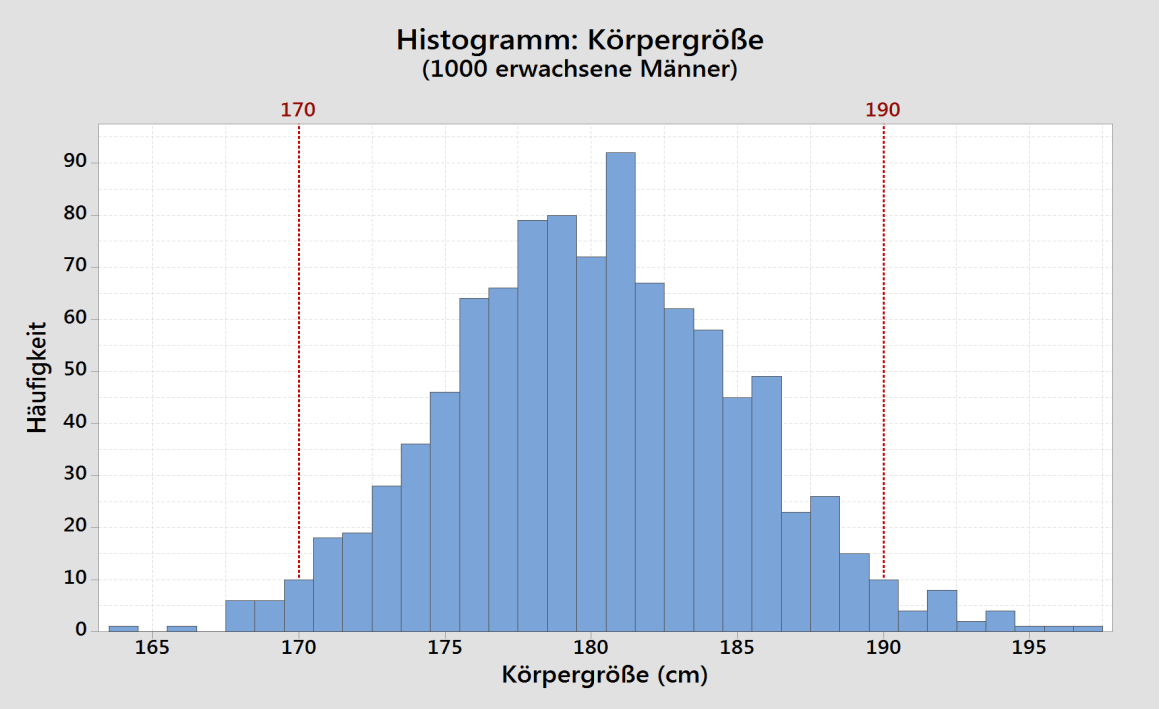
Interpretation:

- Eingipflige Verteilung
- Mittlere Lage bei etwa 184cm
- Range etwa von 164cm bis 204cm

Histogramm mit Toleranzgrenzen

Interpretation:

- Eingipflige, symmetrische Verteilung (ähnelt dem Querschnitt einer Glocke)
- Mittlere Lage bei etwa 180 cm
- Range von 164 cm bis 197 cm
- Einzelne Ausreißer kleiner 168 cm
- Die Streuung ist so groß, dass die Toleranzgrenzen (bei 170 cm und 190 cm) zu ca. 5% über- bzw. unterschritten werden.

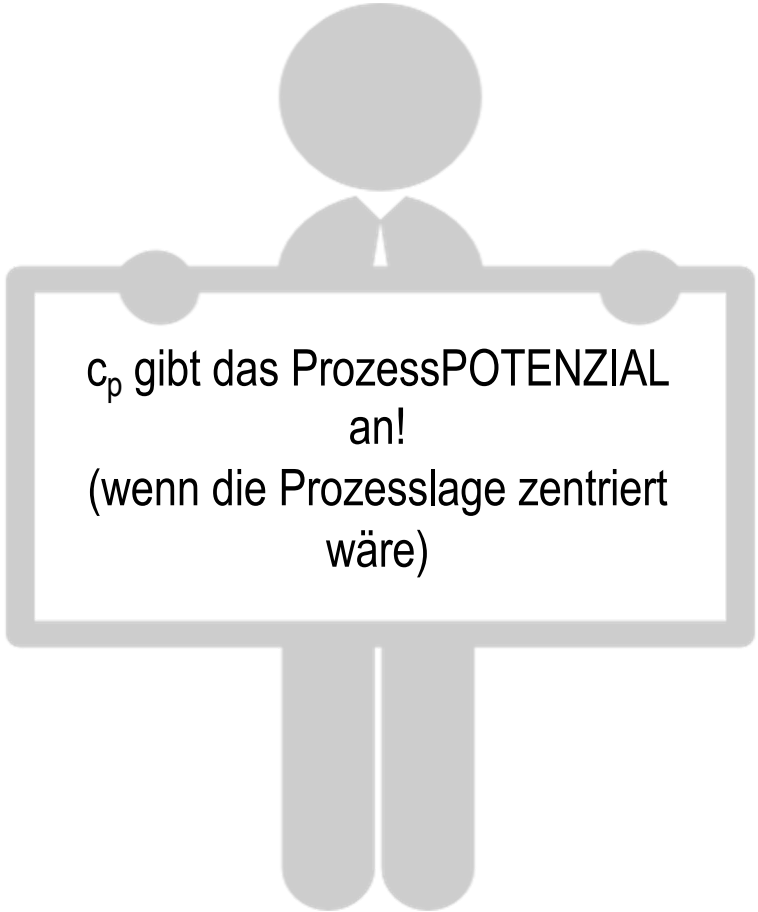


Berechnung des ProzessPOTENZIAL-Index

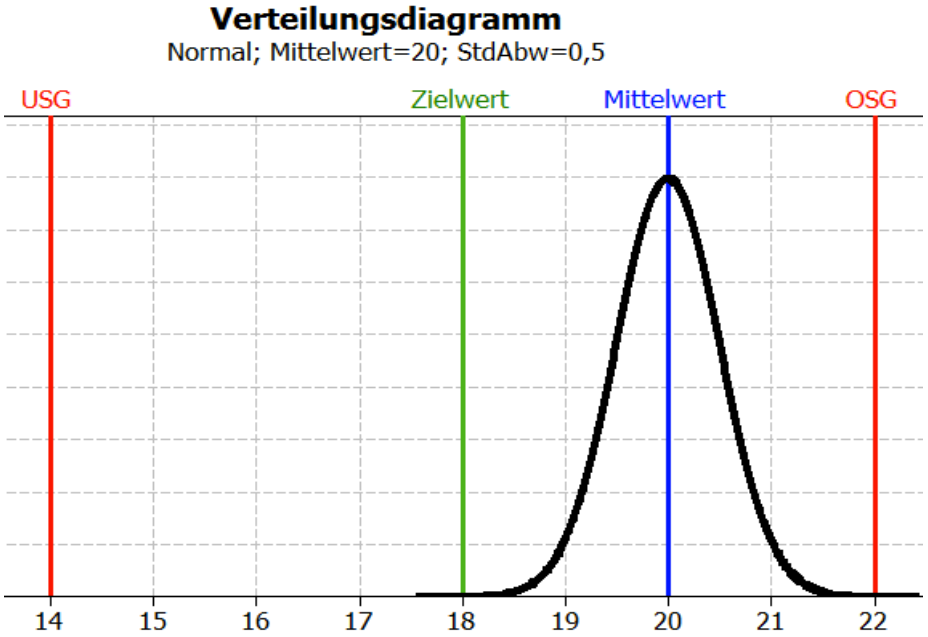
$$c_p = \frac{OSG - USG}{6\ s}$$

OSG = Obere Spezifikationsgrenze
USG = Untere Spezifikationsgrenze
s = Standardabweichung der Stichprobe

- Der c_p Wert ist das Verhältnis der Toleranz T zum 6 fachen der Standardabweichung s
- Gilt nur bei normalverteilten Daten



Berechnung des ProzessFÄHIGKEITS-Index



$$c_{pk} = MIN\left[\frac{OSG - \bar{x}}{3\,s}\,;\,\frac{\bar{x} - USG}{3\,s}\right]$$

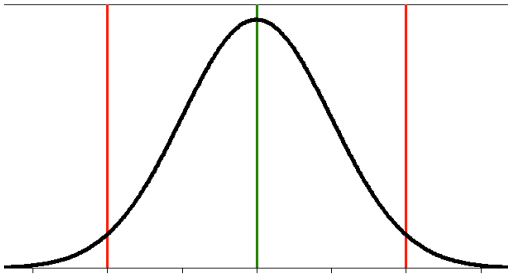
OSG = Obere Spezifikationsgrenze
USG = Untere Spezifikationsgrenze
s = Standardabweichung der Stichprobe
$\bar{x}$ = Mittelwert der Stichprobe

- Der c_{pk} Wert berücksichtigt im Gegensatz zum c_p Wert eine Mittelwertverschiebung gegenüber dem Zielwert.
- Bei $c_{pk} = c_p$ so ist die Prozesslage optimal zentriert, es gilt: $c_{pk} \leq c_p$
- Gilt nur bei normalverteilten Daten

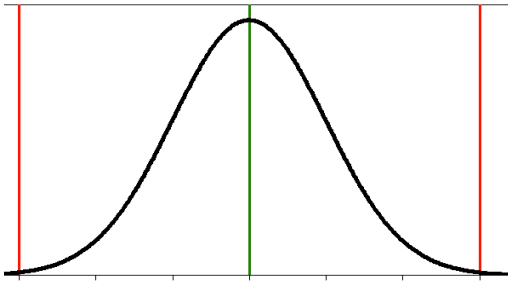
Anforderungen an den PROZESSFÄHIGKEITS-Index

c_{pk}	PPM	Sigma Level
0,50	133614	
0,67	44431	2σ
0,75	24449	
0,90	6934	
1,00	2700	3σ
1,30	96	
1,33	66	4σ
1,40	27	
1,50	7	
1,60	1,6	
1,67	0,5	5σ
2,00	0,002	6σ

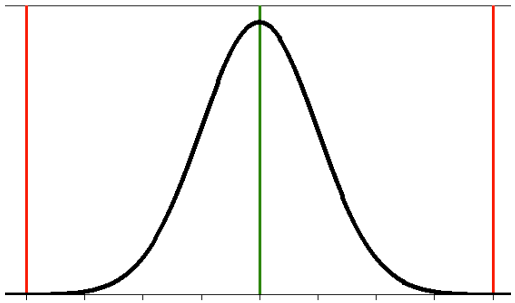
Gilt nur bei normalverteilten Daten



c_{pk} < 1,00
Prozess nicht fähig



c_{pk} 1,00 – 1,33
Prozess bedingt fähig



c_{pk} > 1,33
Prozess fähig,
Standardanforderung
der Industrie