

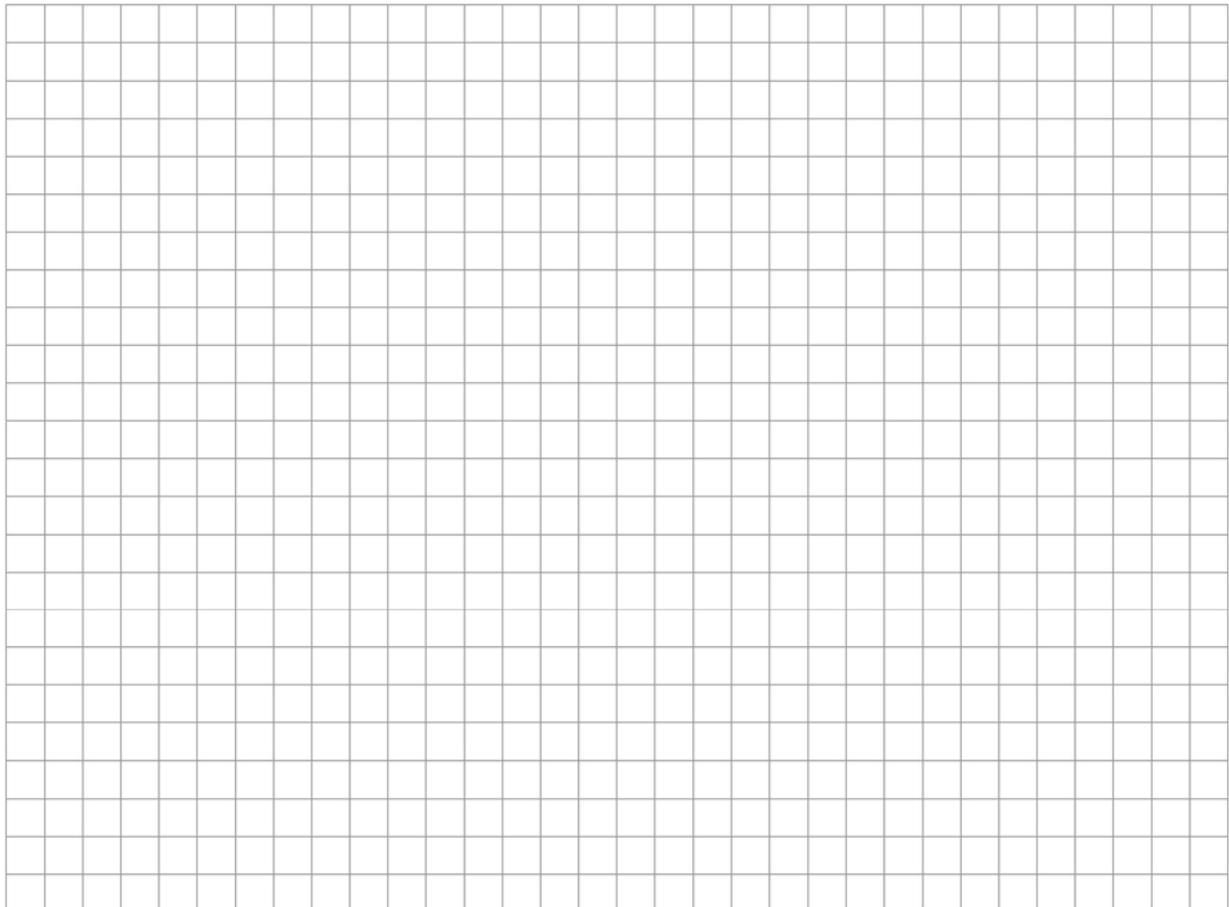


MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools – APQP, PPAP/PPF, FMEA, MSA, SPC

Dipl.-Ing. Michael Cassel

Stand: E



Core Tools

Core Tools Road Map: PLP



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Prozessfähigkeit



Maschinen- und Prozessfähigkeit Cpk & Co



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Grundlegende Begriffe (1)



- **Qualität**
Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objektes Anforderungen erfüllt
(DIN EN ISO 9000:2015) Anmerk.: inhärent = verbunden, anhaftend
- **Merkmal**
Kennzeichnende Eigenschaft (DIN EN ISO 9000:2015)
- **Grenzwert**
Mindestwert oder Höchstwert (DIN 55 350 Teil 12 2.5)
(Kleinster / größter zugelassener Wert eines quantitativen Merkmals)
- **Toleranz**
Höchstwert minus Mindestwert, und auch höchste Grenzabweichung minus untere Grenzabweichung (DIN 55 350 Teil 12 2.7)
Grenzabweichung: Höchstwert / Mindestwert minus Bezugswert.
- **Nichtkonformität (Fehler)**
Nichterfüllung einer Anforderung (DIN EN ISO 9000:2015)

5



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Ziel von Fähigkeitsuntersuchungen



Durch Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen soll die Qualität von Produkten und Fertigungsprozessen sichergestellt werden

Untersuchung der "besonderen Merkmale"

- kritische Merkmale – „CC“:
 - Sicherheitsrelevante Merkmale bzw. gesetzliche Anforderungen
- wichtige Merkmale – „SC“:
 - Funktion des Produkts bzw. wesentliche Prozessparameter

Ziel: Sicherstellung der Funktionsfähigkeit (und ggf. -sicherheit) und / oder Montierbarkeit und / oder Handhabbarkeit

Mittel: Grenzwerte / Toleranzen



Core Tools

Ziel von Fähigkeitsuntersuchungen



Maschinen- / Prozessfähigkeit:

- Inwieweit ist die Maschine / der Prozess fähig, für besondere Merkmale die Vorgaben zu erfüllen

- d. h. mit anderen Worten:
- Wie sicher werden die Grenzwerte für besondere Merkmale eingehalten (unter Berücksichtigung von Verteilungsform, Lage und Streuung der Merkmalswerte)



Core Tools

Ziel von Fähigkeitsuntersuchungen



Fähigkeitsuntersuchung vor / während der Serien-Produktion:

- vorher:
 - Sicherstellung der Fähigkeit von Maschinen und Fertigungseinrichtungen
 - Sicherstellung der Fähigkeit von Prüfeinrichtungen
 - Untersuchung der Prozesssicherheit vor Produktionsbeginn (z. B. während der Nullserie)
- während:
 - dauerhafte Überwachung der Fertigungsprozesse und der Produktqualität
 - Analyse der Fertigungsprozesse (Untersuchung auf Trends, Mittelwertsprünge, Verteilungsformen usw.)
 - Erbringung des statistischen Nachweises, dass ppm-Qualität gefertigt wird

8



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Ziel von Fähigkeitsuntersuchungen



Messsystemanalyse:

- Sicherstellung, dass die Prüfmittel geeignet sind, bestimmte (besondere) Merkmale zu messen. Kriterien:
 - Messabweichungen
 - Wiederholpräzision
 - Vergleichspräzision



Core Tools

Statistische Auswertung von Merkmalswerten



Charakteristika einer Verteilung von Merkmalswerten:

- Form
- Lage
- Streubreite



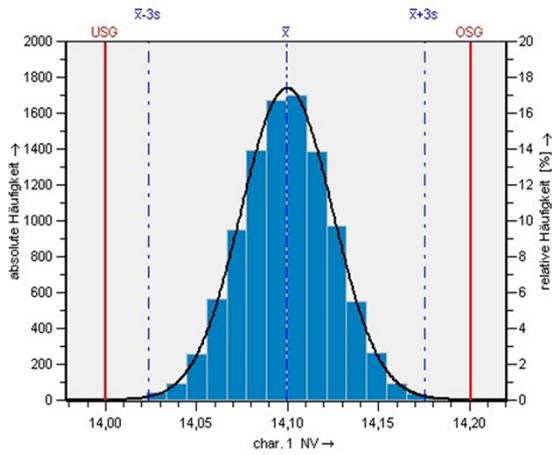
MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

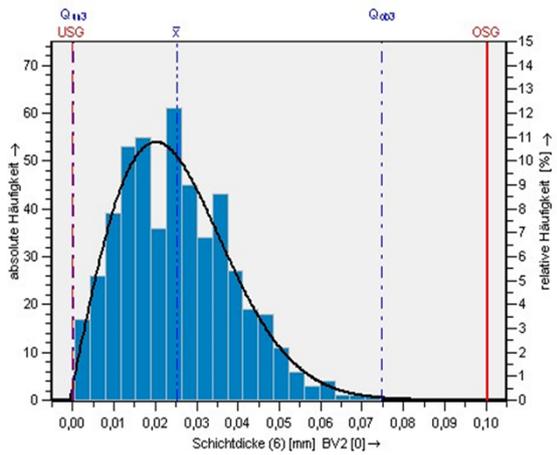
Statistische Auswertung von Merkmalswerten



Form: symmetrische Verteilung



Form: schiefe Verteilung



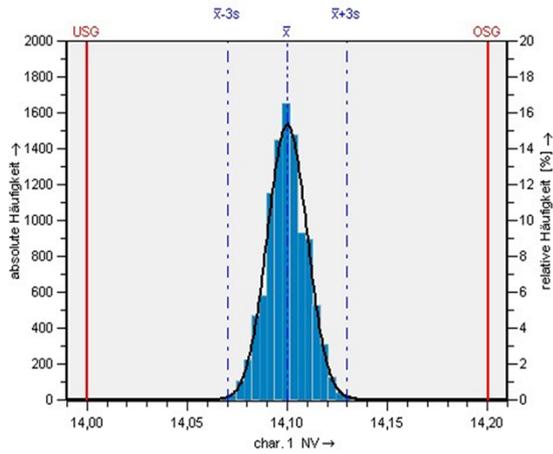
MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

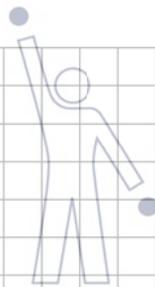
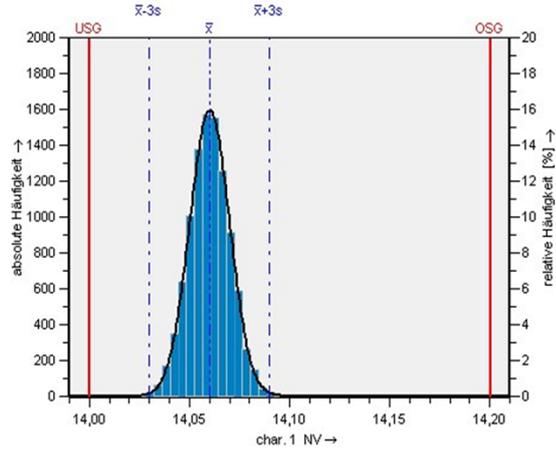
Statistische Auswertung von Merkmalswerten



**Lage: mittig
(bezogen auf die Grenzwerte)**



**Lage: außermittig
(bezogen auf die Grenzwerte)**

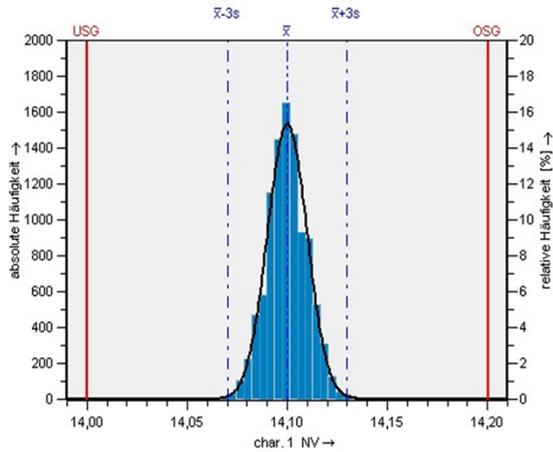


Core Tools

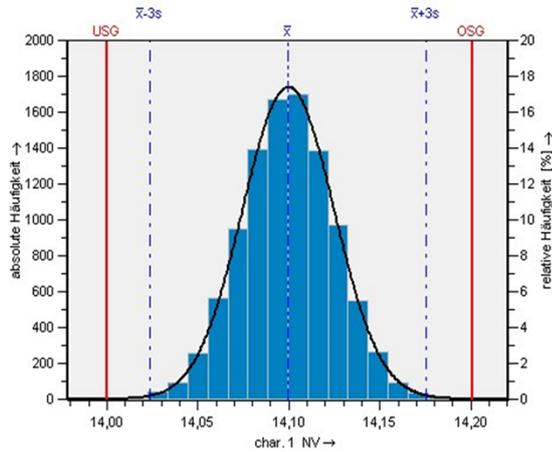
Statistische Auswertung von Merkmalswerten



Streuung: klein



Streuung: groß



Core Tools

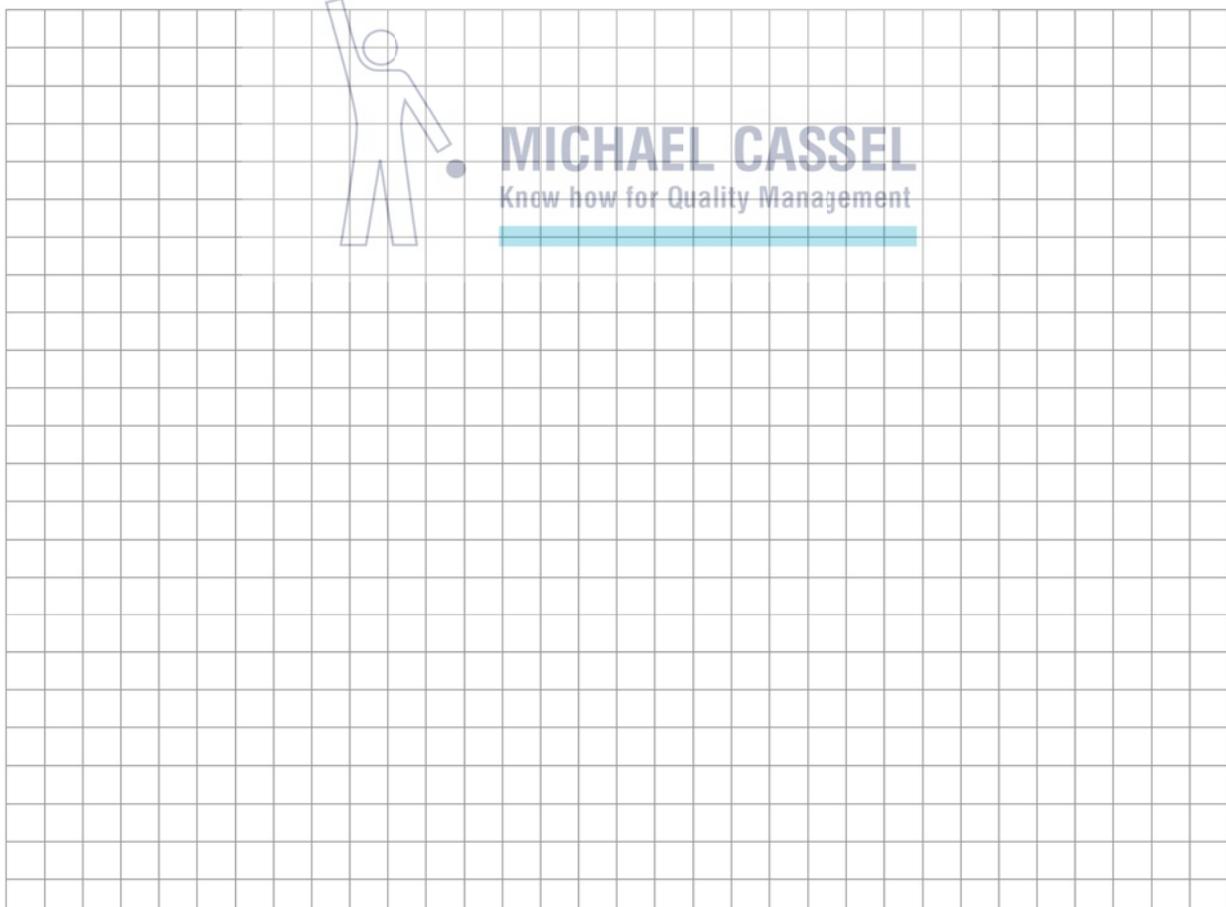
Statistische Auswertung von Merkmalswerten



Verteilungen

- Häufigkeitsverteilung:
 - Verteilung der tatsächlichen (Stichproben-) Merkmalswerte (häufig dargestellt als Histogramm)
- Wahrscheinlichkeitsverteilung:
 - Mathematisches, d.h. theoretisches Modell (Funktion $f(x)$) zur Beschreibung einer Verteilung von Merkmalswerten

Zweck: Ermittlung von Überschreitungsanteilen

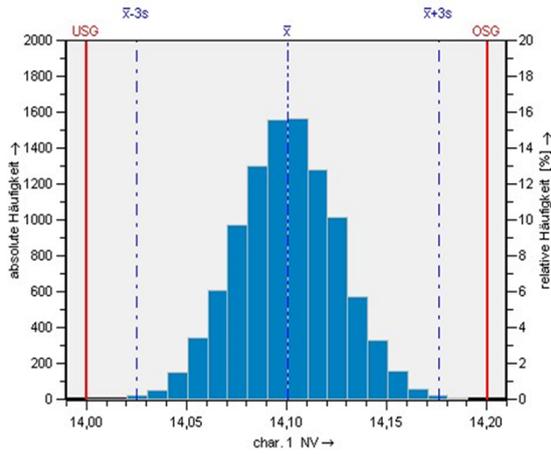


Core Tools

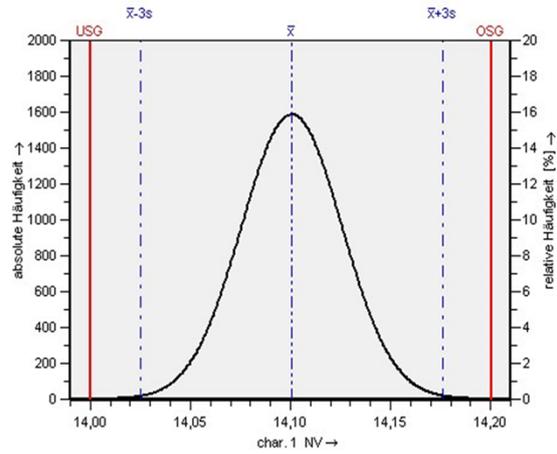
Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilung



Häufigkeitsverteilung



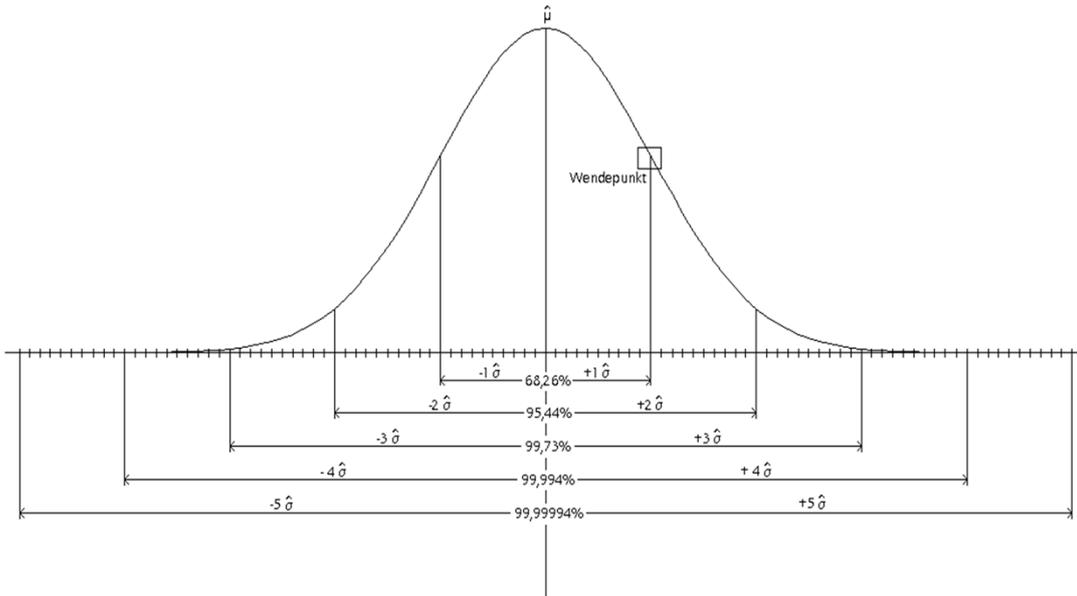
Wahrscheinlichkeitsverteilung



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Prozentsätze der Normalverteilung



MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Fähigkeitsindizes



Arten von Fähigkeitsuntersuchungen:

- Maschinenfähigkeit c_m / c_{mk}
 - Kurzzeituntersuchung mit mindestens $n = 100$ Teilen in Folge zur Ermittlung der Fähigkeit einer Maschinenkomponente / zur Maschinenabnahme
- Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung p_p / p_{pk}
 - Kurzzeituntersuchung anhand von m Stichproben (mit z.B. $n=5$ Teilen) mit mindestens $m*n = 100$ Teilen zur Ermittlung der Prozessfähigkeit über einen kürzeren Zeitraum, z.B. bei einer Vorserie.
- Fortdauernde Prozesssicherheit c_p / c_{pk}
 - Langzeituntersuchung anhand von Stichproben zur Ermittlung der Prozessfähigkeit über einen längeren Zeitraum während der Serienproduktion (ältere FORD-Festlegung: mindestens 20 Produktionstage). Im Untersuchungszeitraum sollten alle Prozesseinflüsse eingewirkt haben.

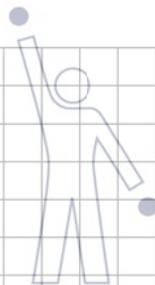
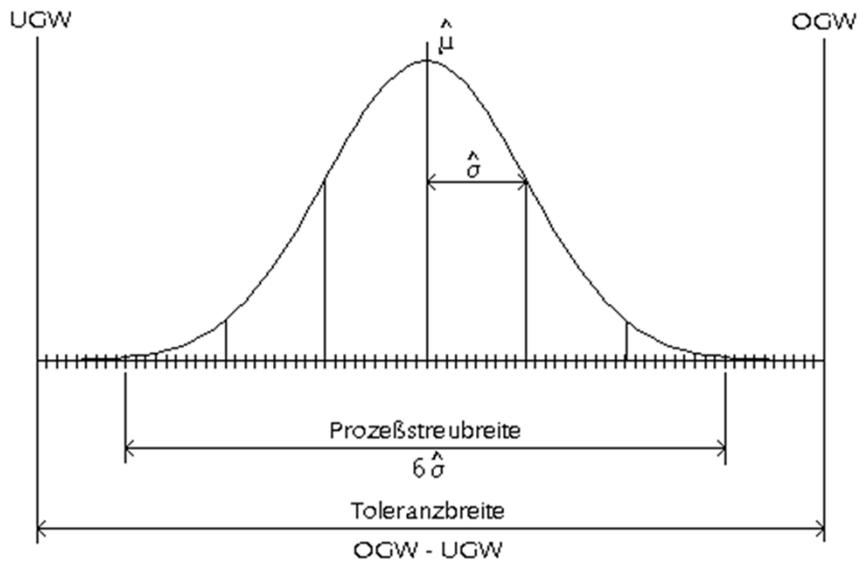


Core Tools

Fähigkeitsindizes

C_m, P_p, C_p

$$C_p = \frac{OGW - UGW}{6 \cdot \hat{\sigma}}$$



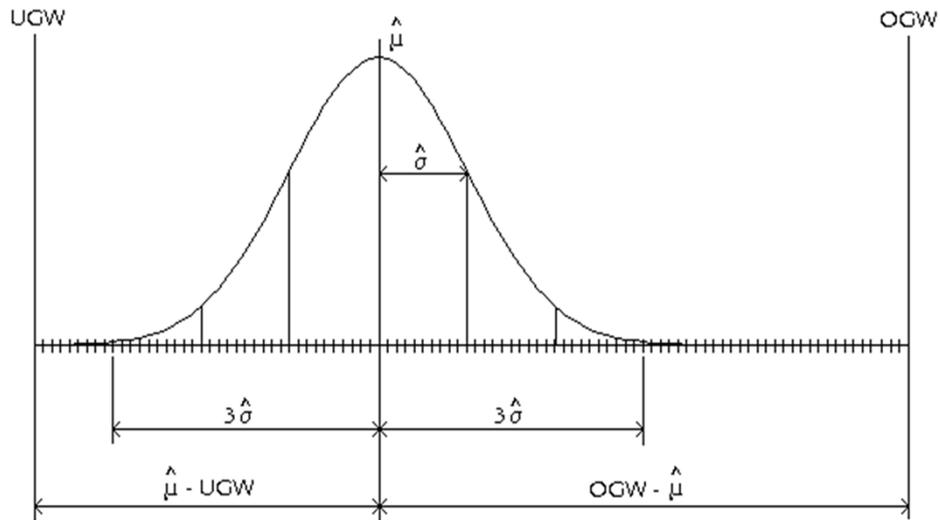
Core Tools

Fähigkeitsindizes



C_{mk} , P_{pk} , C_{pk}

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{3 \cdot \hat{\sigma}}; \frac{\hat{\mu} - UGW}{3 \cdot \hat{\sigma}} \right\}$$



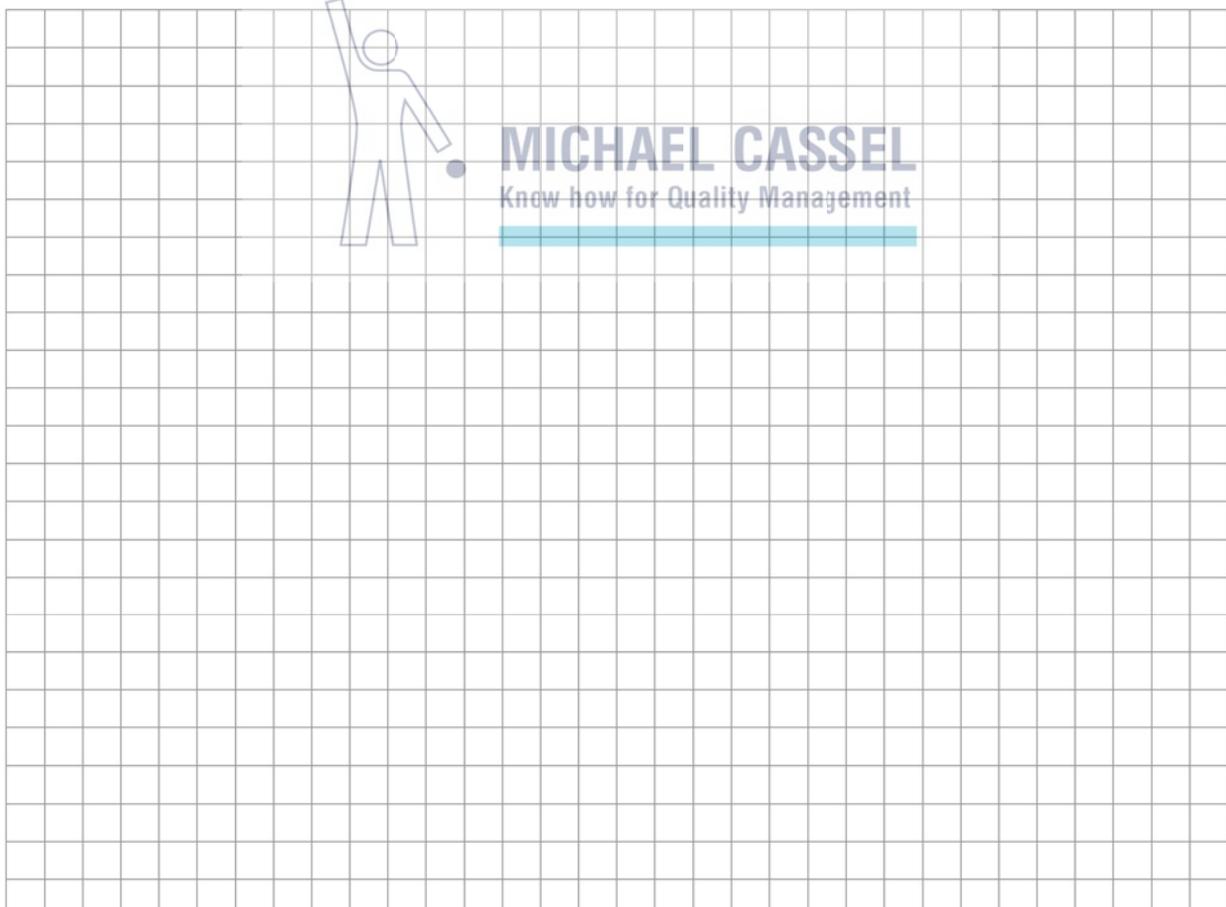
MICHAEL CASSEL
Know how for Quality Management

Core Tools

Fähigkeitsindizes



$\pm \hat{\sigma}$	C_p / C_{pk}	Anteil innerhalb der Grenzwerte	Überschreitungsanteile	ppm-Rate
$\pm 1 \hat{\sigma}$	0,33	68,27 %	31,73 %	317.311 ppm
$\pm 2 \hat{\sigma}$	0,67	95,45 %	4,55 %	45.500 ppm
$\pm 3 \hat{\sigma}$	1,00	99,73 %	0,27 %	2.700 ppm
$\pm 4 \hat{\sigma}$	1,33	99,994 %	0,006 %	63 ppm
$\pm 5 \hat{\sigma}$	1,67	99,999.94 %	0,000.06 %	0,6 ppm



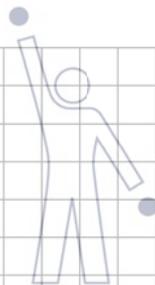
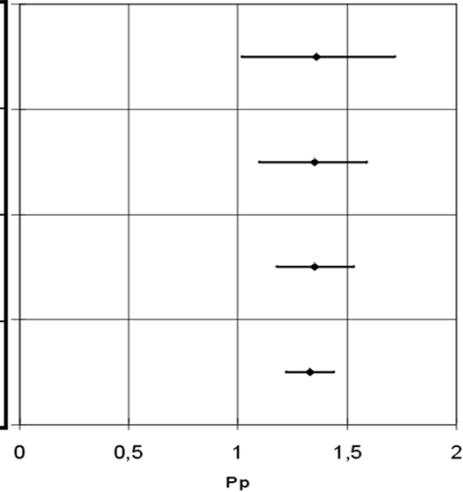
Core Tools

Vertrauensbereiche



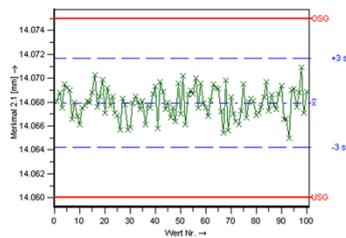
Vertrauensbereiche für p_p und p_{pk} normalverteilter Stichproben (P=95%)

n	p_p	p_{pk}
50	$1,02 \leq \mathbf{1,36} \leq 1,72$	$0,94 \leq \mathbf{1,30} \leq 1,66$
100	$1,10 \leq \mathbf{1,35} \leq 1,59$	$1,06 \leq \mathbf{1,32} \leq 1,58$
200	$1,18 \leq \mathbf{1,35} \leq 1,53$	$1,14 \leq \mathbf{1,33} \leq 1,51$
500	$1,22 \leq \mathbf{1,33} \leq 1,44$	$1,20 \leq \mathbf{1,31} \leq 1,42$

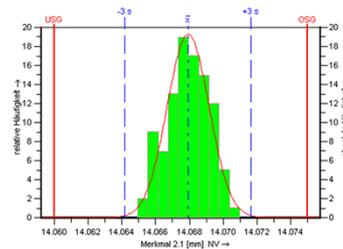


Core Tools

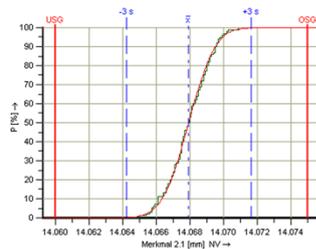
Grafische Darstellungen



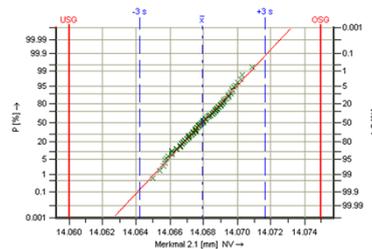
Werte Verlauf



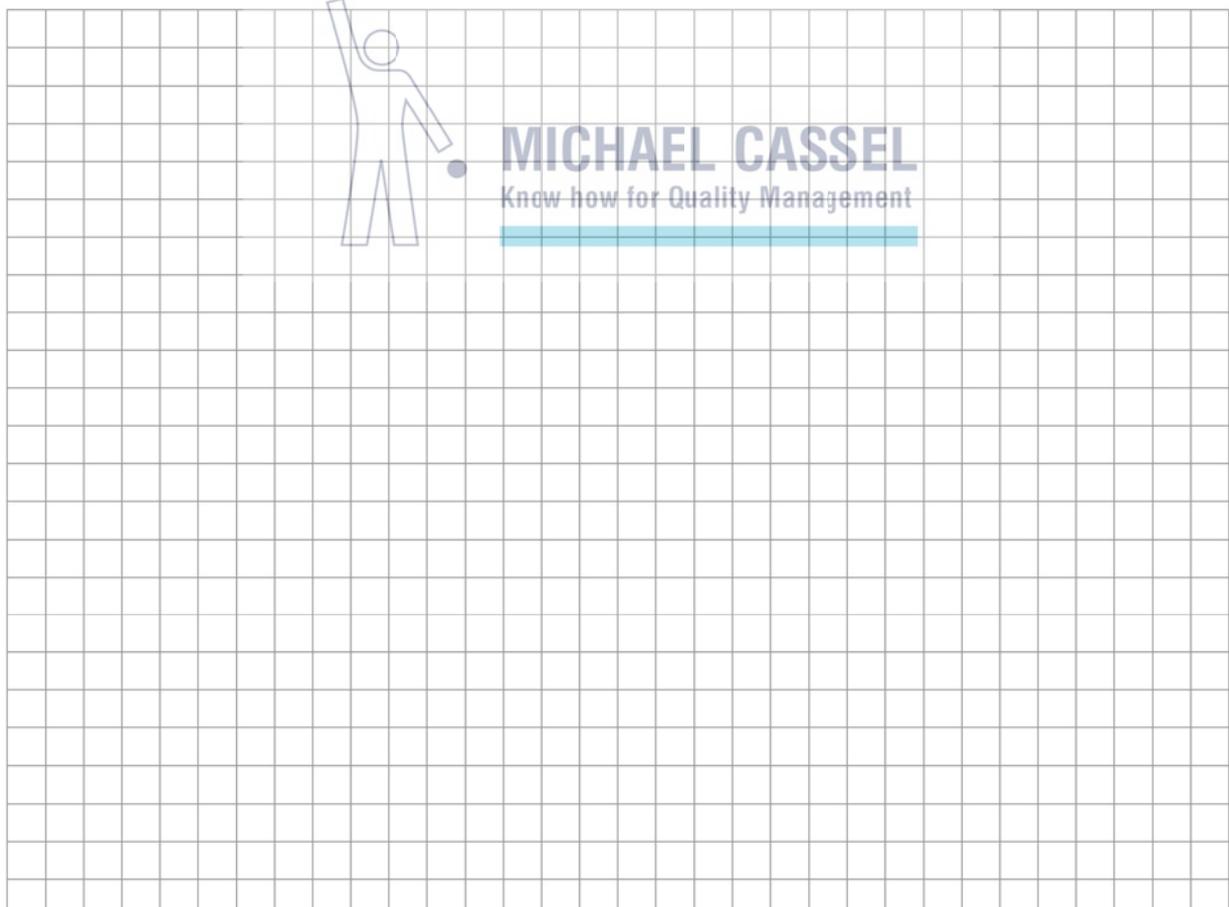
Histogramm



Summenlinie

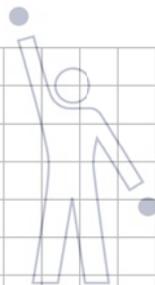
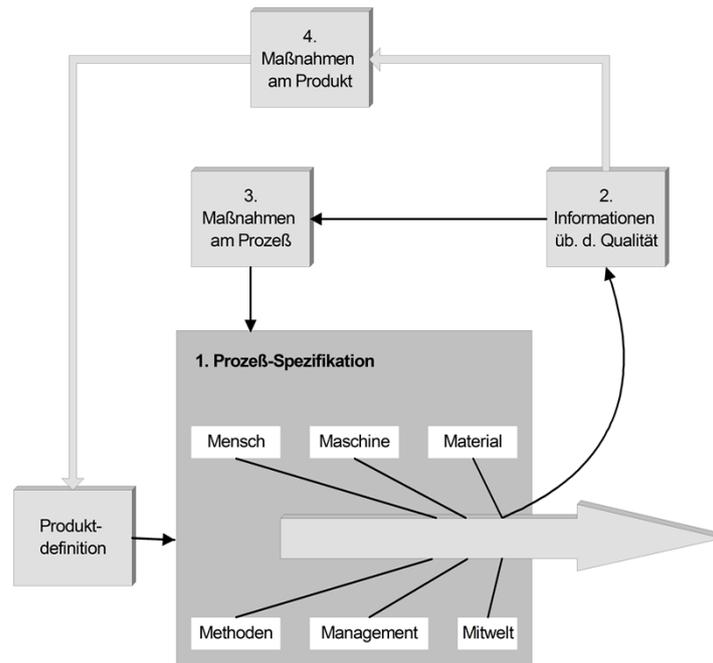


Wahrscheinlichkeitsnetz



Core Tools

System der Prozess-Sicherung



Core Tools

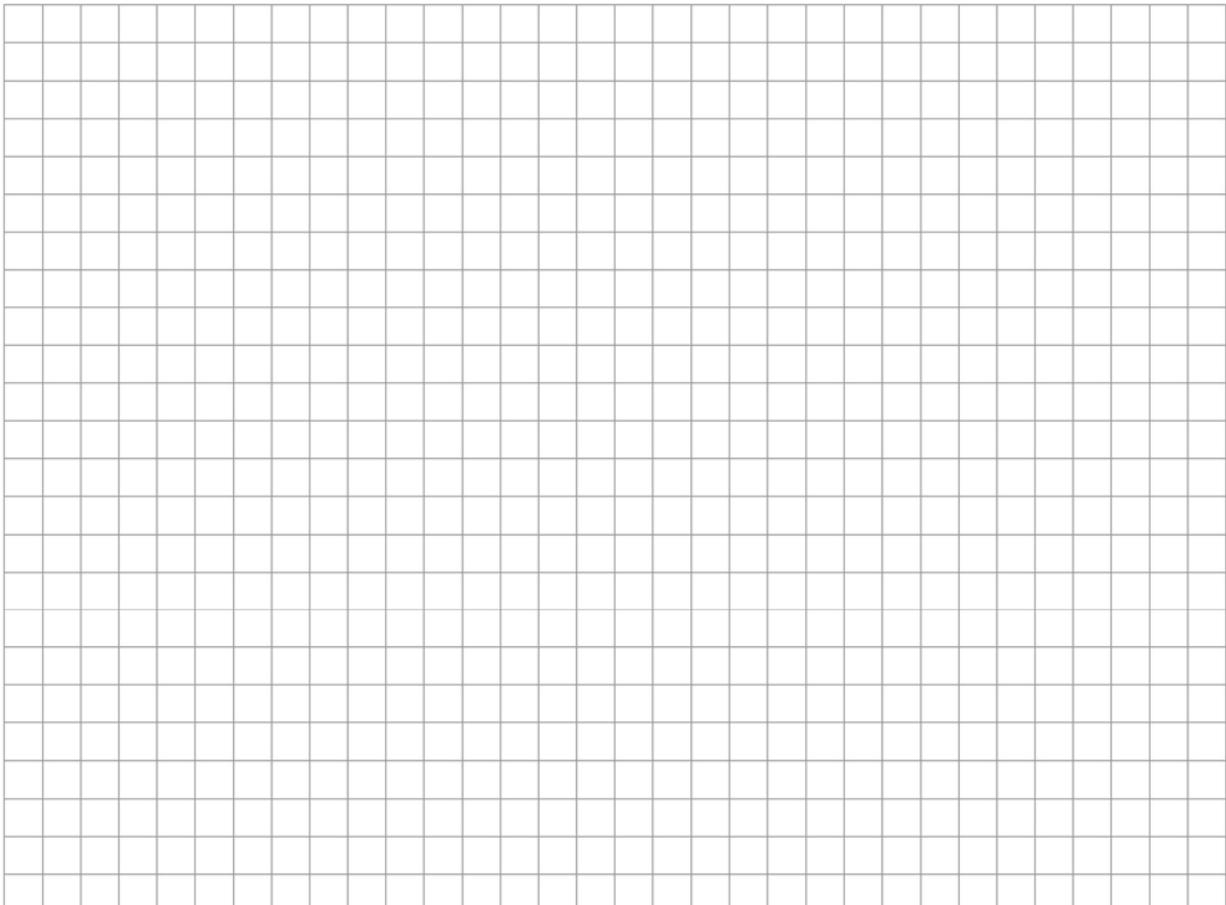
Statistische Prozessüberwachung



Vorteile der statistischen Prozessüberwachung:

- Wirtschaftlichkeit durch Stichproben
- Möglichkeit der Steuerung des Fertigungsprozesses bzw. des frühzeitigen Eingreifens
- Möglichkeit des Nachweises von ppm-Qualität

Anmerkung: Fehlervermeidung lässt sich nur mit messender ("quantitativer") Prüfung realisieren



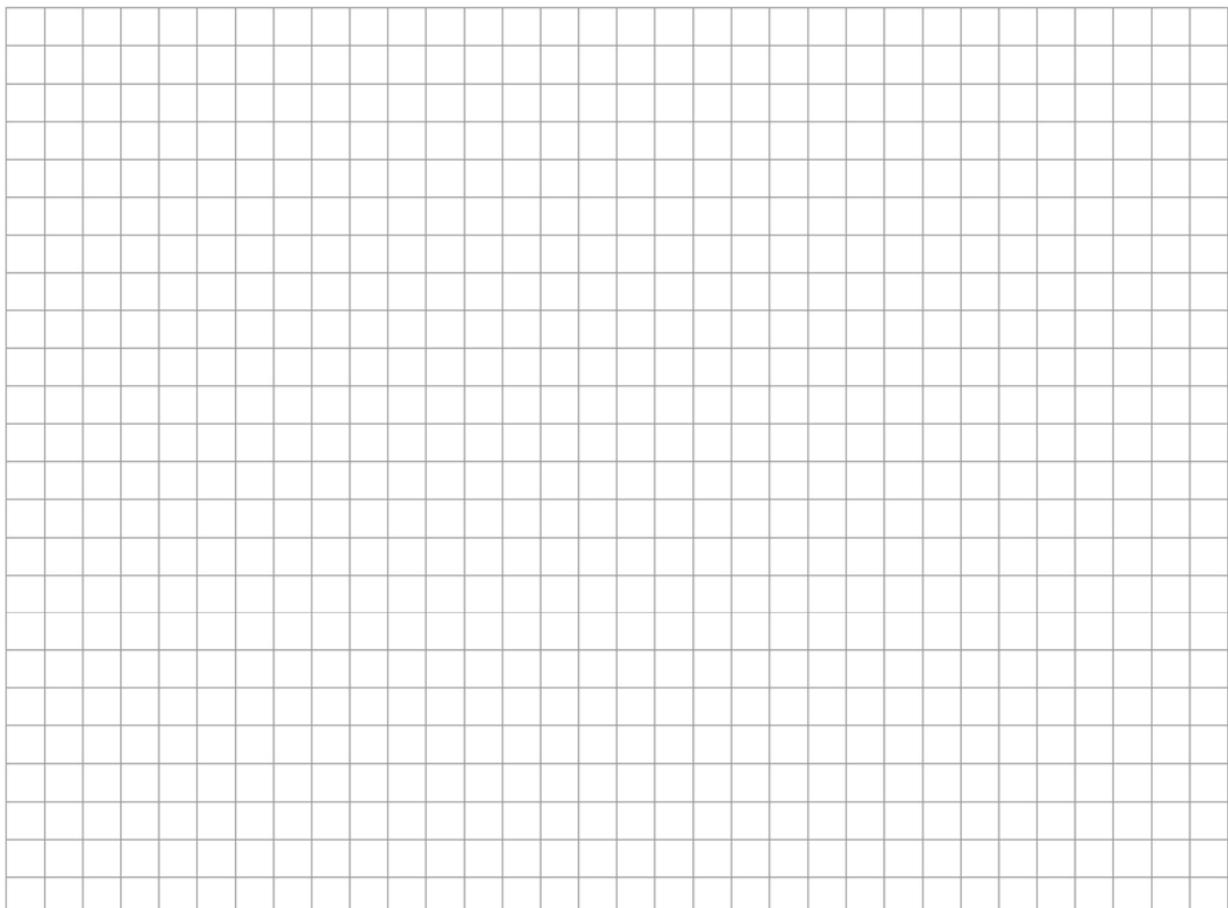
Core Tools

Statistische Prozessüberwachung



Prozesseinflüsse

- Zufällige Streuung
 - Viele kleine Ursachen
 - Stabil
 - Vorhersehbar
 - Ständig vorhanden - wenn keine Maßnahmen ergriffen werden
- Systematische Abweichungen
 - Eine oder wenige große Ursachen
 - Können unregelmäßig sein
 - Nicht vorhersehbar
 - Können wieder auftreten - wenn keine Maßnahmen ergriffen werden



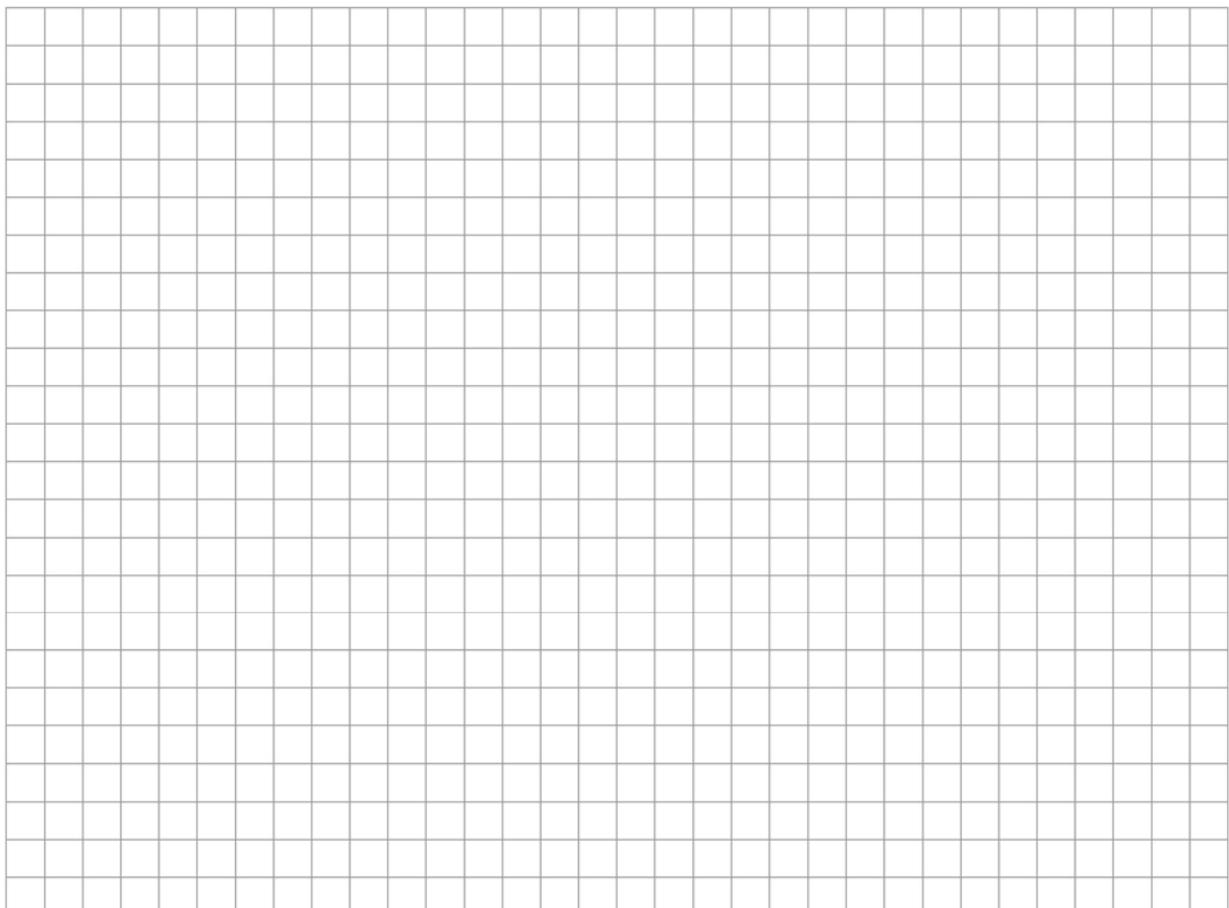
Core Tools

Statistische Prozessüberwachung



Grundprinzip der Shewhart-Qualitätsregelkarte:

- Feststellen der Ist-Zustands in der Vorserie
 - Lage
 - Streuung
 - (Verteilungsform)
 - Vorläufige Prozessfähigkeit



Core Tools

Statistische Prozessüberwachung



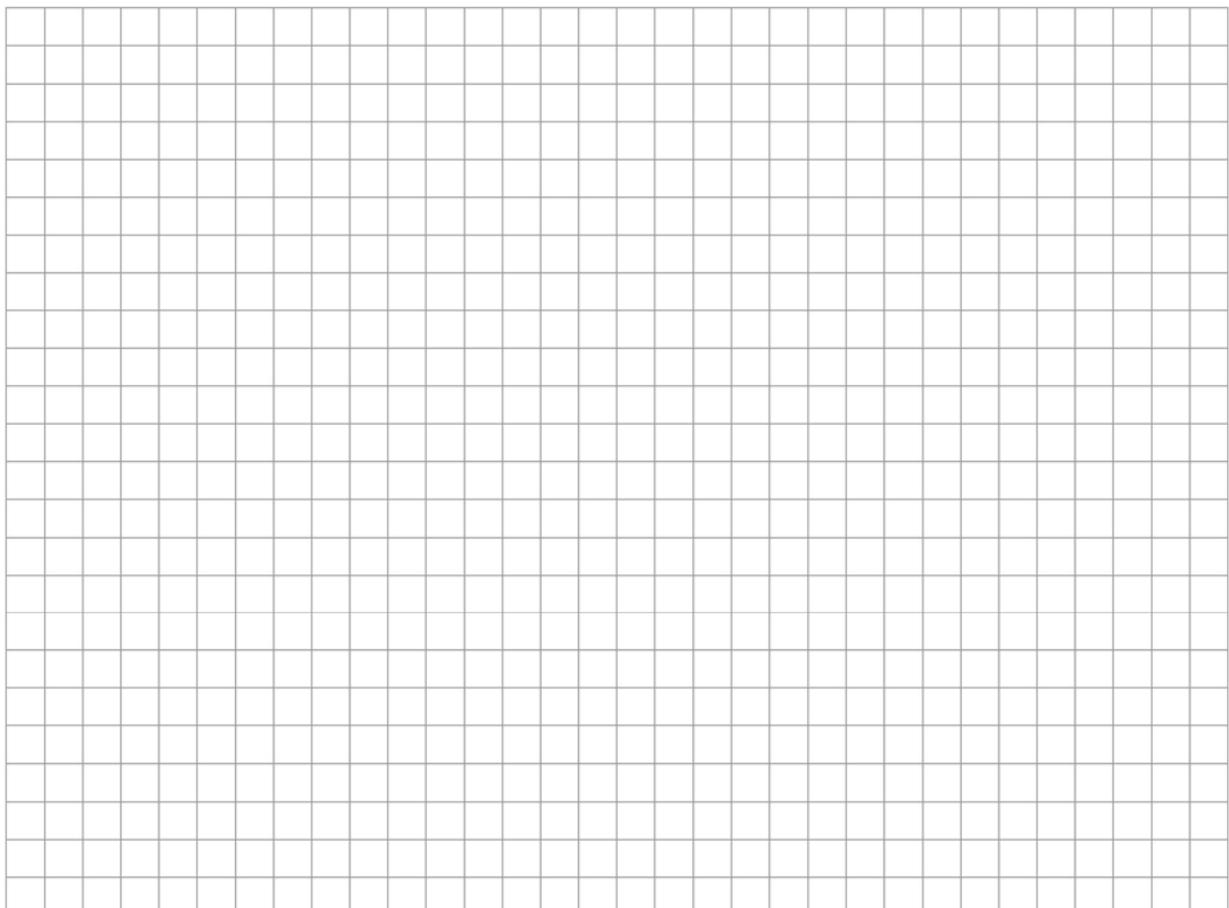
Überwachung während der Serienfertigung:

- Lage
- Streuung
- Stabilität / Prozess-Beherrschung
- Fähigkeit (Streuung und Lage bezogen auf die Grenzwerte)

Stabilitätskriterien:

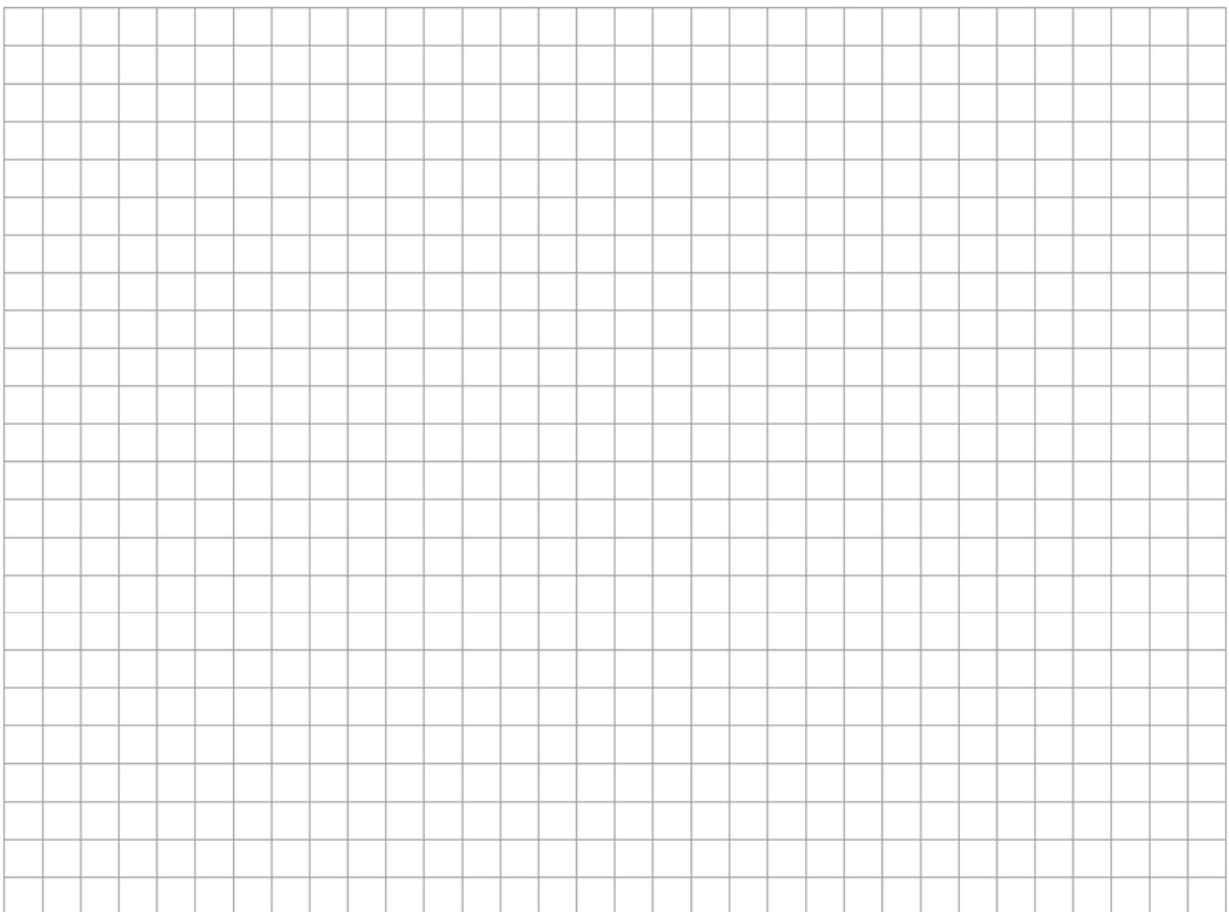
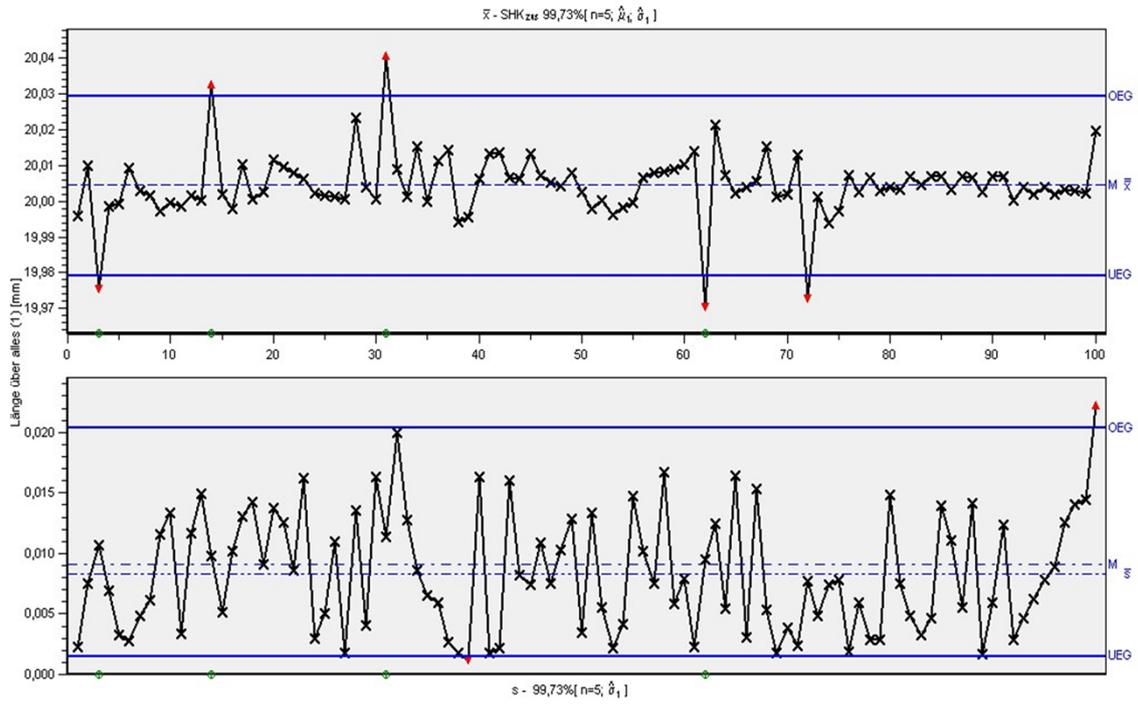
- Eingriffsgrenzenverletzung
- Merkmalswerte außerhalb der Grenzwerte

Stabilität ist die Voraussetzung zur Ermittlung der Fähigkeit !!!



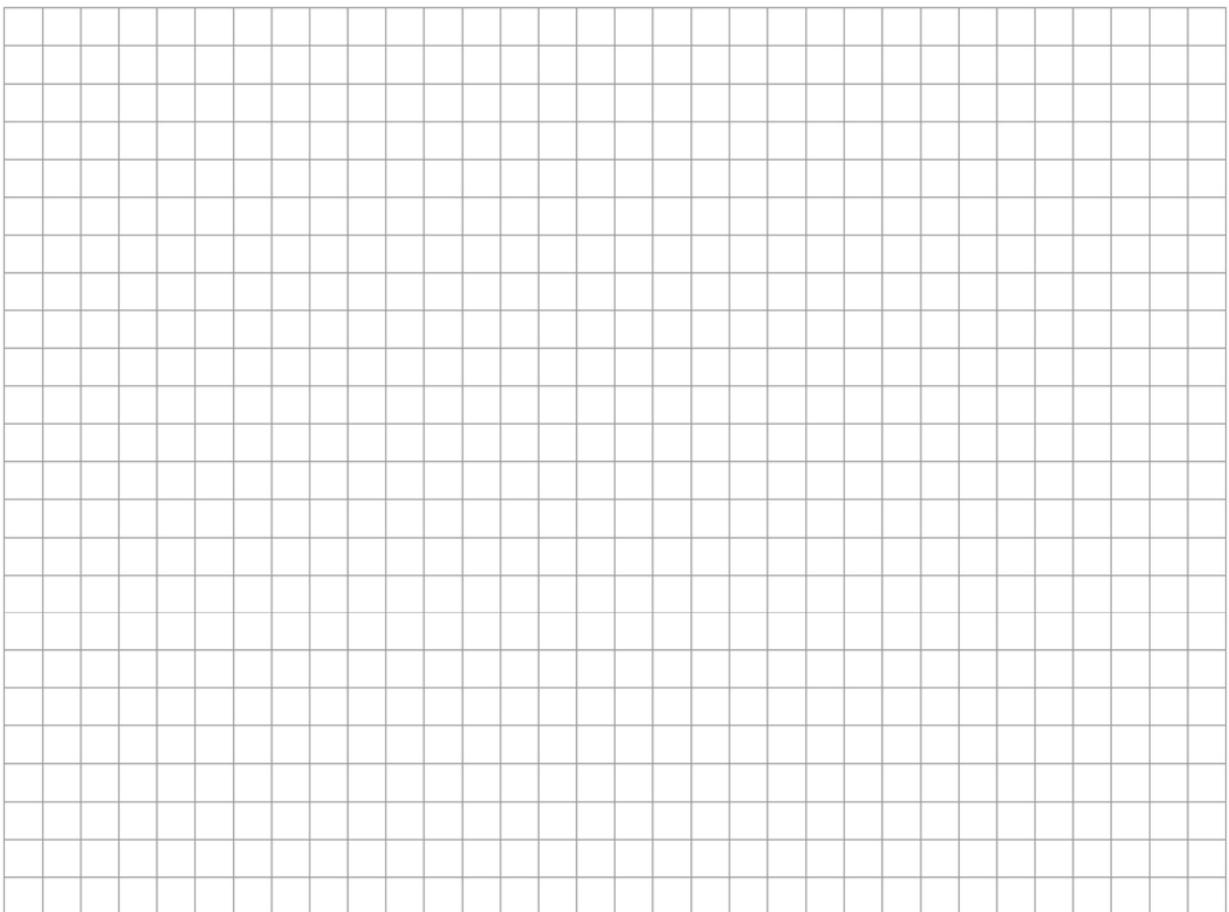
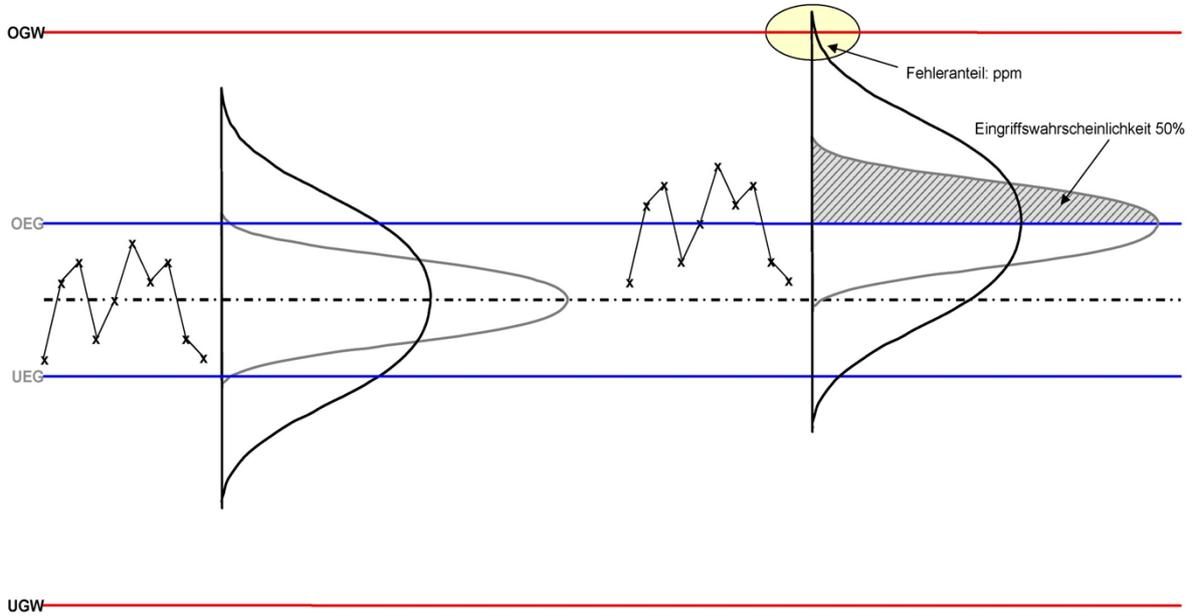
Core Tools

Eingriffsgrenzenverletzung



Core Tools

Wirkungsweise der Mittelwertkarte bei $cpk=1,67$ ($n=5$, $P=99,73\%$)



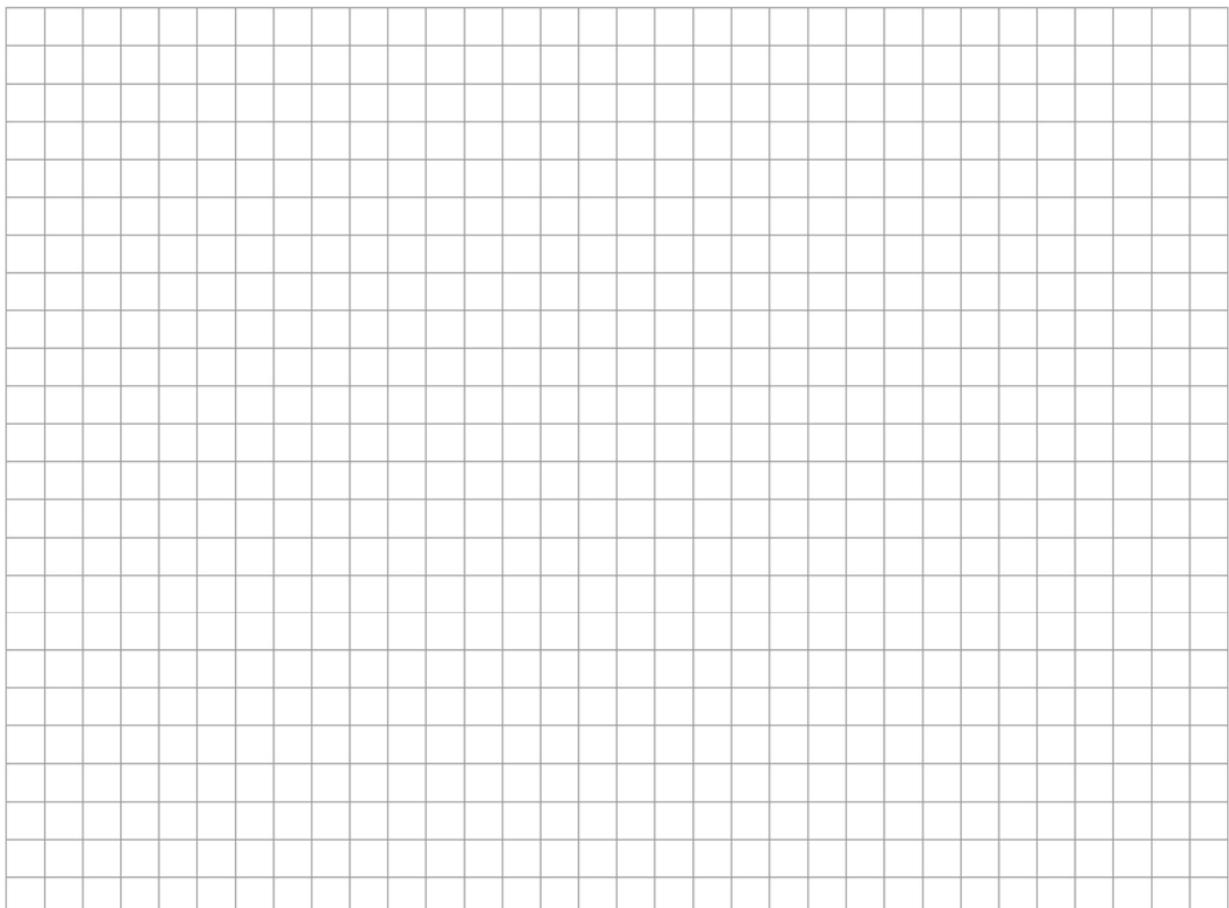
Core Tools

Statistische Prozessüberwachung



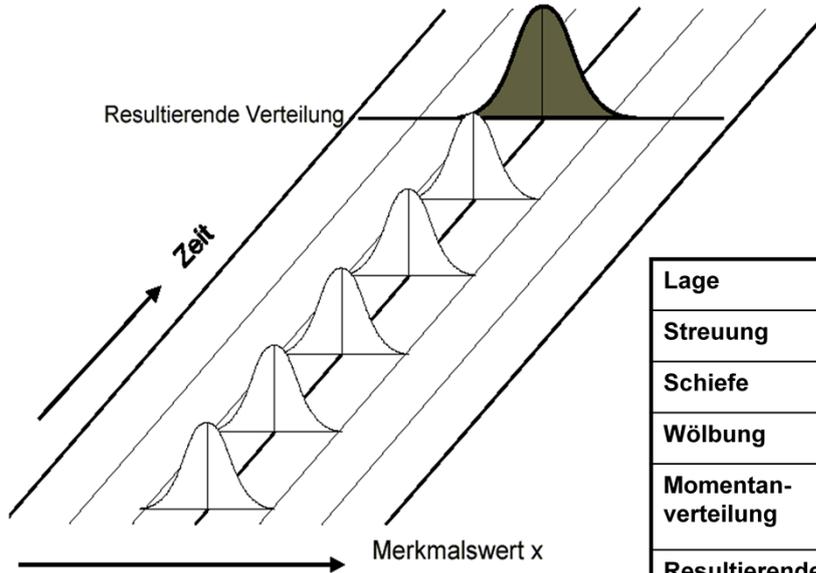
Verteilungs- und Prozesstypen:

- Nicht stationäre Mittelwerte:
 - Trendprozesse
 - Mittelwertschwankungen / -sprünge
 - mehrere Nester
 - ggf. mischverteilte Merkmalswerte
- Stationäre Mittelwerte:
 - Normalverteilte Merkmalswerte
 - Schiefverteilte Merkmalswerte

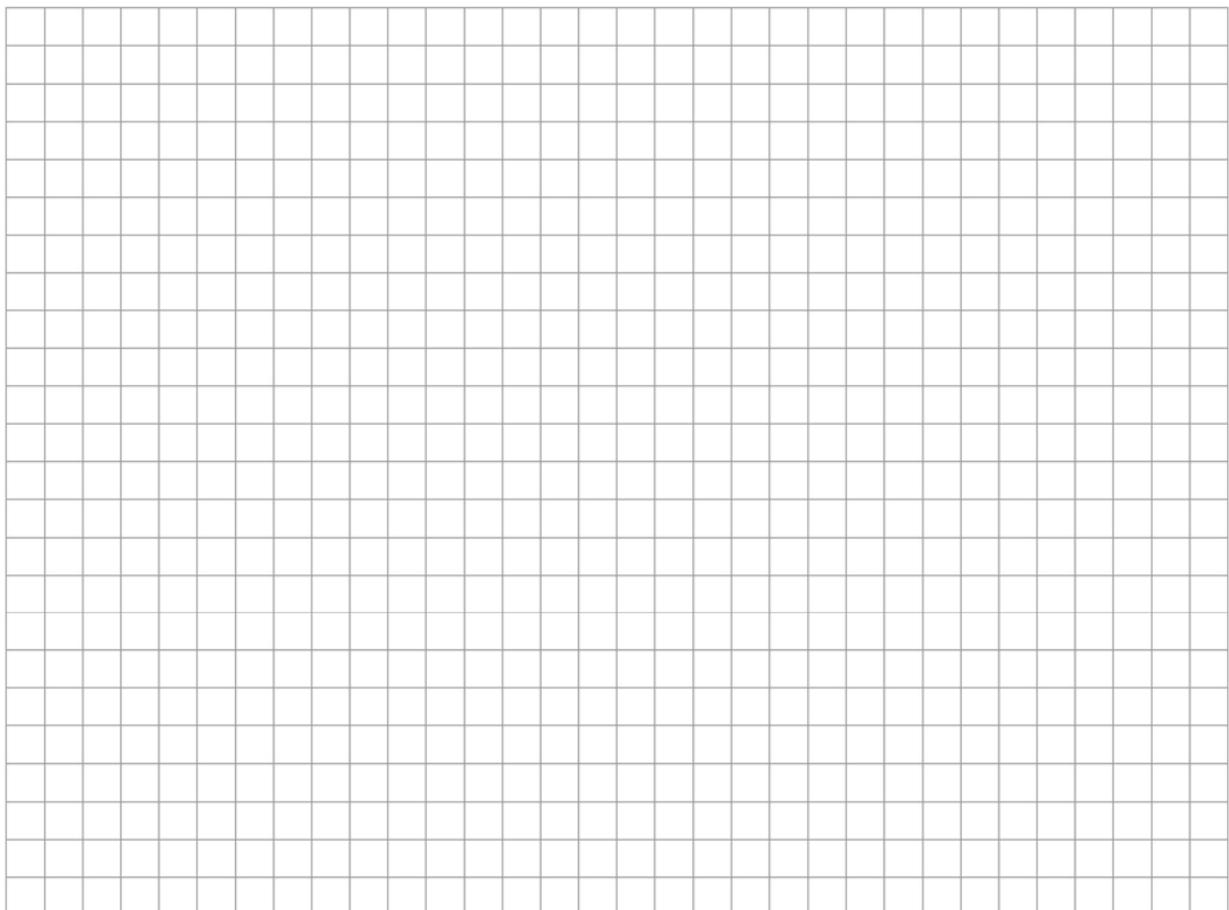


Core Tools

Verteilungsmodell A1 – stationärer Prozess, normalverteilt

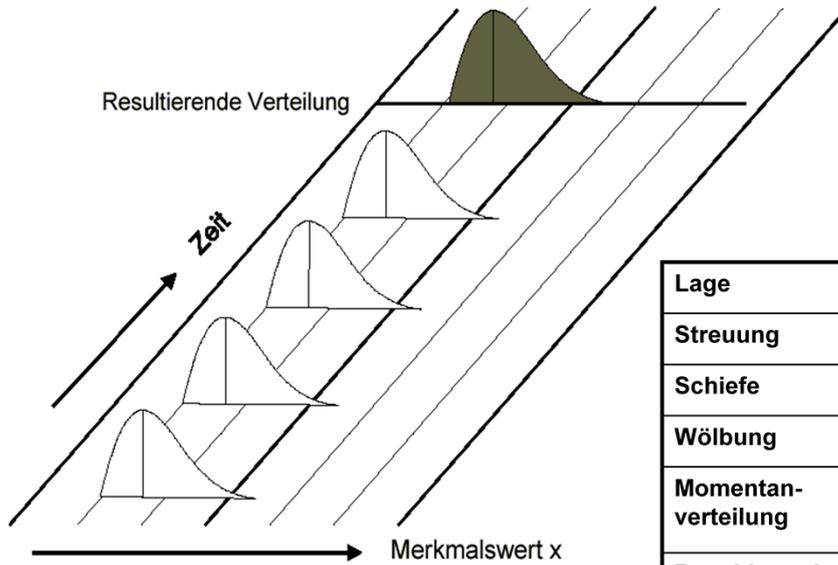


Lage	konstant
Streuung	konstant
Schiefe	konstant
Wölbung	konstant
Momentanverteilung	normalverteilt
Resultierende Verteilung	normalverteilt

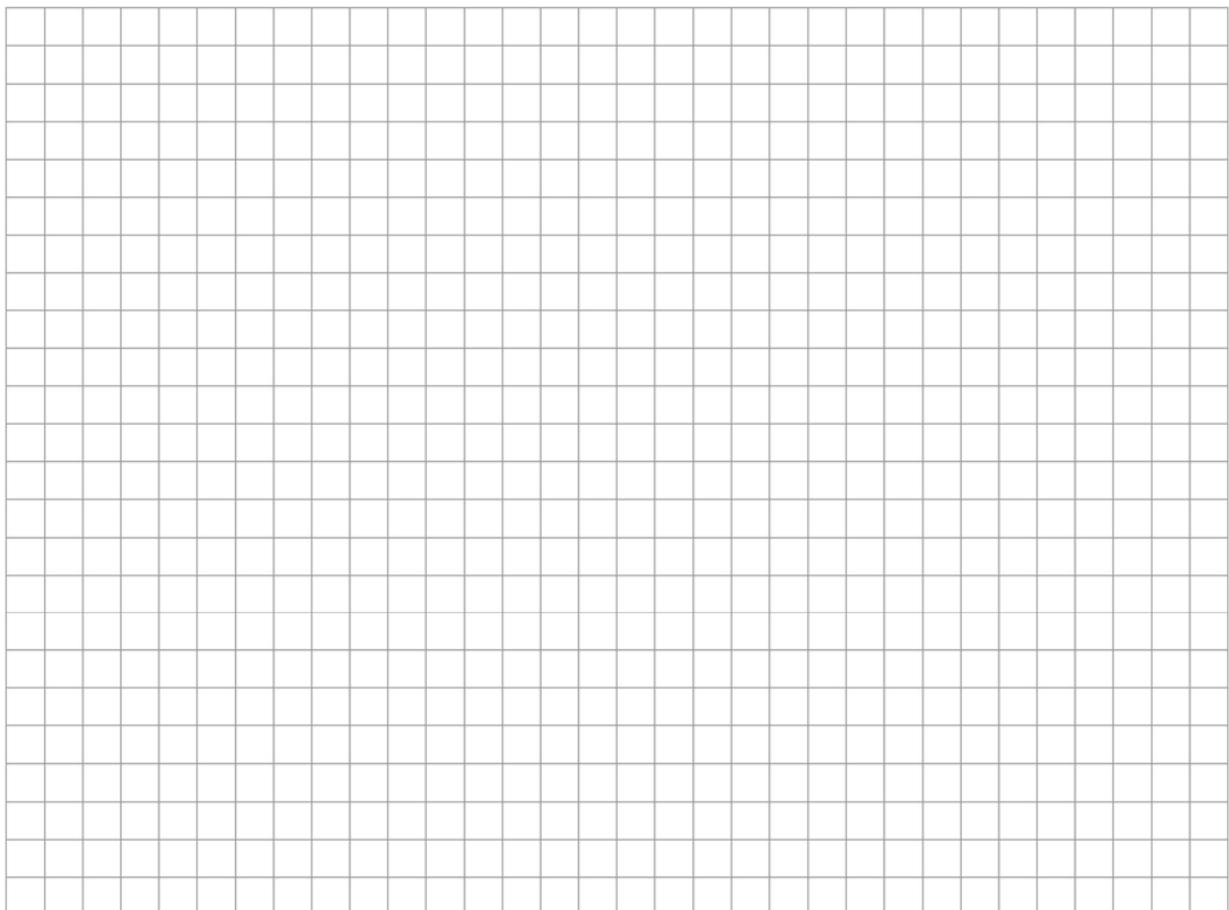


Core Tools

Verteilungsmodell A2 – stationärer Prozess, schief verteilt

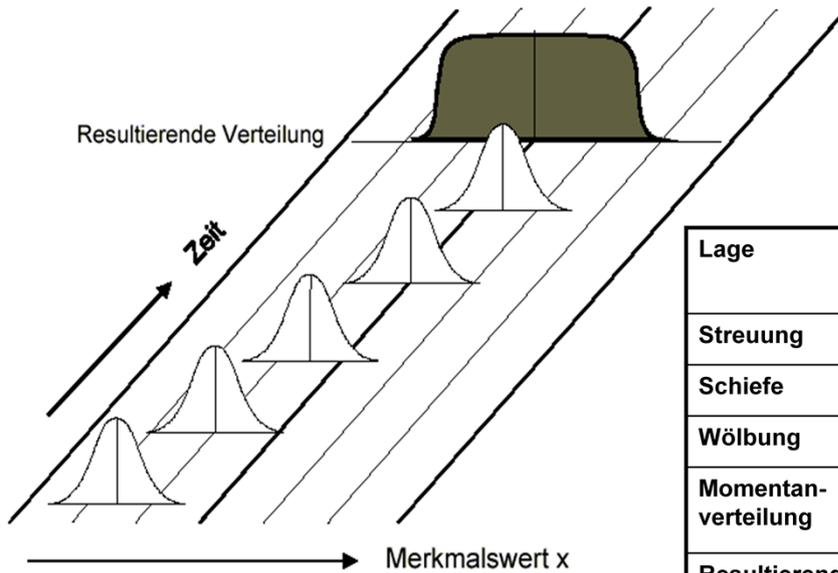


Lage	konstant
Streuung	konstant
Schiefe	konstant
Wölbung	konstant
Momentan- verteilung	nicht normalverteilt; eingipflig
Resultierende Verteilung	nicht normalverteilt; eingipflig

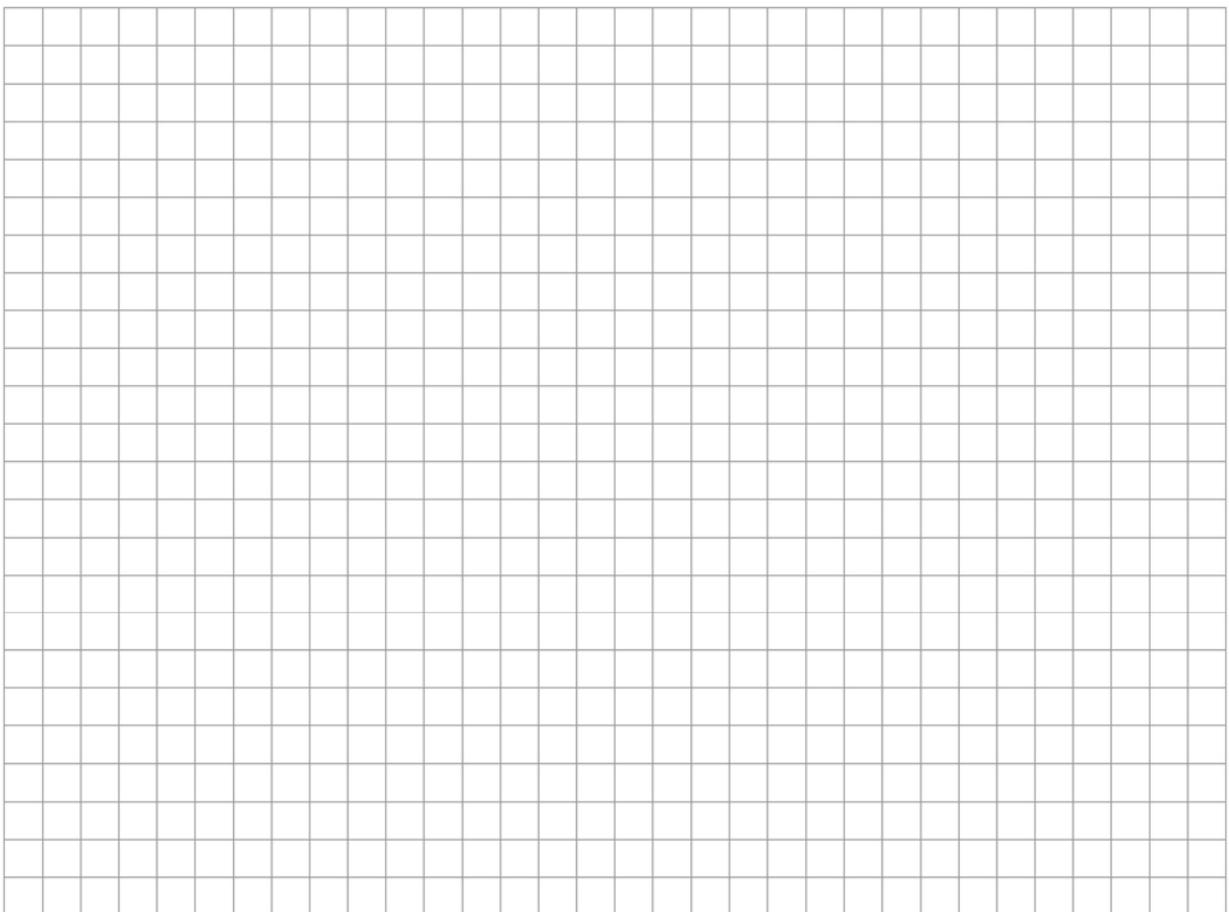


Core Tools

Verteilungsmodell C3 – nicht stationär, normalverteilt

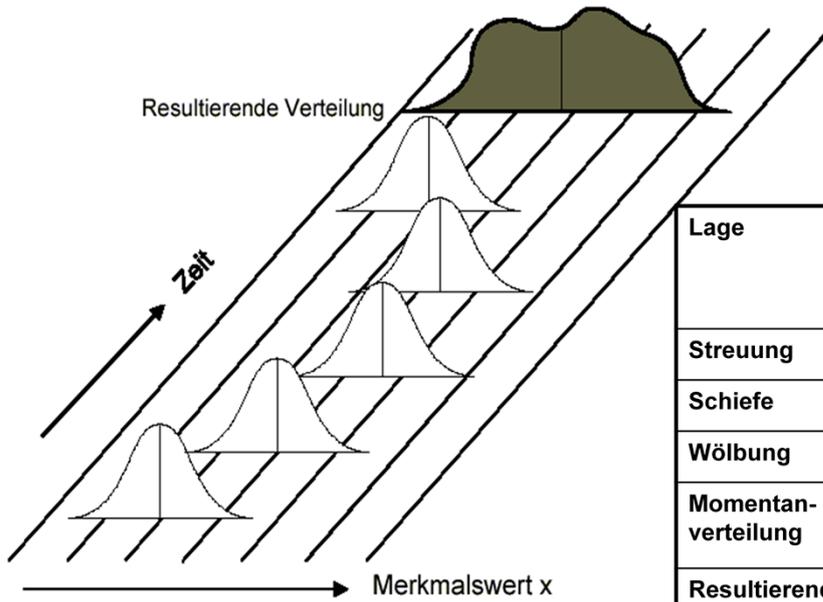


Lage	systematische Änderung (Trend, Zyklen)
Streuung	konstant
Schiefe	konstant
Wölbung	konstant
Momentanverteilung	normalverteilt
Resultierende Verteilung	beliebig verteilt

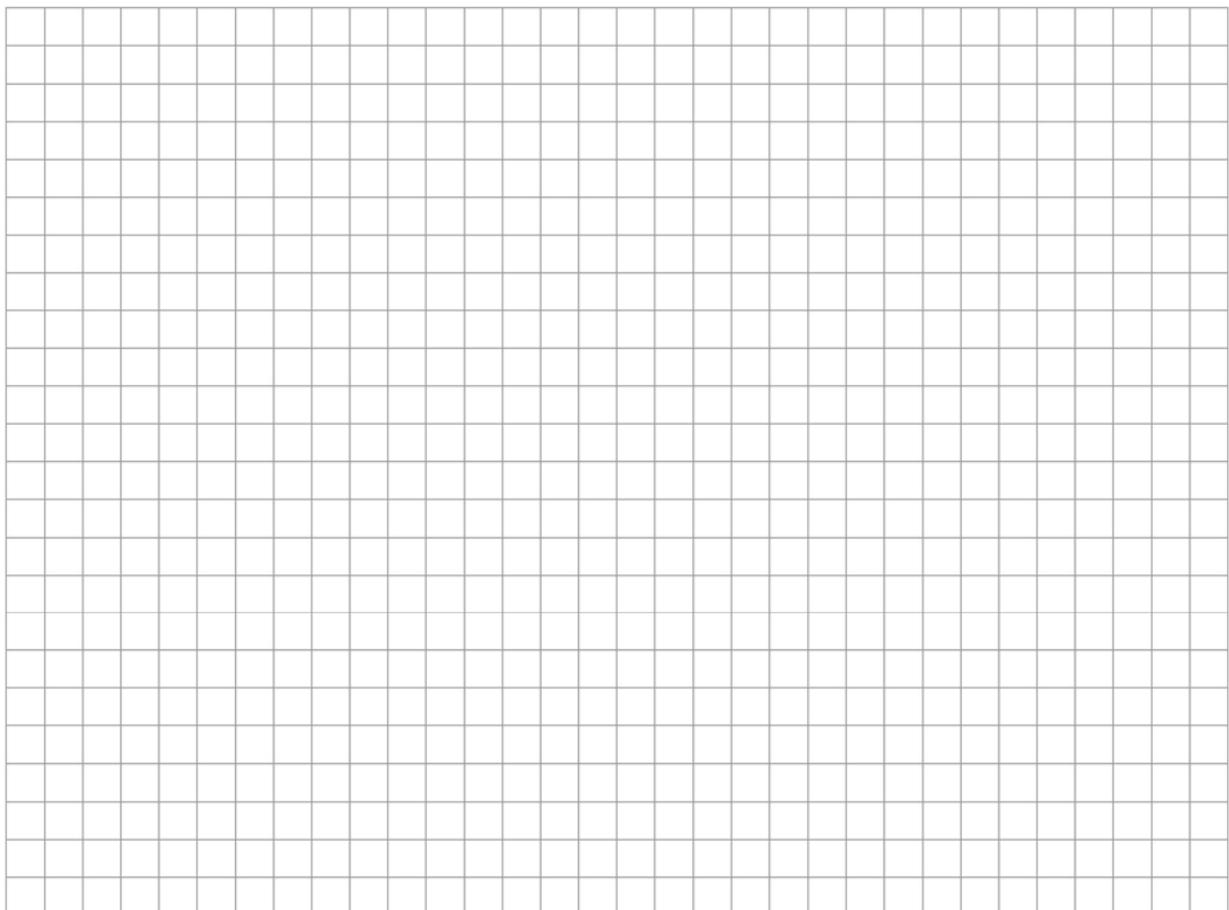


Core Tools

Verteilungsmodell C4 – nicht stationär, normalverteilt

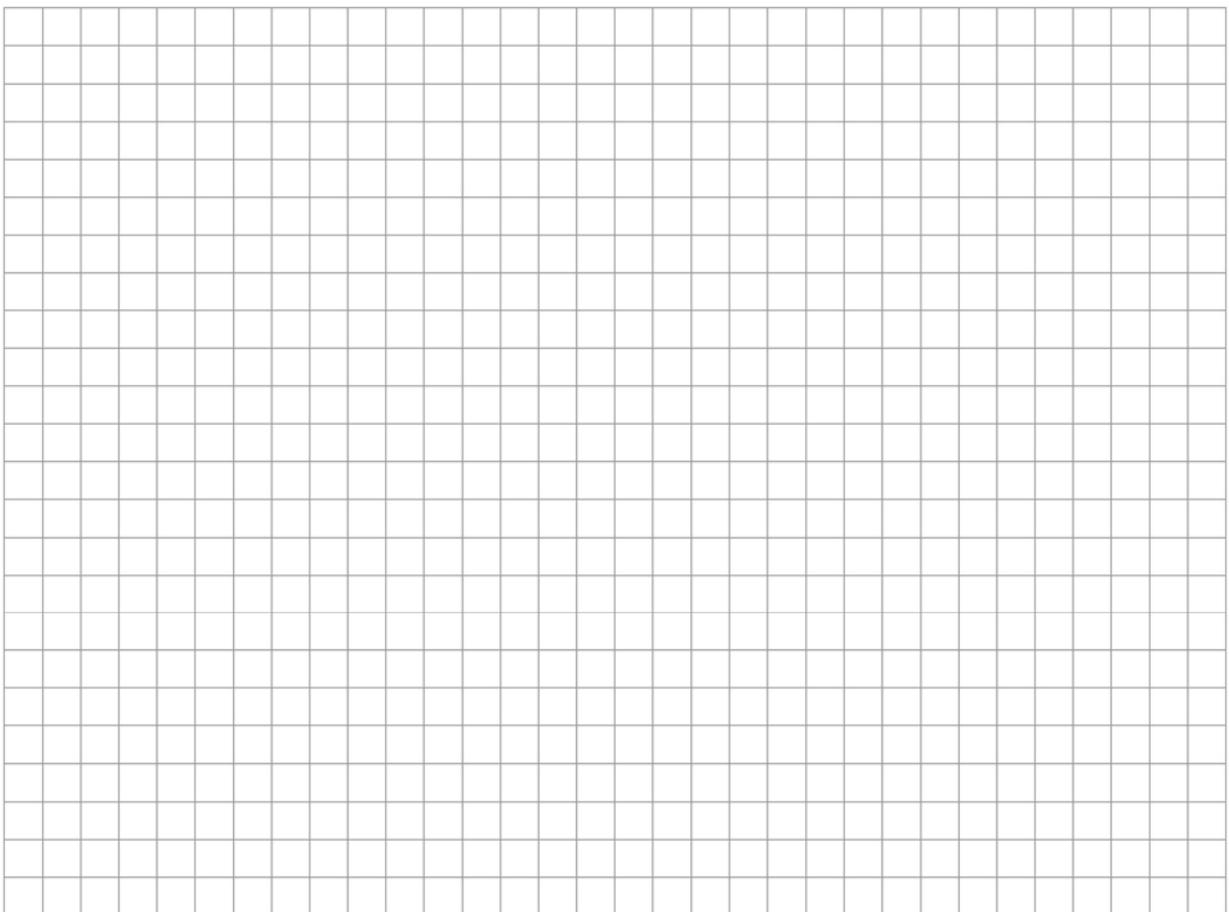
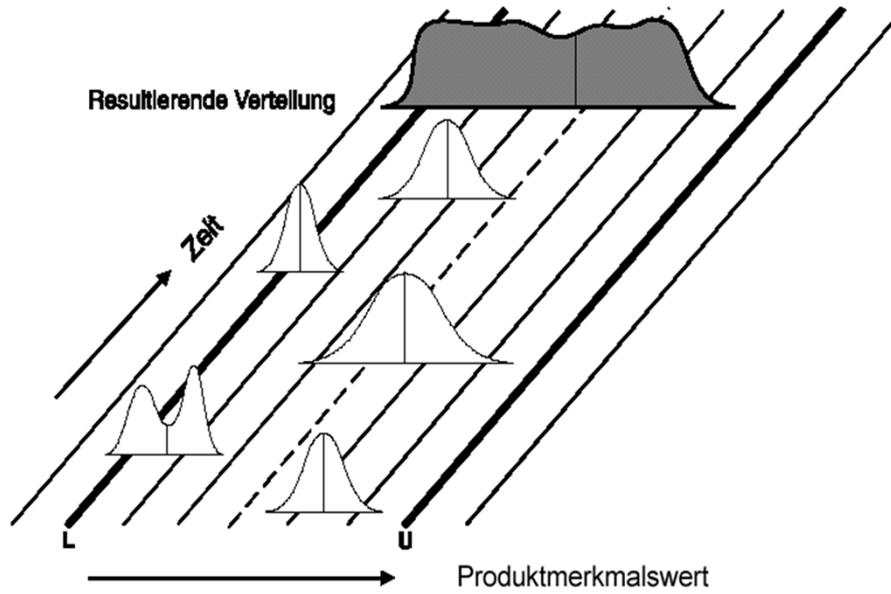


Lage	systematische und zufällige Änderung (Chargenwechsel)
Streuung	konstant
Schiefe	konstant
Wölbung	konstant
Momentanverteilung	normalverteilt
Resultierende Verteilung	beliebig verteilt; ggf. mehrgipflig



Core Tools

Nicht qualitätsfähiger Prozess



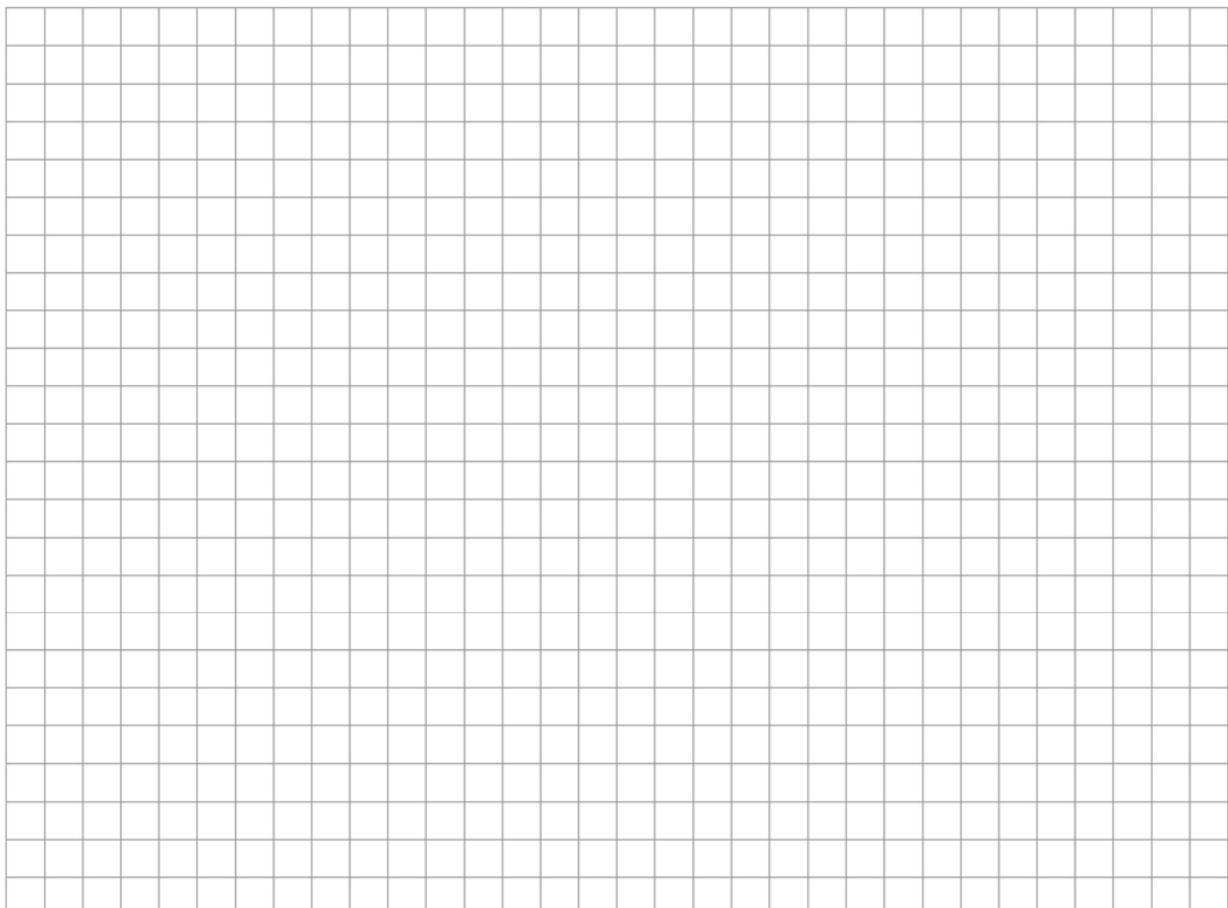
Core Tools

Statistische Prozessüberwachung



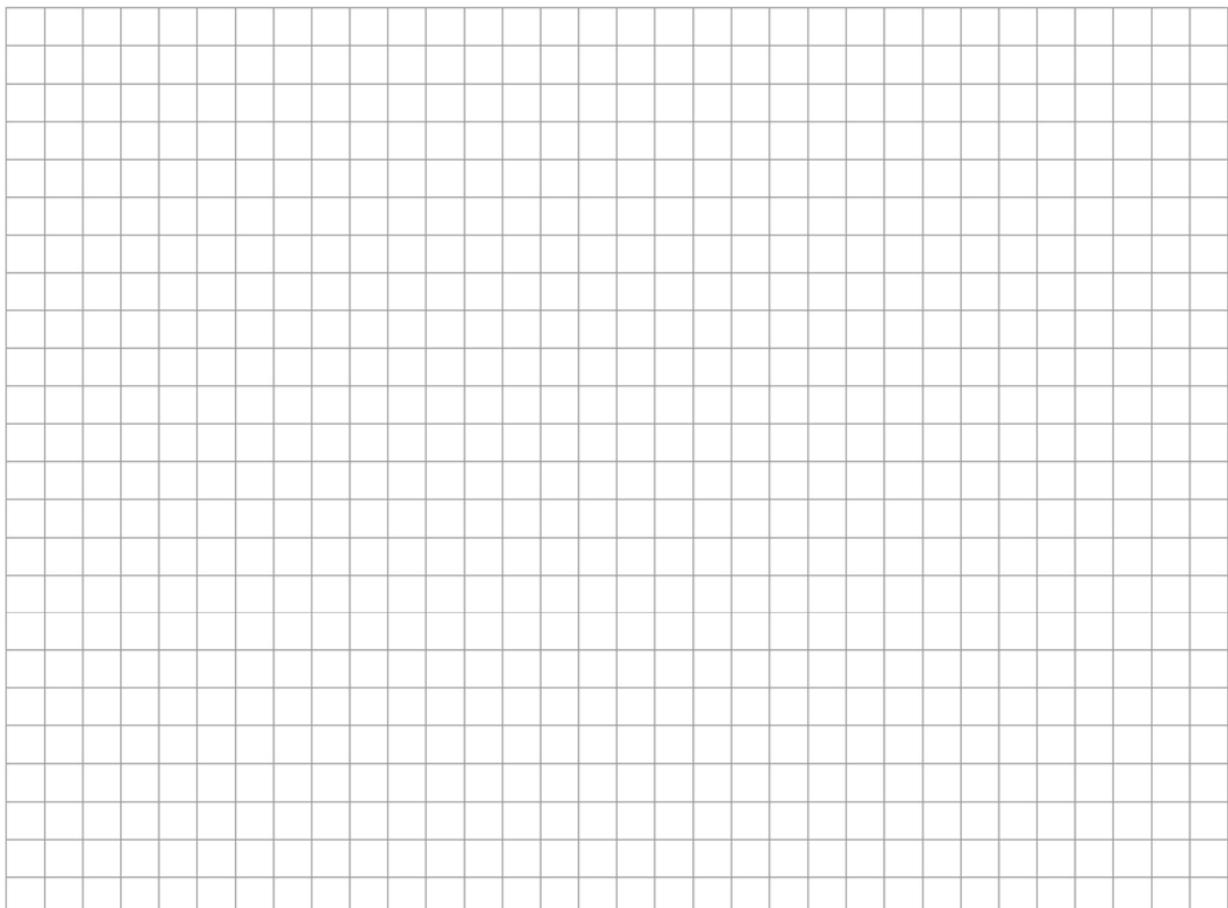
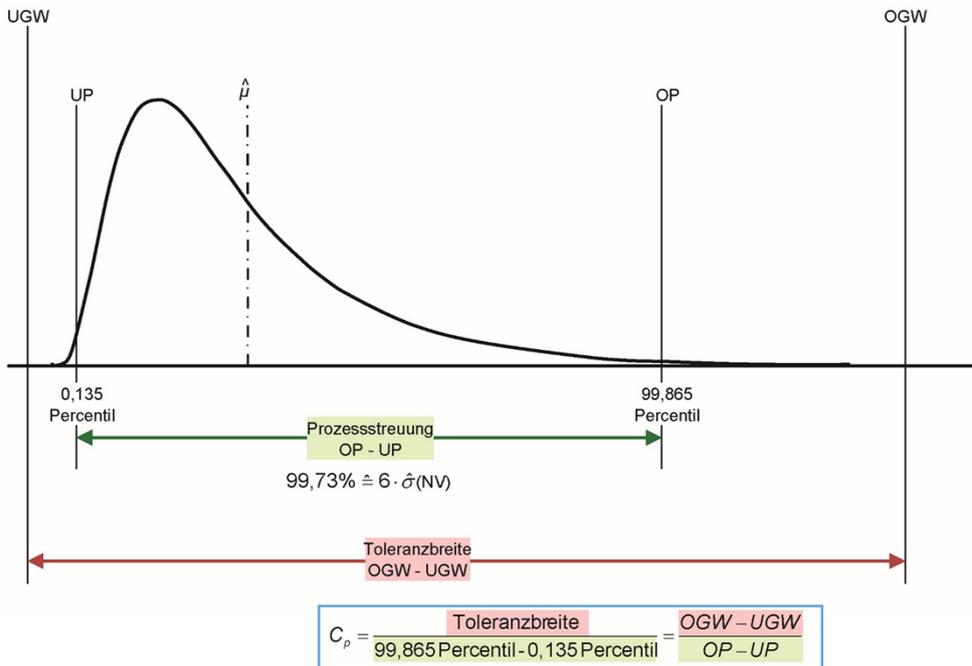
	Maßnahmen am Produkt (Letztgültiger Fähigkeitsindex)		
	$C_{pk} < 1,33$	1,33 - 1,67	$> 1,67$
Prozess stabil	100 % - Prüfung	Teile annehmen	Teile annehmen
Prozess nicht stabil*	100 % - Prüfung	Ursache analysieren und alle Teile, die seit der letzten i.O.-Stichprobe gefertigt wurden, 100 % prüfen.	

* nicht stabil*: Eingriffsgrenzenverletzung und / oder Einzelergebnisse außerhalb der Grenzwerte
 (Quelle: Ford Motor Company, Customer Specific Requirements, Feb. 2014)



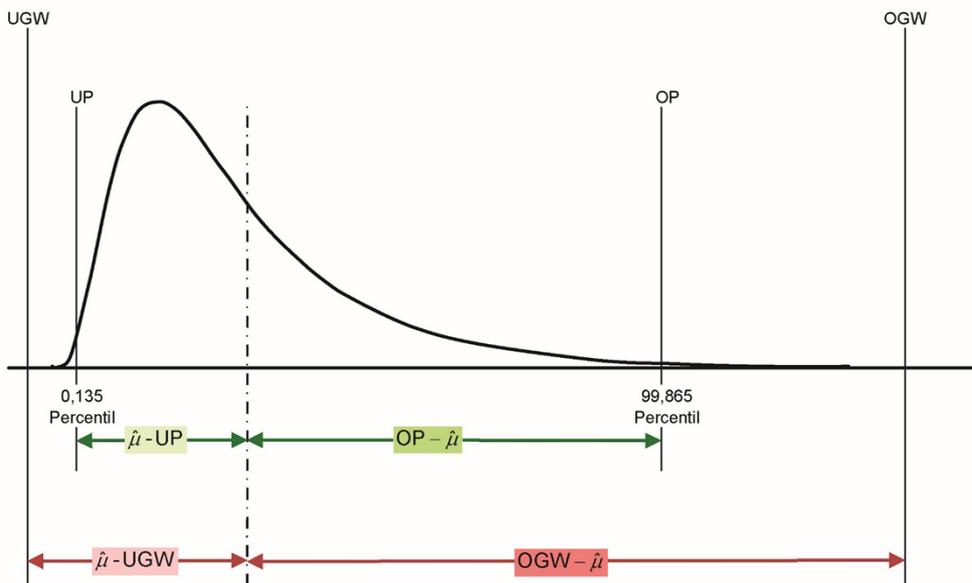
Core Tools

Quantil Methode (Schiefe Verteilung)



Core Tools

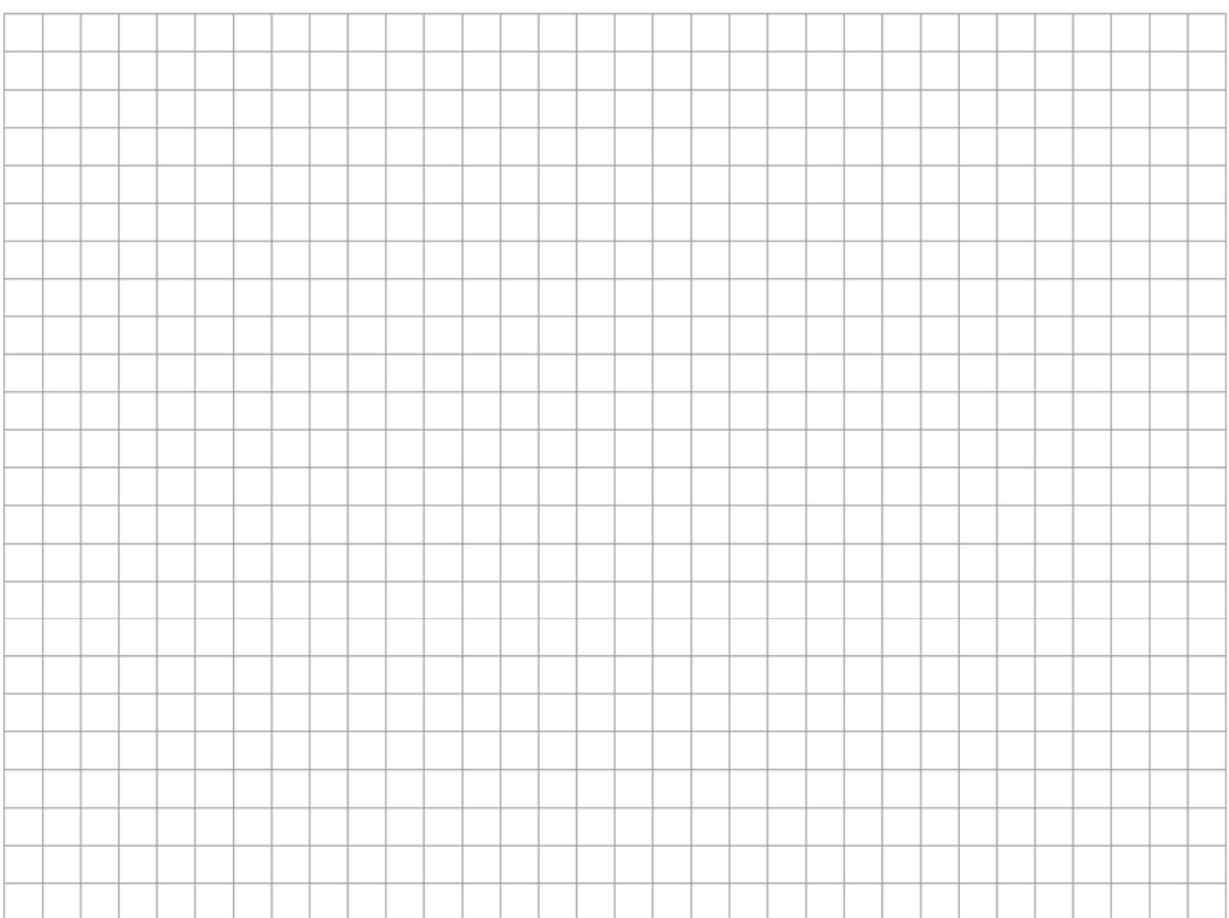
Quantil Methode (Schiefe Verteilung)



$$C_{UP} = \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - 0,135 \text{ Percentil}} = \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - UP}$$

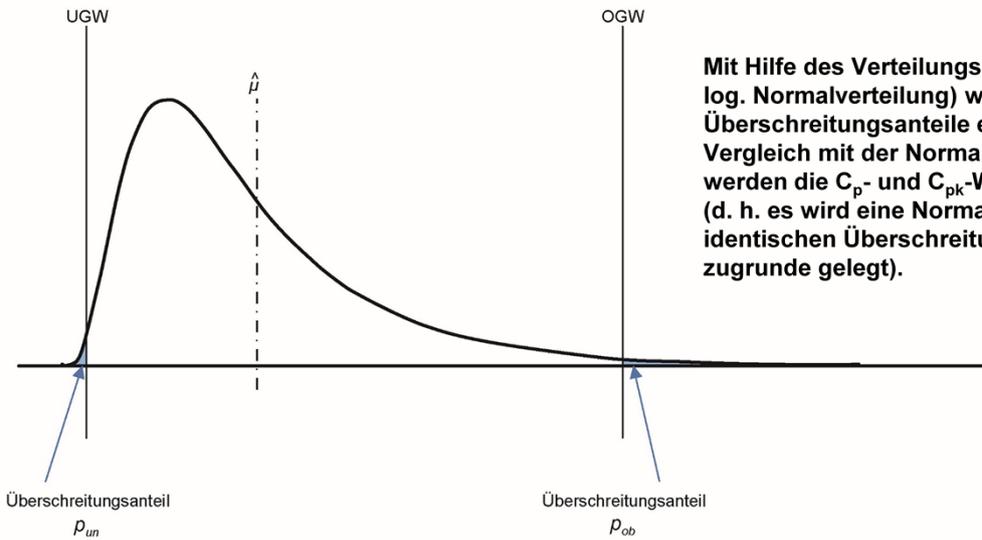
$$C_{OP} = \frac{OGW - \hat{\mu}}{99,865 \text{ Percentil} - \hat{\mu}} = \frac{OGW - \hat{\mu}}{OP - \hat{\mu}}$$

$$C_{pk} = \text{MIN}\{C_{OP}; C_{UP}\}$$



Core Tools

Betrachtung der Überschreitungsanteile (Schiefe VT)

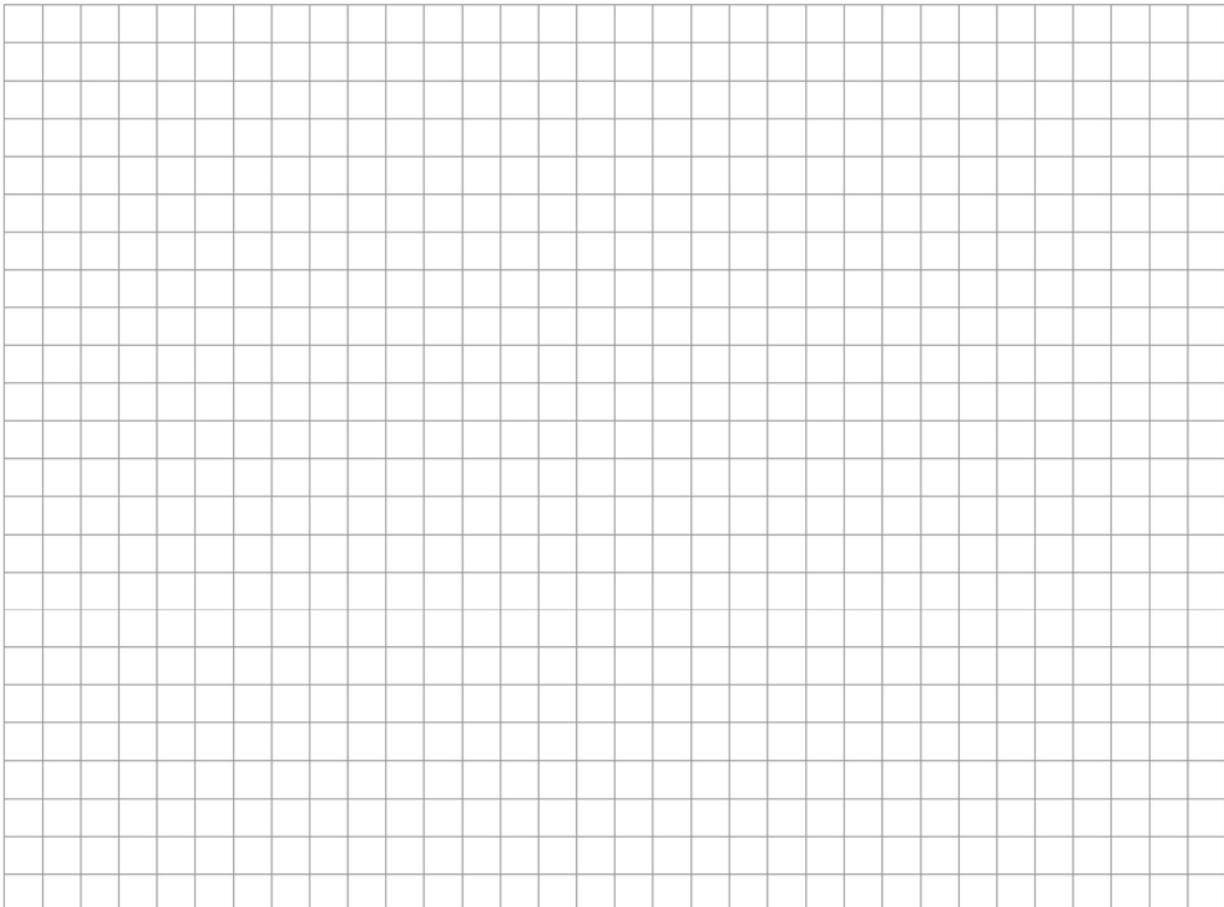


Mit Hilfe des Verteilungsmodells (z. B. log. Normalverteilung) werden die Überschreitungsanteile ermittelt. Durch Vergleich mit der Normalverteilung werden die C_p - und C_{pk} -Werte bestimmt (d. h. es wird eine Normalverteilung mit identischen Überschreitungsanteilen zugrunde gelegt).

$$C_{un} = \frac{u_{1-p_{un}}}{3}$$

$$C_{ob} = \frac{u_{1-p_{ob}}}{3}$$

$$C_{pk} = \text{MIN}\{C_{un}; C_{ob}\}$$



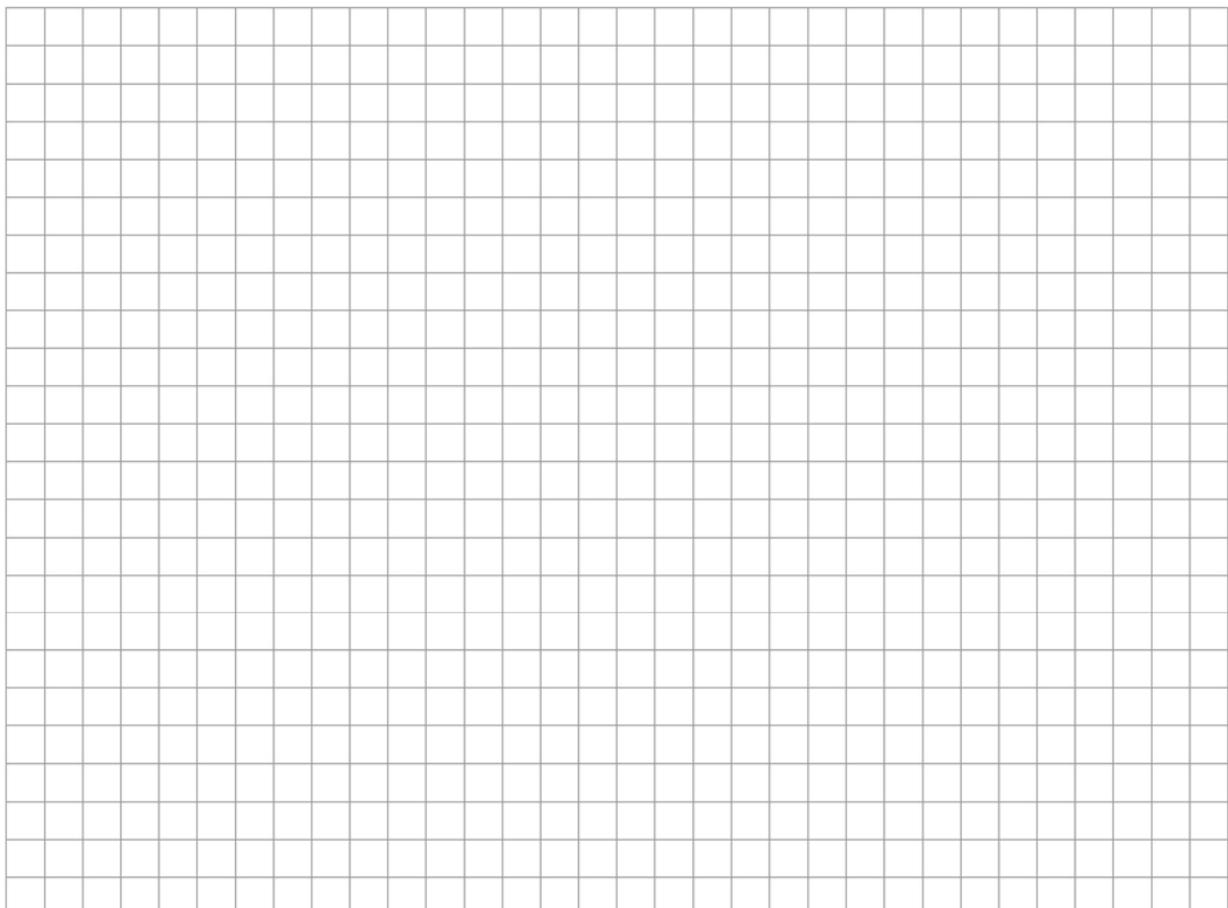
Core Tools

Zentraler Grenzwertsatz der Statistik



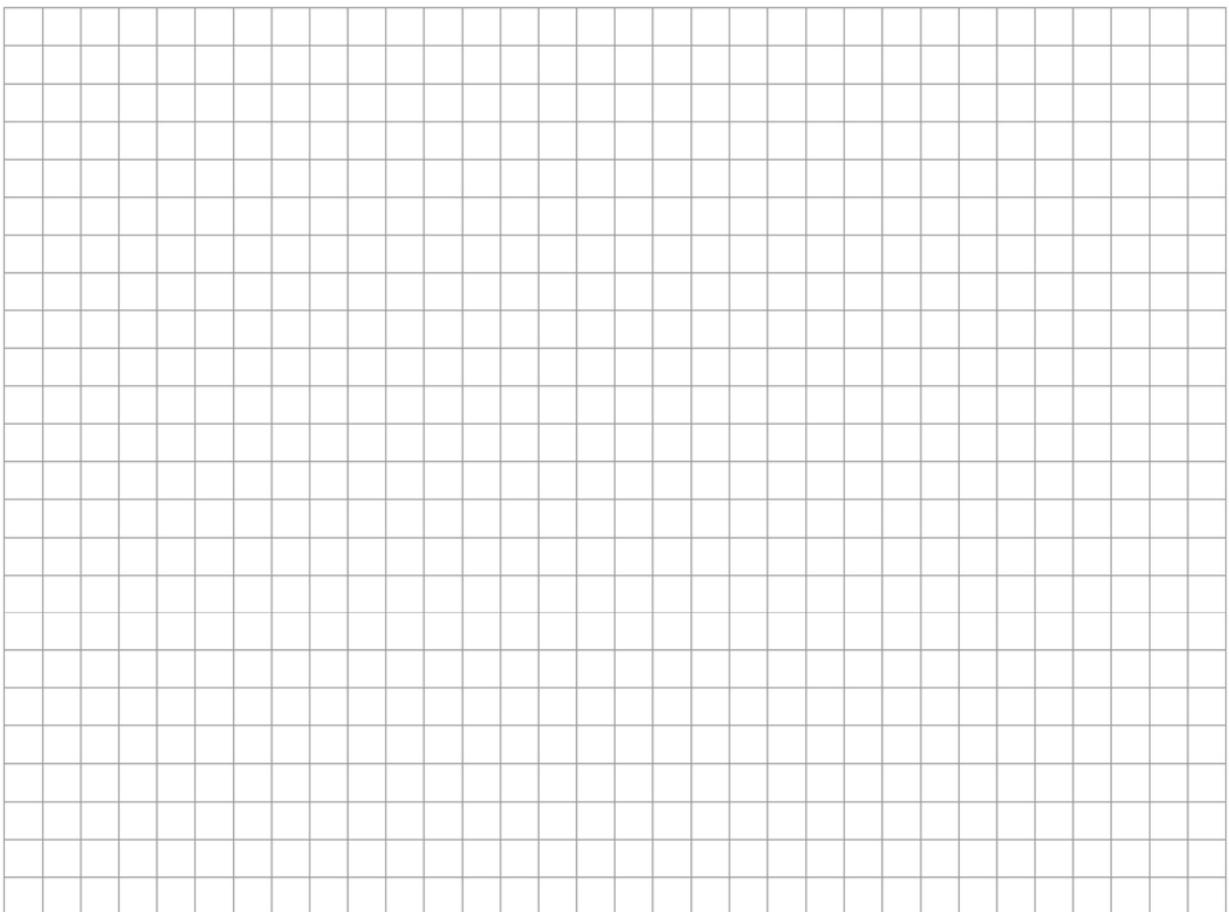
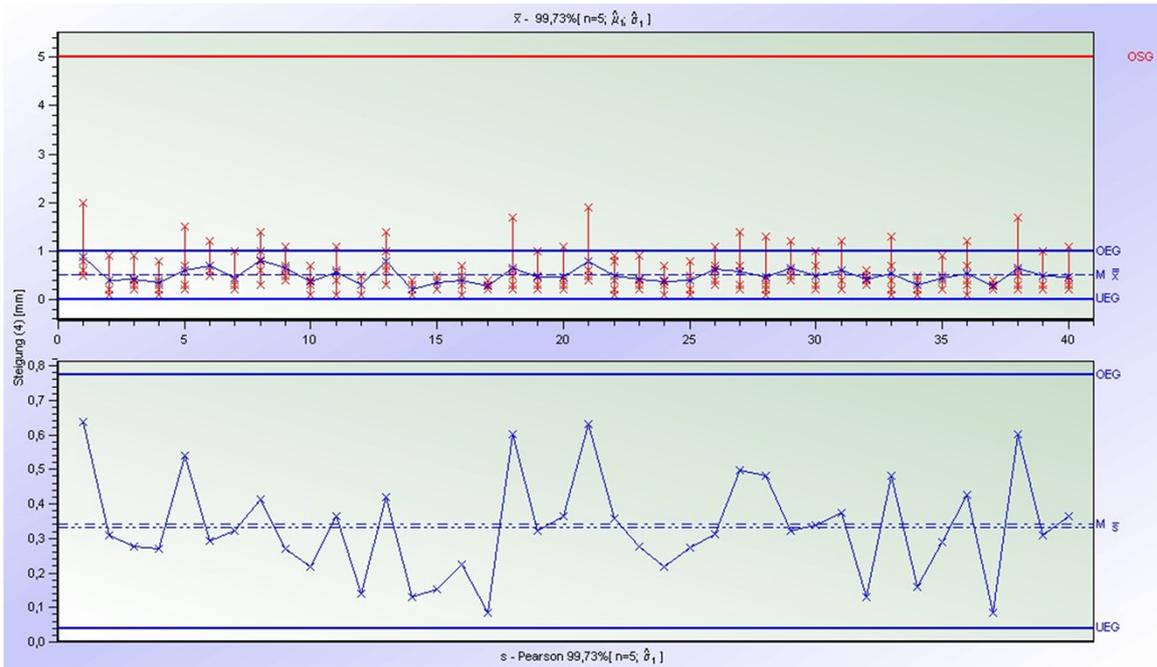
Aus dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik lässt sich ableiten, dass sich die Verteilung von Stichproben-Mittelwerten der Normalverteilung annähert, wenn die Stichproben einer eingipflig schief verteilten Grundgesamtheit entnommen werden.

Daraus folgt, dass Eingriffsgrenzen der Shewhart-Karte für Mittelwerte (\bar{X} -Karte) mit Hilfe der Normalverteilung berechnet werden können.



Core Tools

Zentraler Grenzwertsatz der Statistik

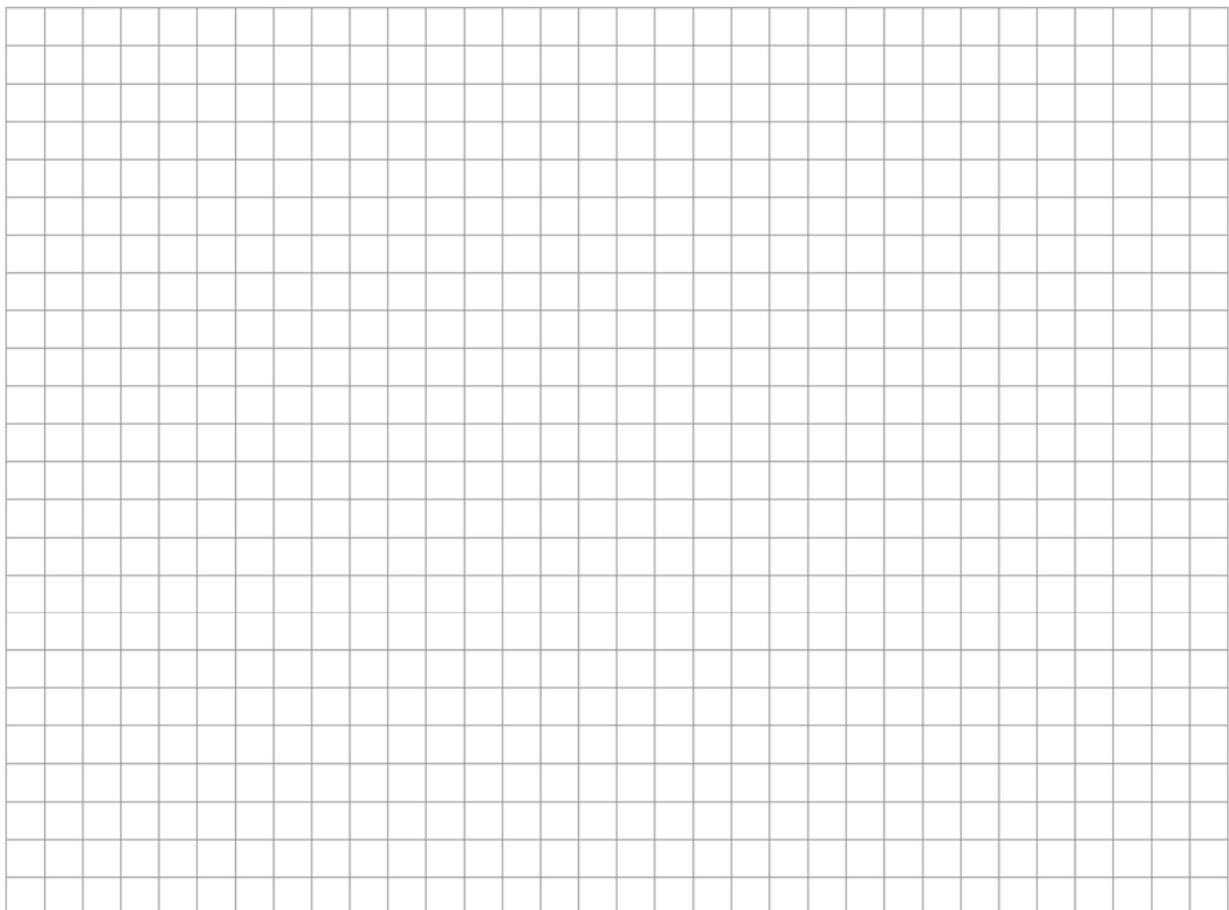
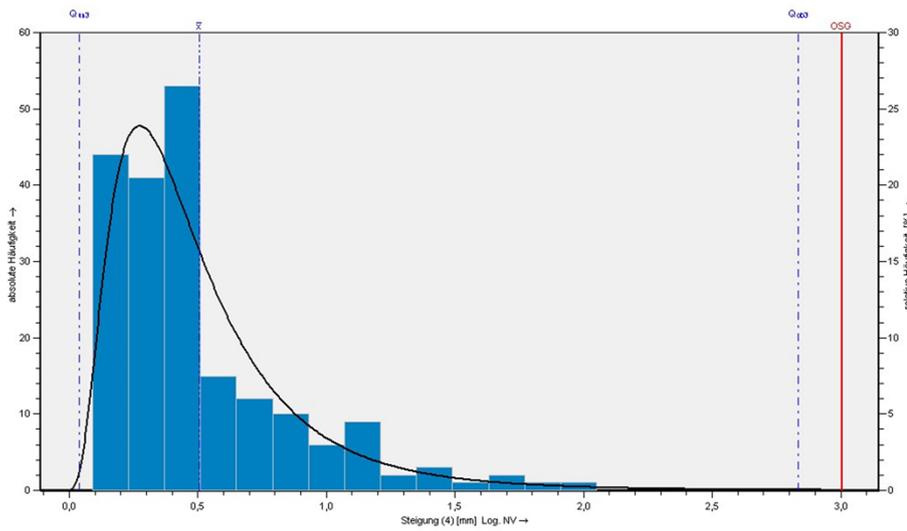


Core Tools

Logarithmische Normalverteilung



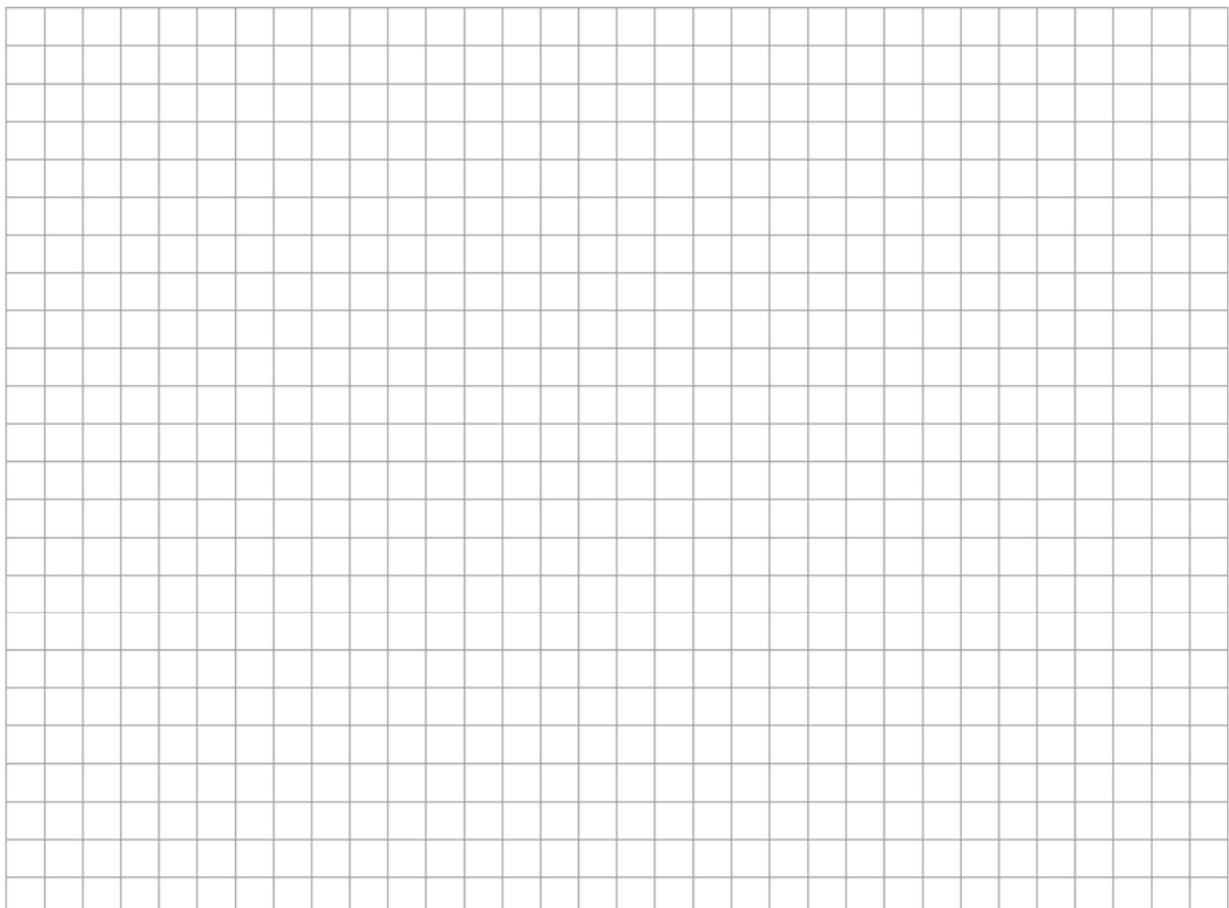
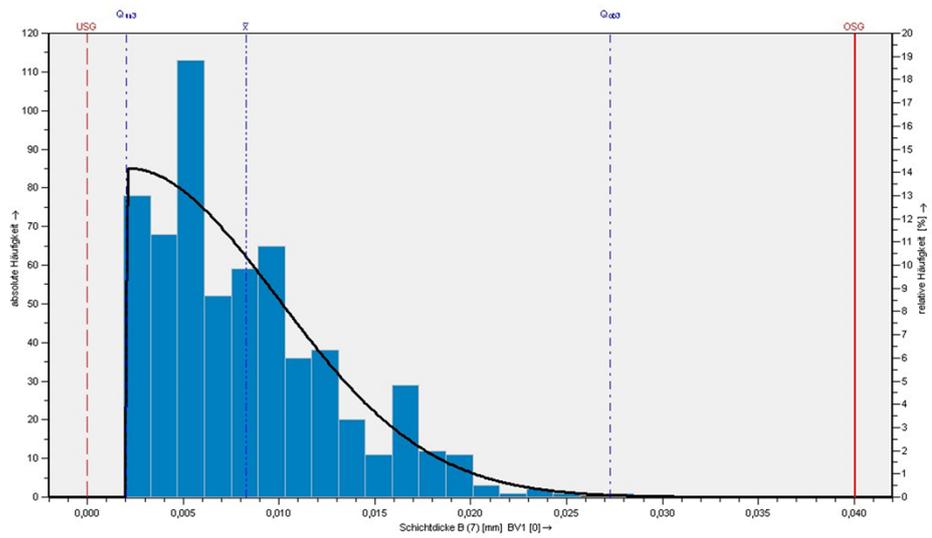
Eine logarithmische Normalverteilung entsteht, wenn ein Merkmalswert nicht gleichmäßig in beide Richtungen streuen kann, z. B. bei null-begrenzten Merkmalen



Core Tools

Betragsverteilung

Eine Betragsverteilung entsteht, wenn nur die Beträge, nicht jedoch die Richtung (Vorzeichen) von Messwerten berücksichtigt werden.
Beispiel: Die meisten Form- und Lagetoleranzen (z. B. Ebenheit, ...)

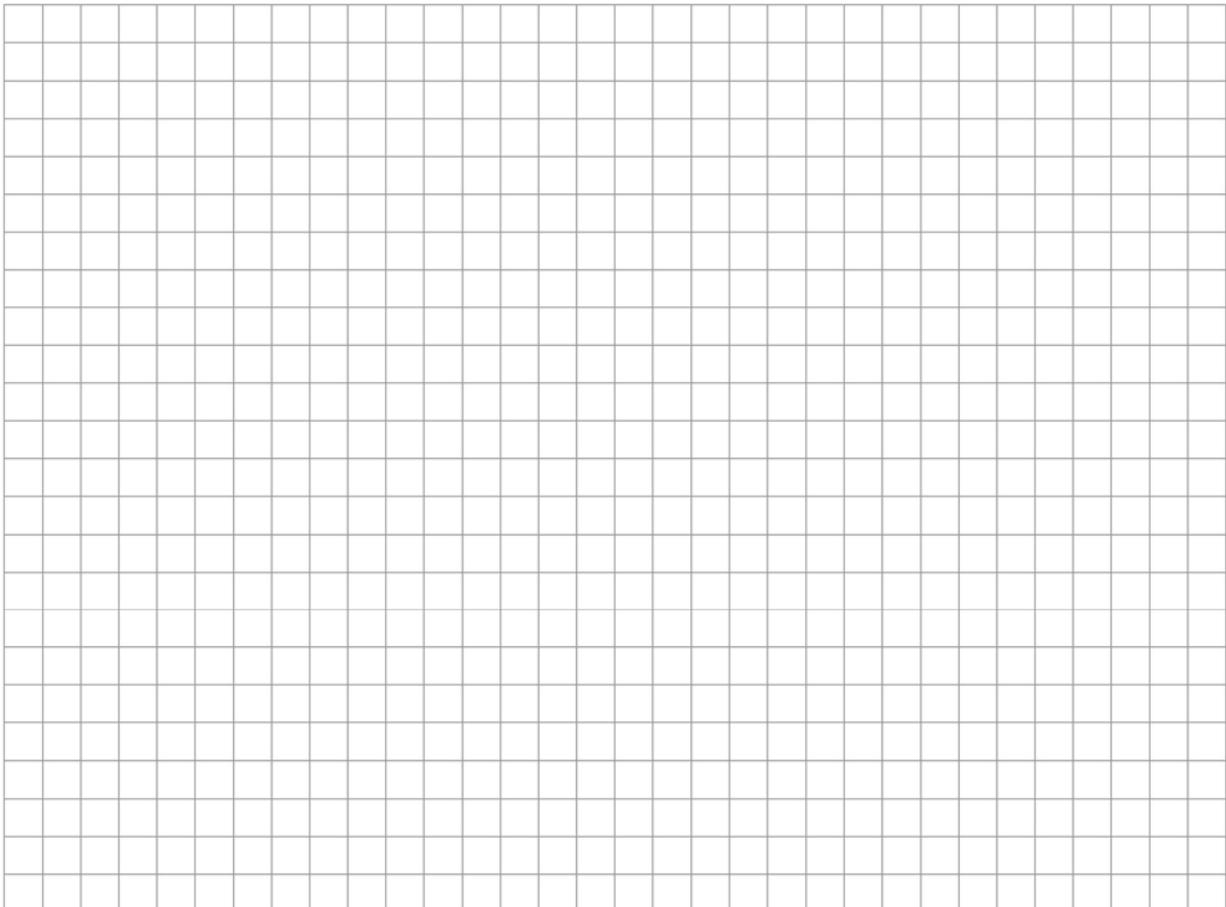
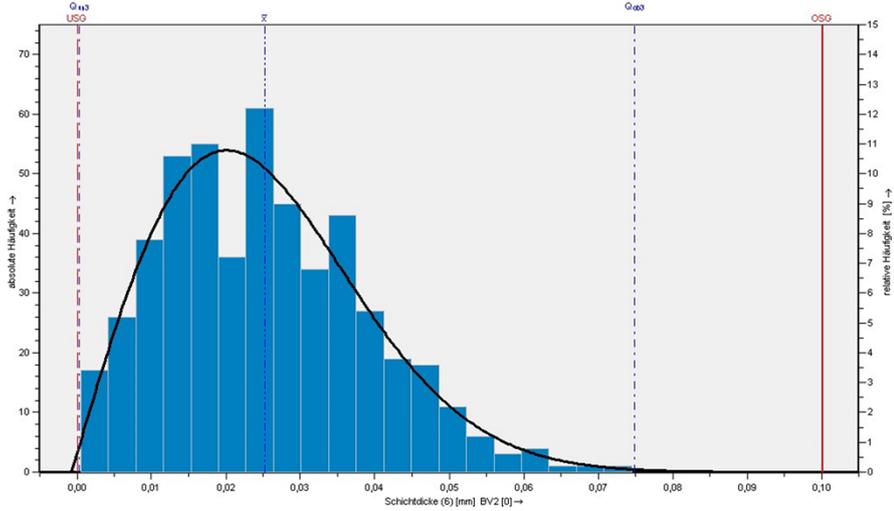


Core Tools

Rayleigh Verteilung (Betragsverteilung 2. Art)

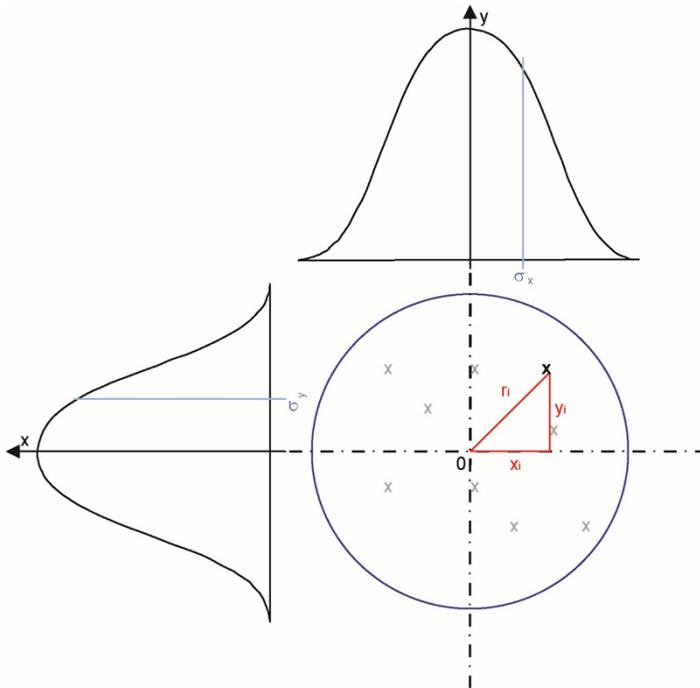


Die Rayleigh Verteilung (oder Betragsverteilung 2. Art) ist eine zweidimensionale Verteilung. Sie entsteht durch Überlagerung von zwei Normalverteilungen, wenn z. B. Positionsabweichungen in x- und y-Richtung jeweils normalverteilt streuen und in Polarkoordinaten gemessen wird.



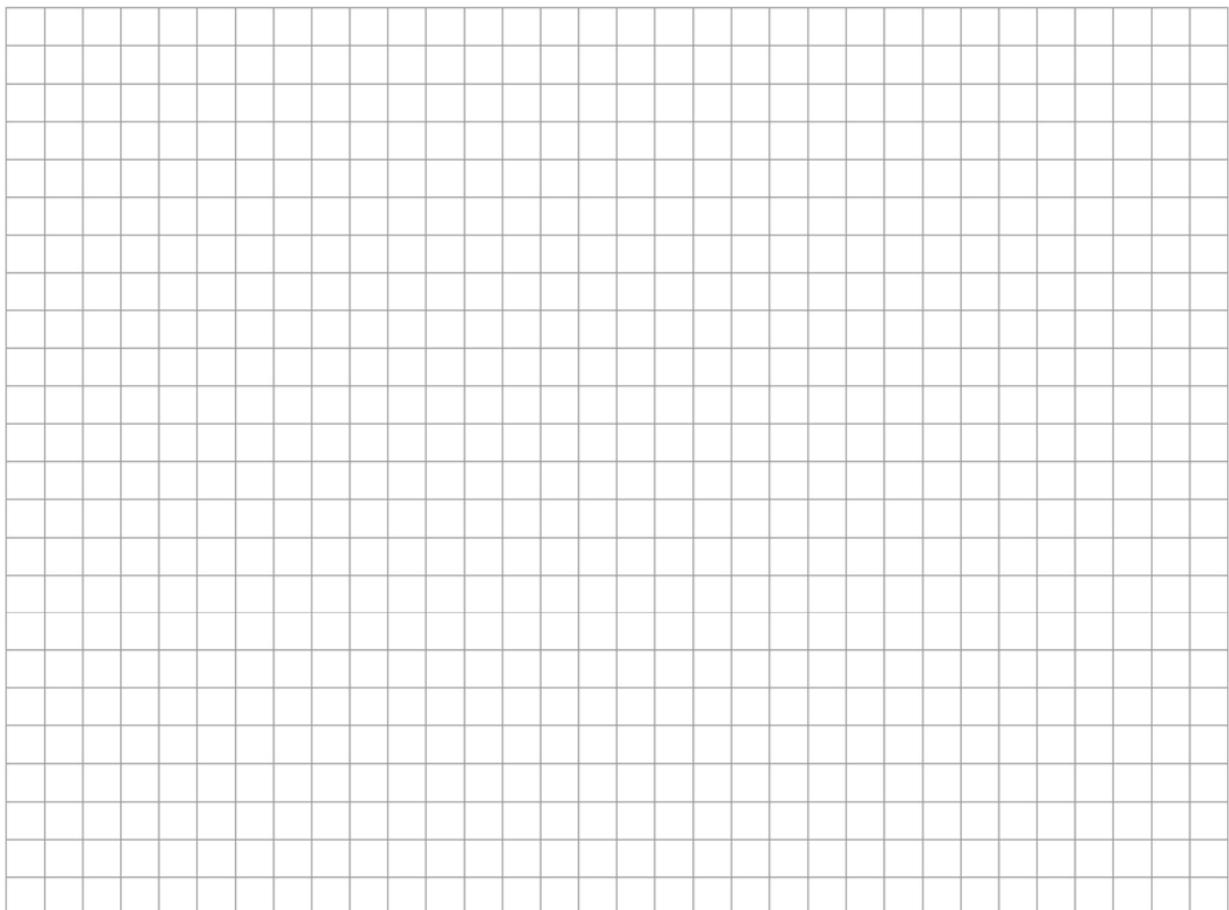
Core Tools

Rayleigh Verteilung (Betragsverteilung 2. Art)



$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$\rho = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

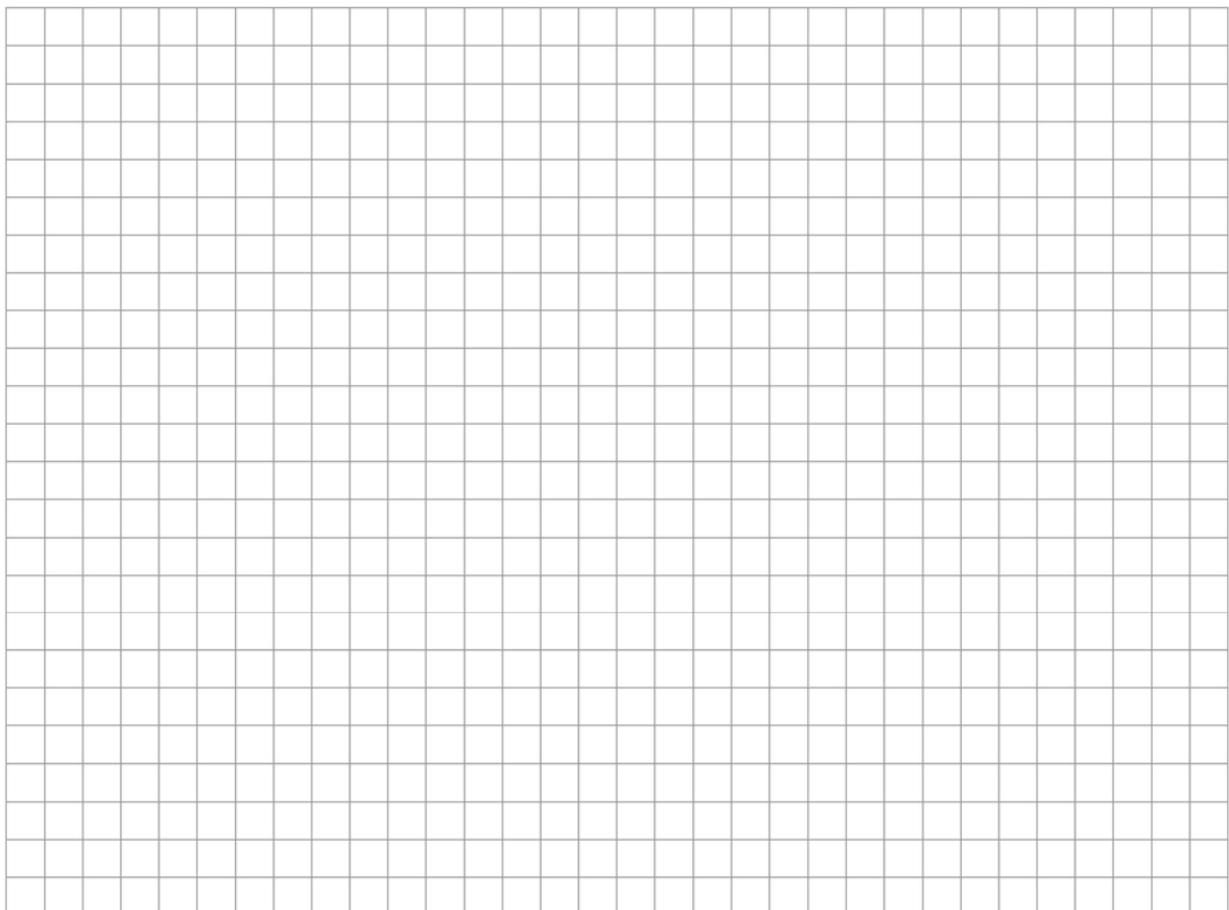
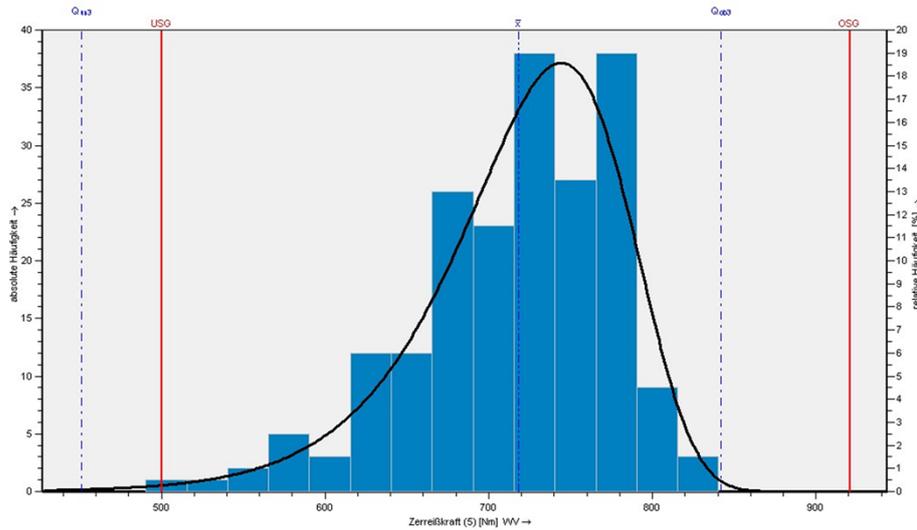


Core Tools

Weibull-Verteilung (Lebensdauerverteilung)



Weibull-Verteilungen sind typischerweise bei Zerreiß-Versuchen oder der Lebensdauer (Verschleiß) anzutreffen.



Core Tools

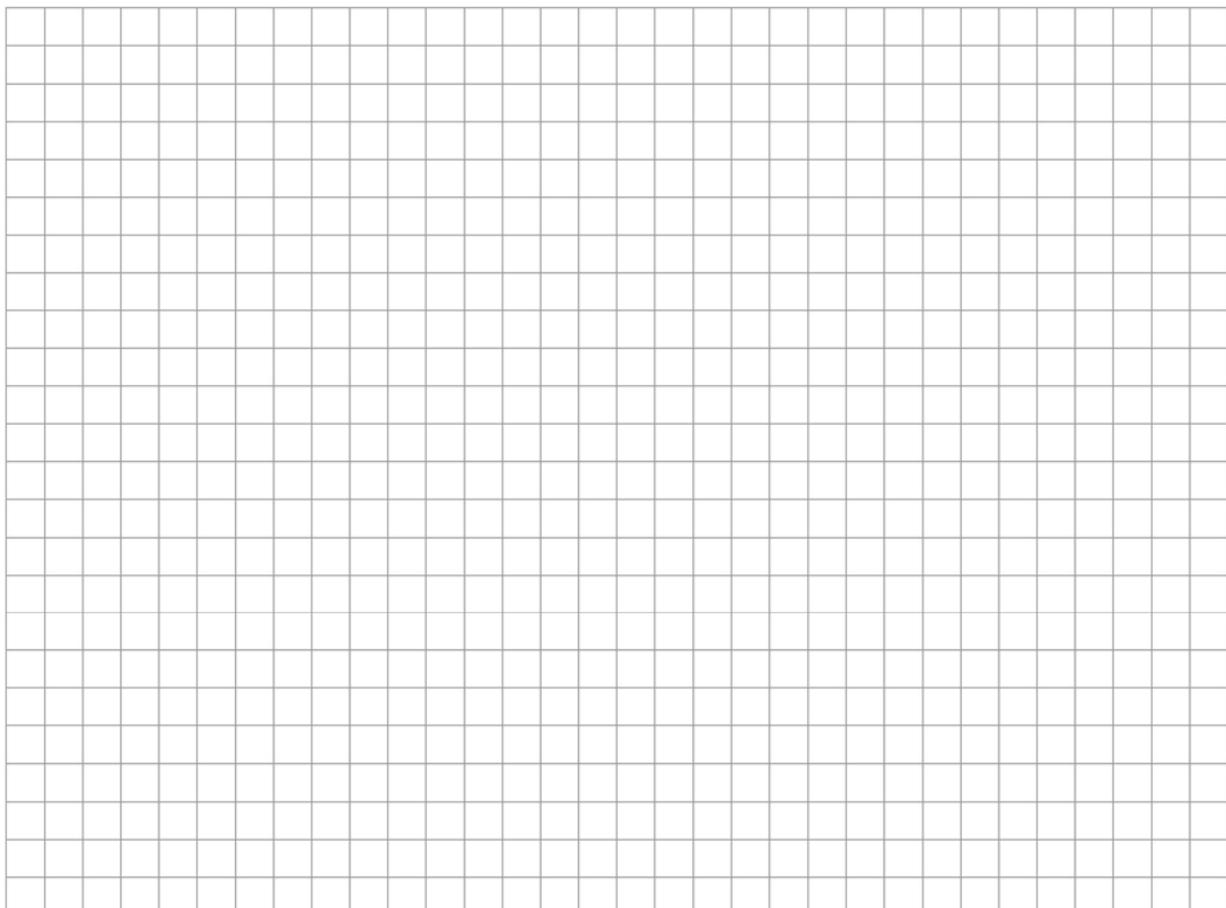
Zuordnung von Modellverteilungen und Merkmalsarten



Merkmalsart		Modellverteilung
Längenmaße		N
Form- und Lagetoleranzen	Symbol	
Geradheit	—	B1
Ebenheit	▭	B1
Rundheit	○	B1
Zylinderform	⊘	B1
Linienform	⌒	B1
Flächenform	⊔	B1
Parallelität	//	B1
Rechtwinkligkeit	⊥	B1
Neigung (Winkligkeit)	∠	B1
Position	⊕	B2
Koaxialität / Konzentrizität	⊙	B2
Symmetrie	≡	B1
Rundlauf	↻	B2

Auswahl nach C. Anghel,
H. Hausberger und
W. Streinz, QZ 37, 1992

Legende:
N: Normalverteilung
B1: Betragsverteilung 1. Art
B2: Betragsverteilung 2. Art
(Rayleigh-Verteilung)



Core Tools

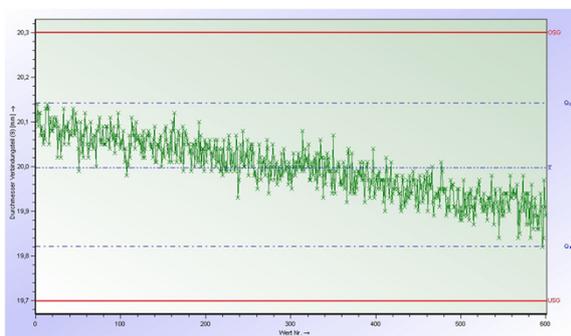
Mischverteilungen

Mischverteilungen entstehen aus Verteilungen mit nicht stationären Mittelwerten.

Die wichtigsten Fälle aus der Praxis:

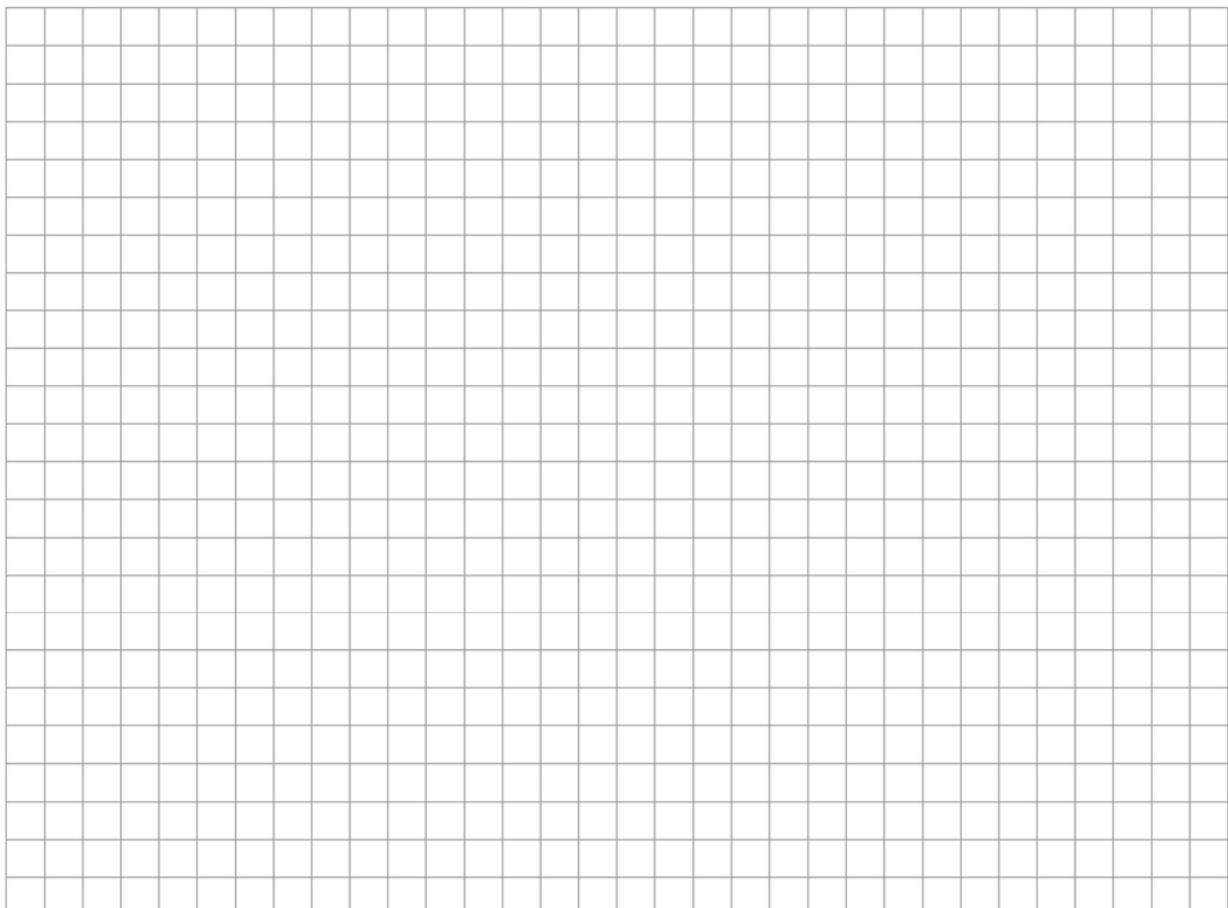
Trendprozesse

z. B. durch Werkzeugverschleiß
nimmt ein Maß langsam ab



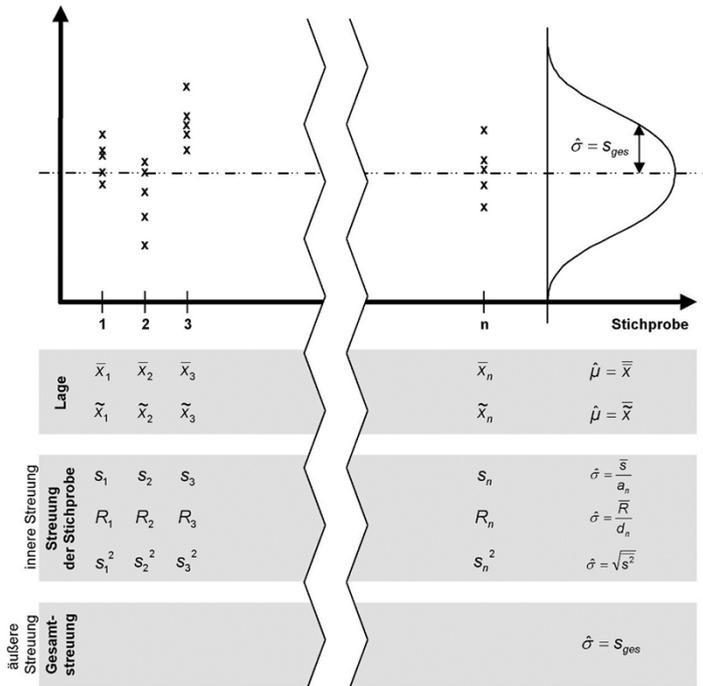
„Springende“ Mittelwerte

z. B. Maßänderungen bei
Chargenwechseln durch geringfügig
unterschiedliche Materialeigenschaften

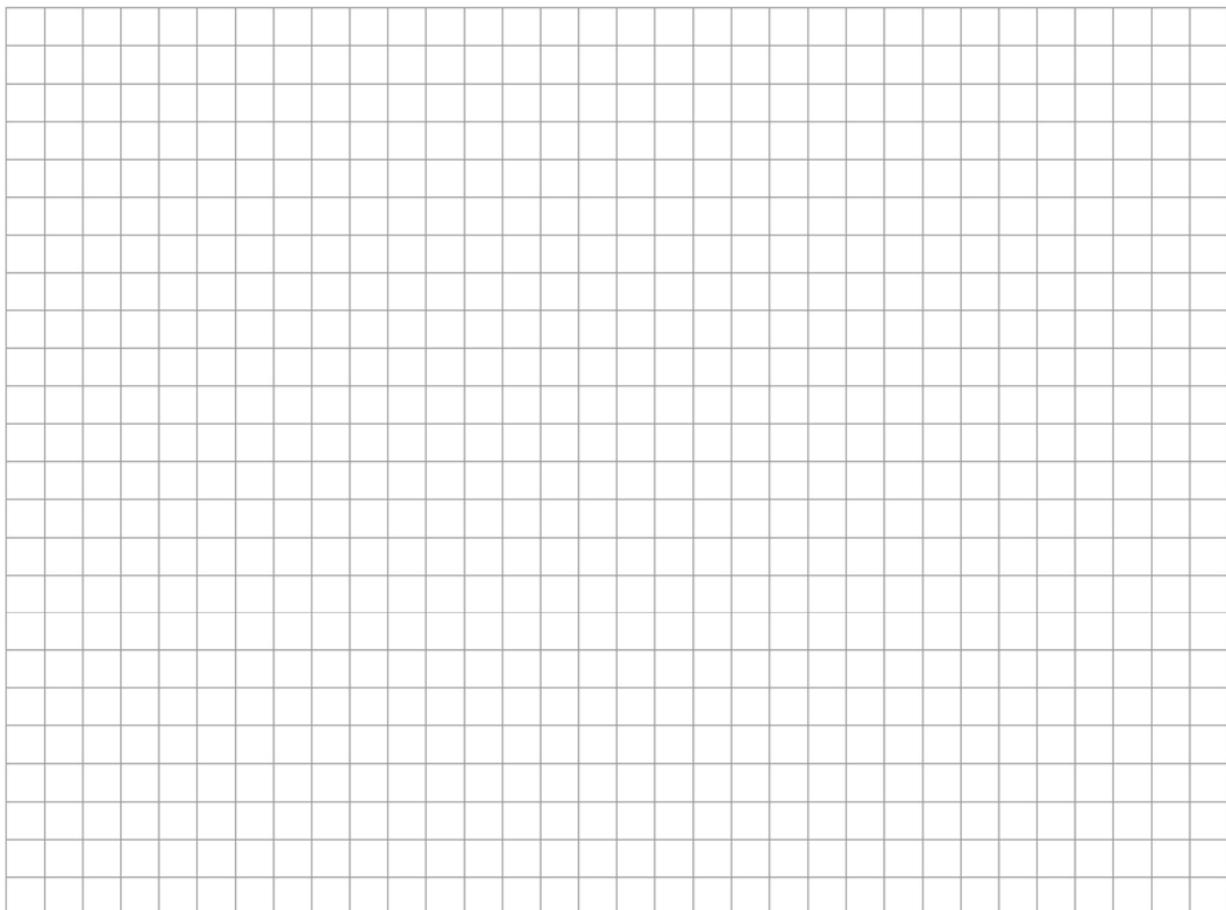


Core Tools

Schätzung der Lage- und Streuungsparameter



Anwendung, wenn die *äußere Streuung* (s_{ges}) groß ist im Vergleich zur *inneren Streuung*

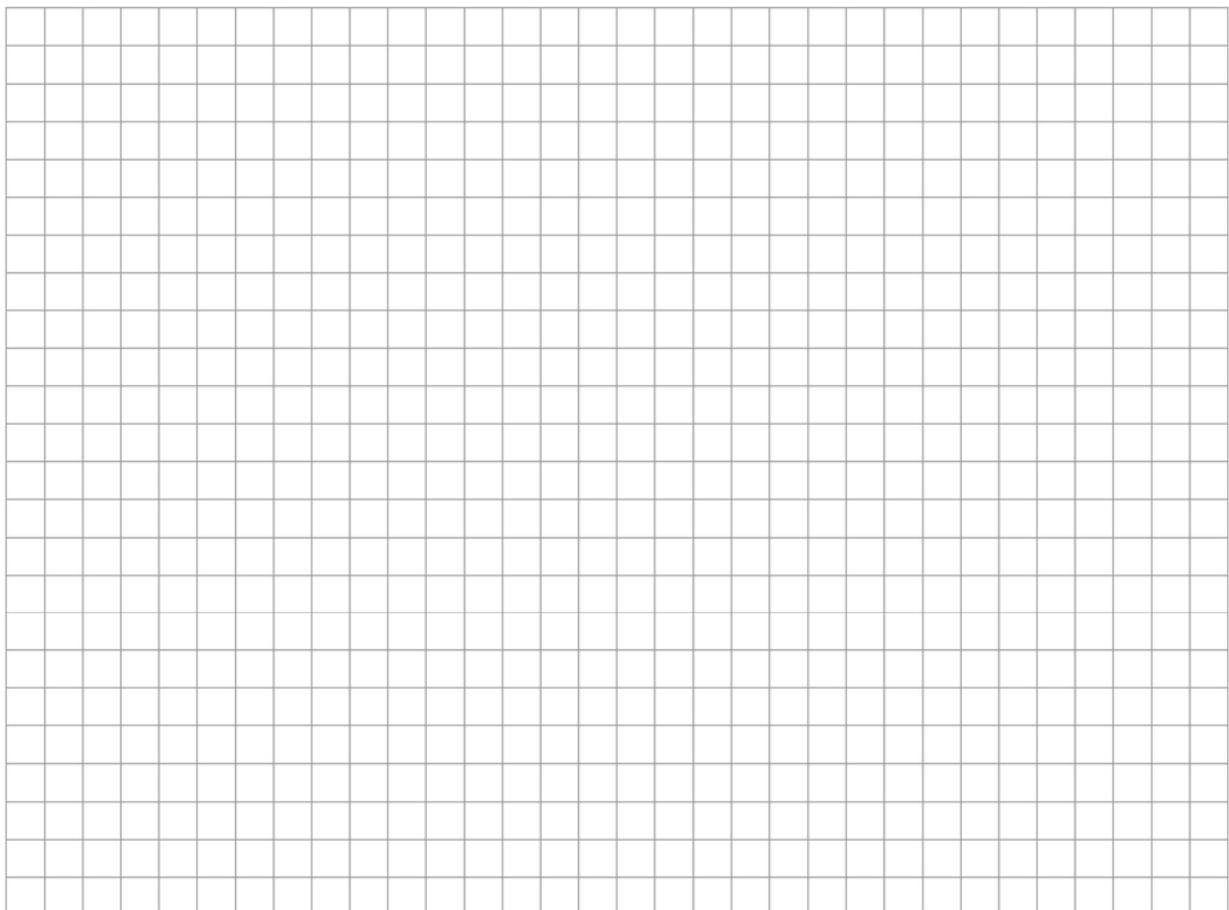
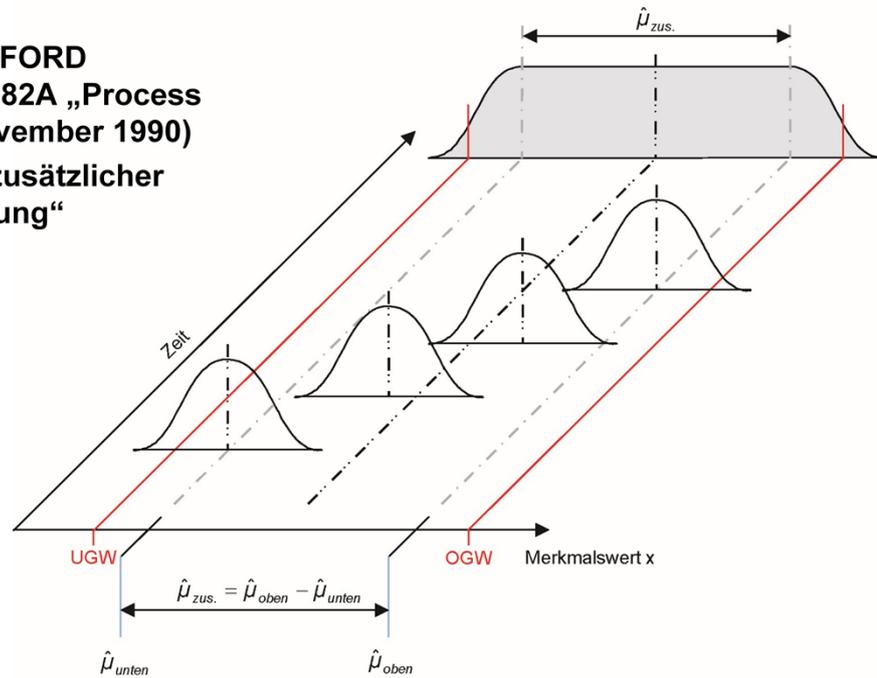


Core Tools

Erweiterung der Eingriffsgrenzen

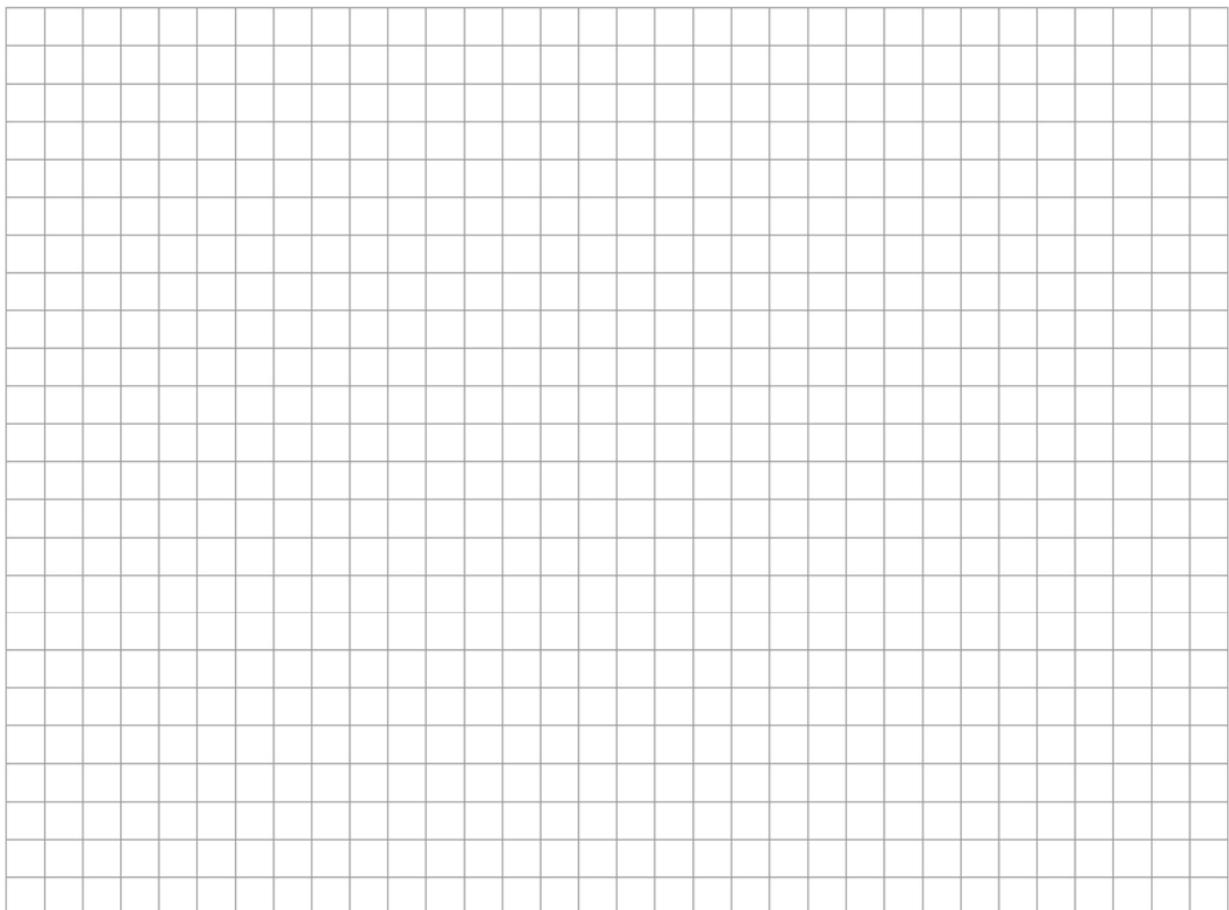
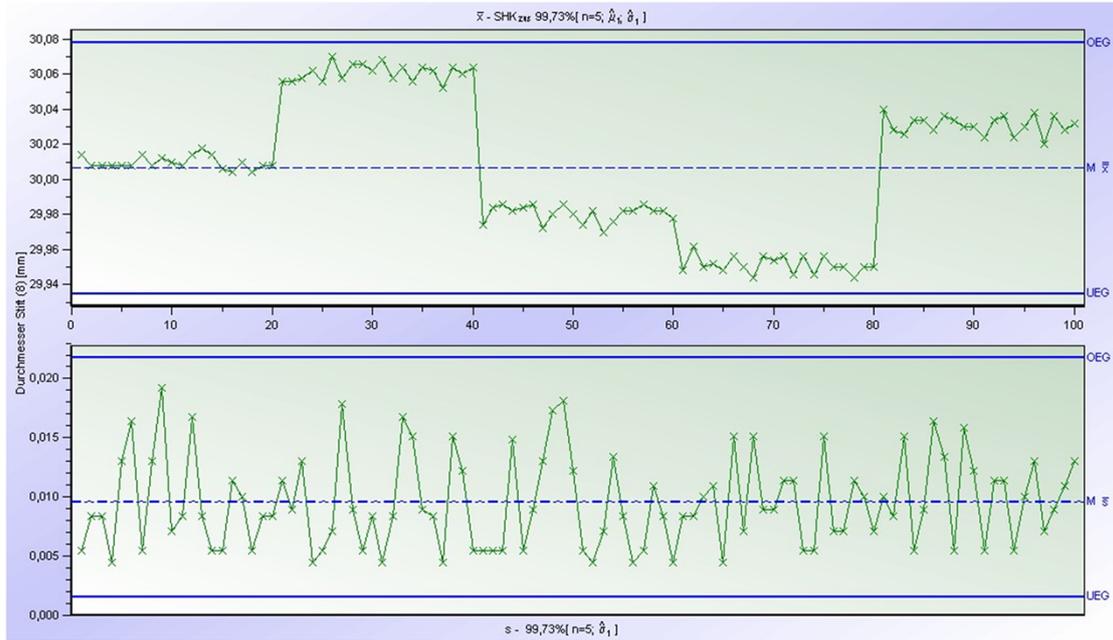


Eingeführt von FORD
(Guideline EU 882A „Process
Capability“, November 1990)
„Prozesse mit zusätzlicher
Mittelwertstreuung“



Core Tools

Shewhart-Regelkarte mit erweiterten Eingriffsgrenzen

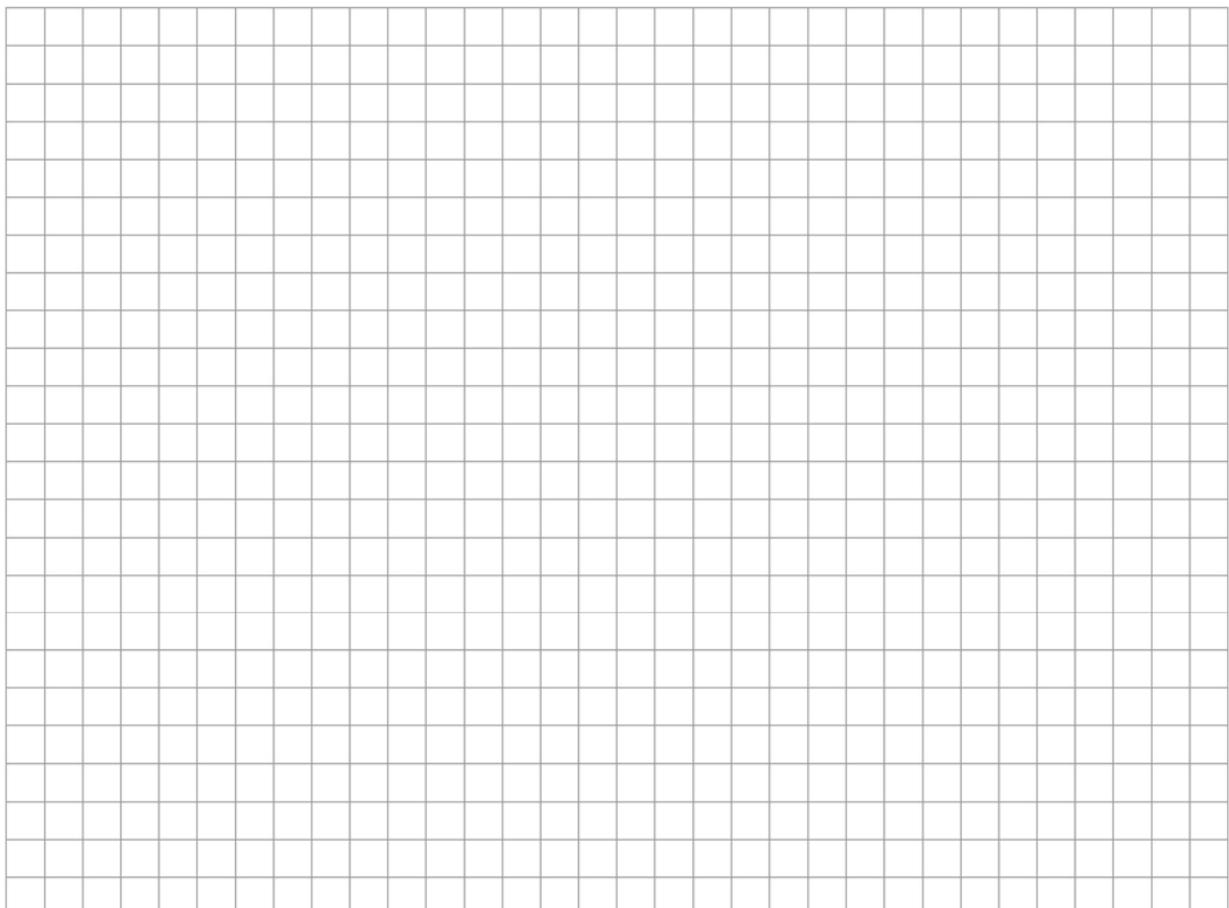
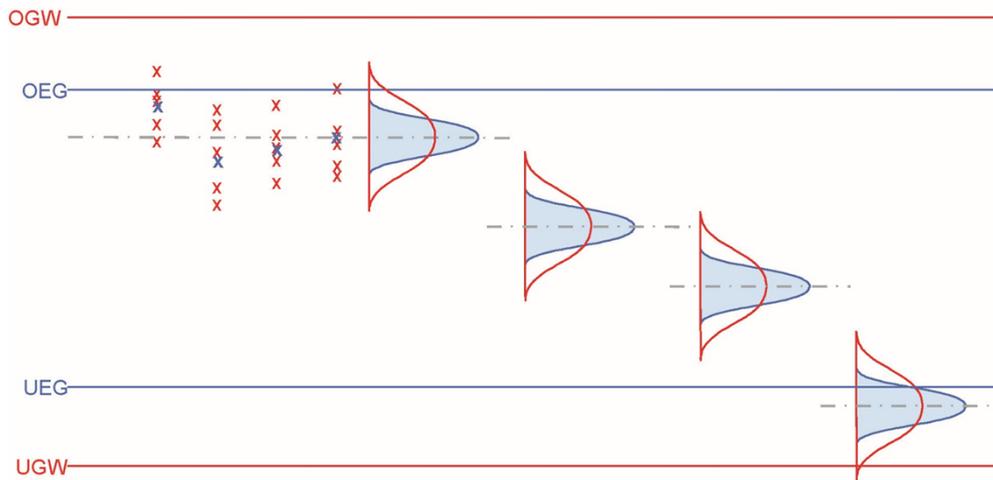


Core Tools

Annahmekarte

„Toleranzbezogene Regelkarte“

Die Eingriffsgrenzen werden von den Grenzwerten ausgehend berechnet („Sicherheitsabstand“)

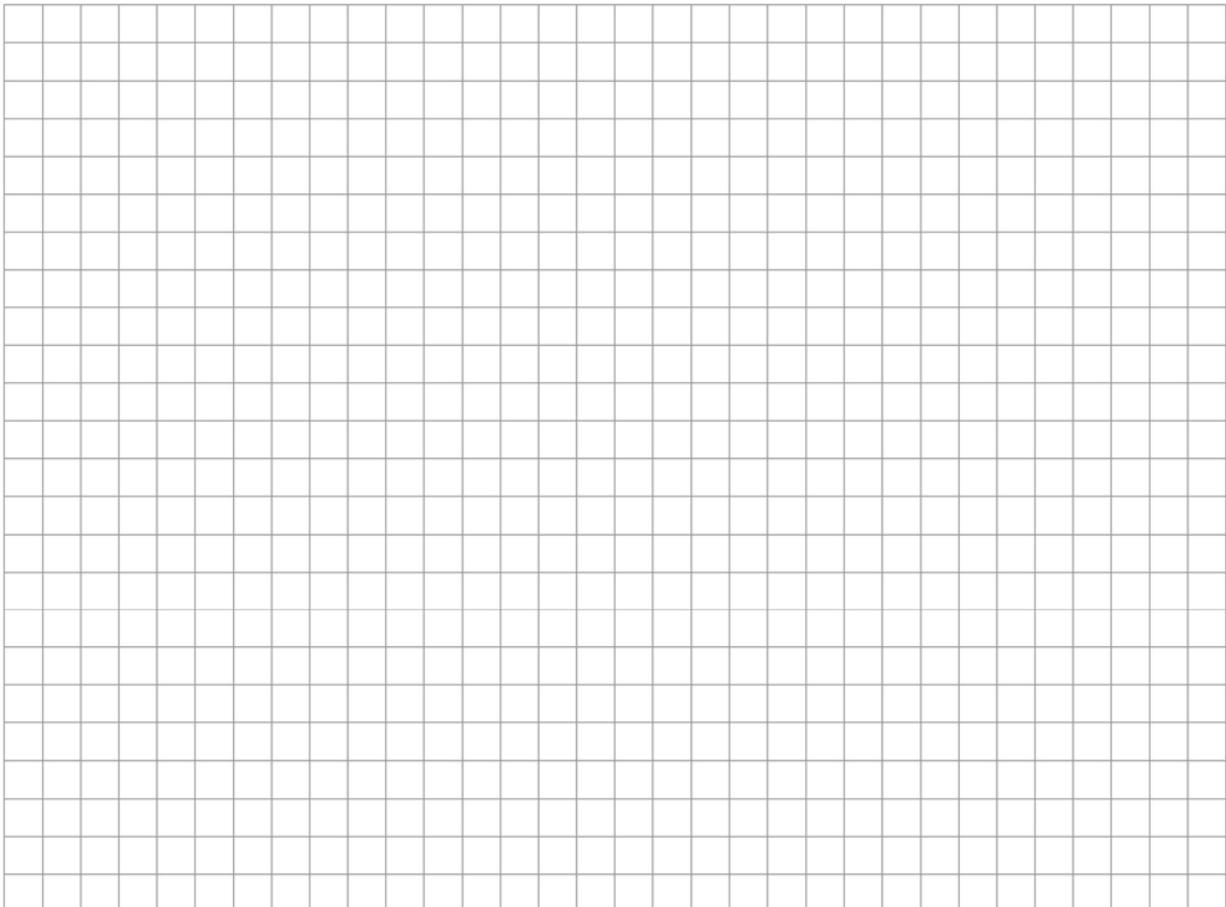
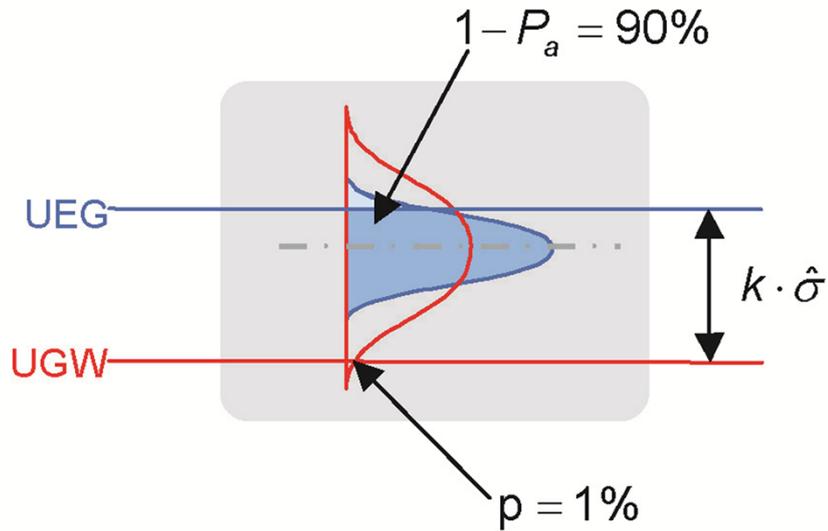


Core Tools

Annahmekarte

p : momentaner Überschreitungsanteil (1%)

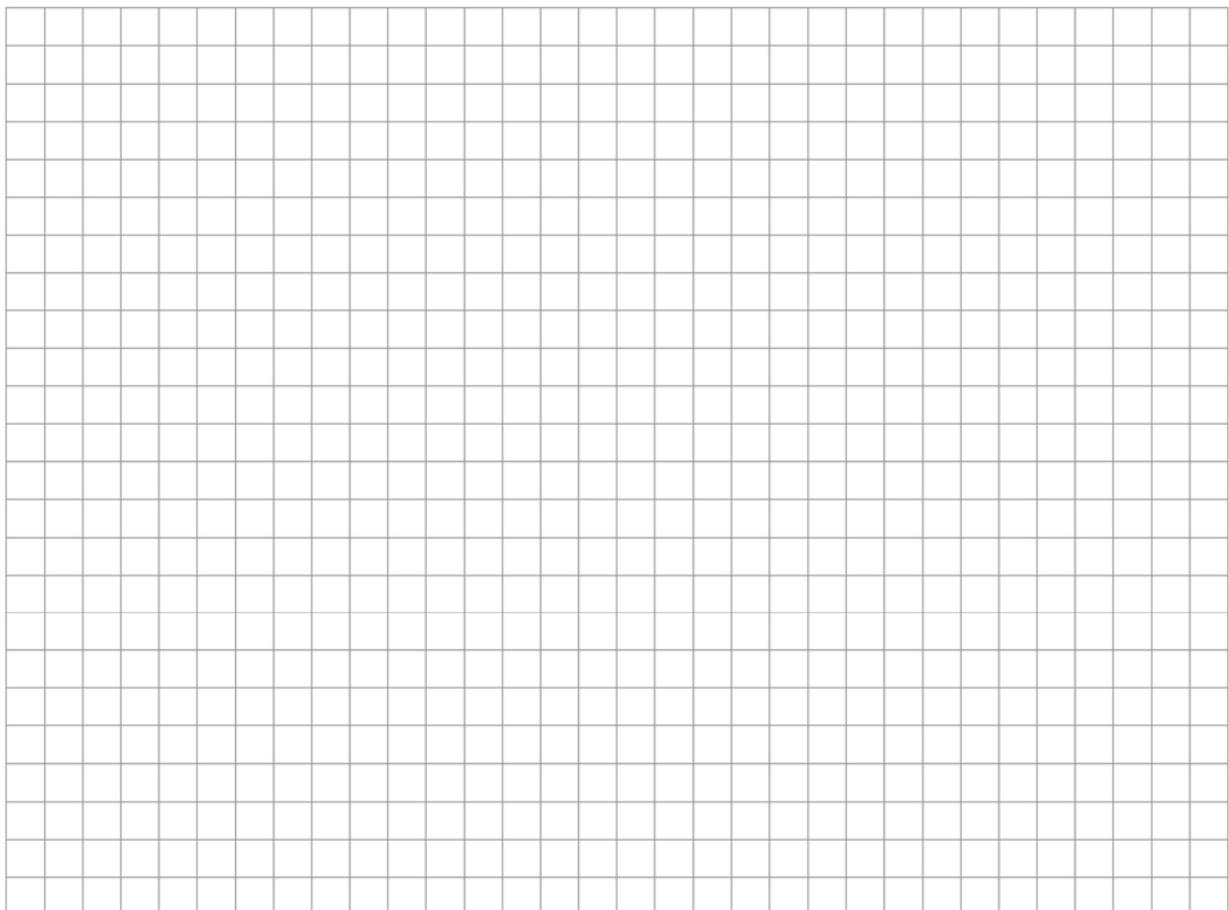
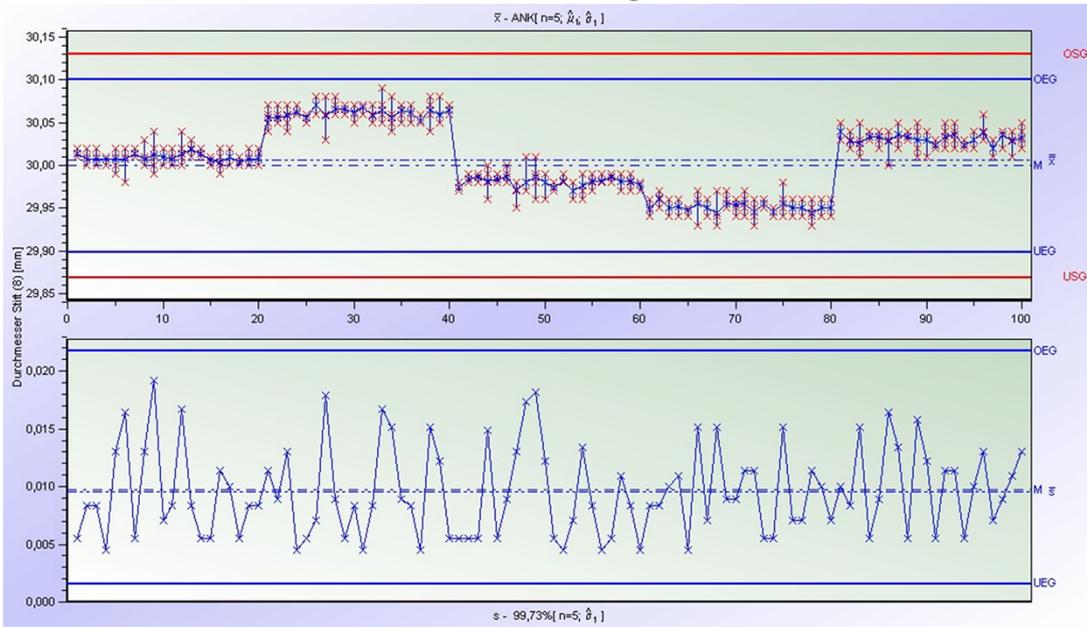
$1-P_a$: Eingriffswahrscheinlichkeit (90%)



Core Tools

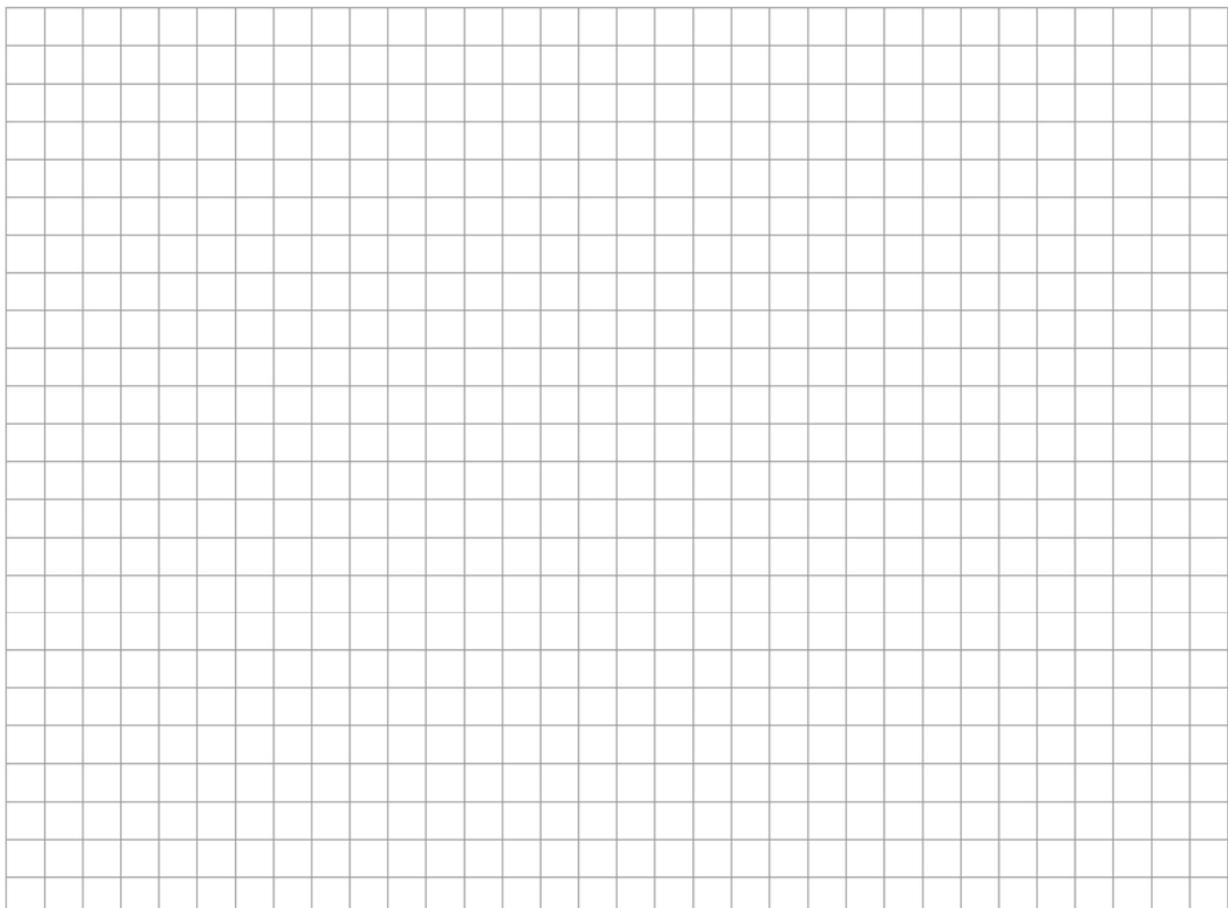
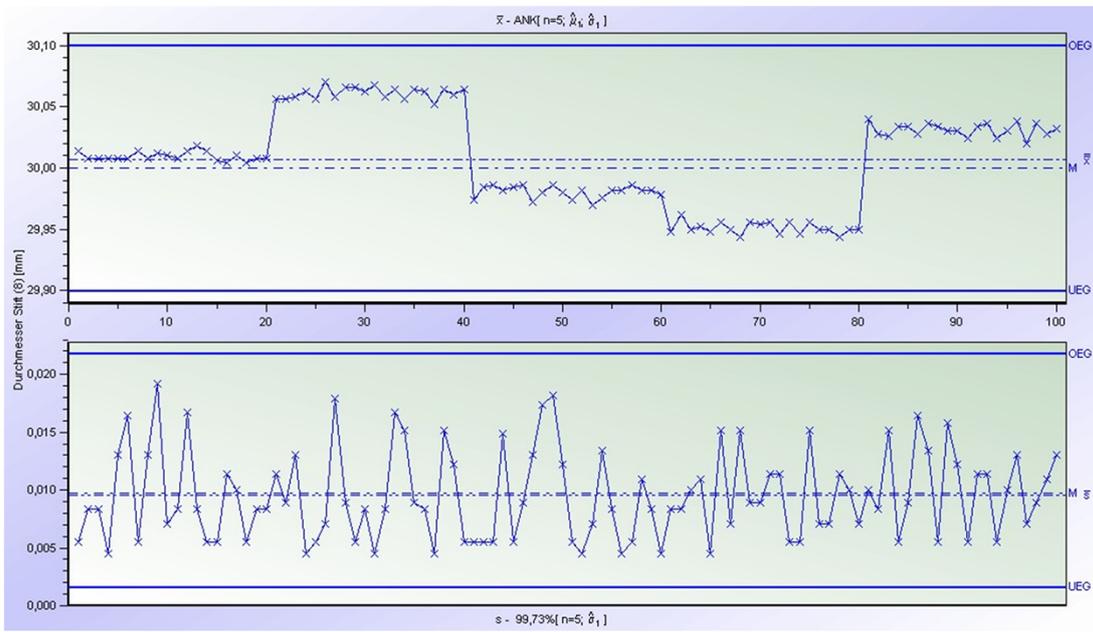
Annahmekarte

Annahmekarte mit Einzelwertdarstellung



Core Tools

Annahmekarte

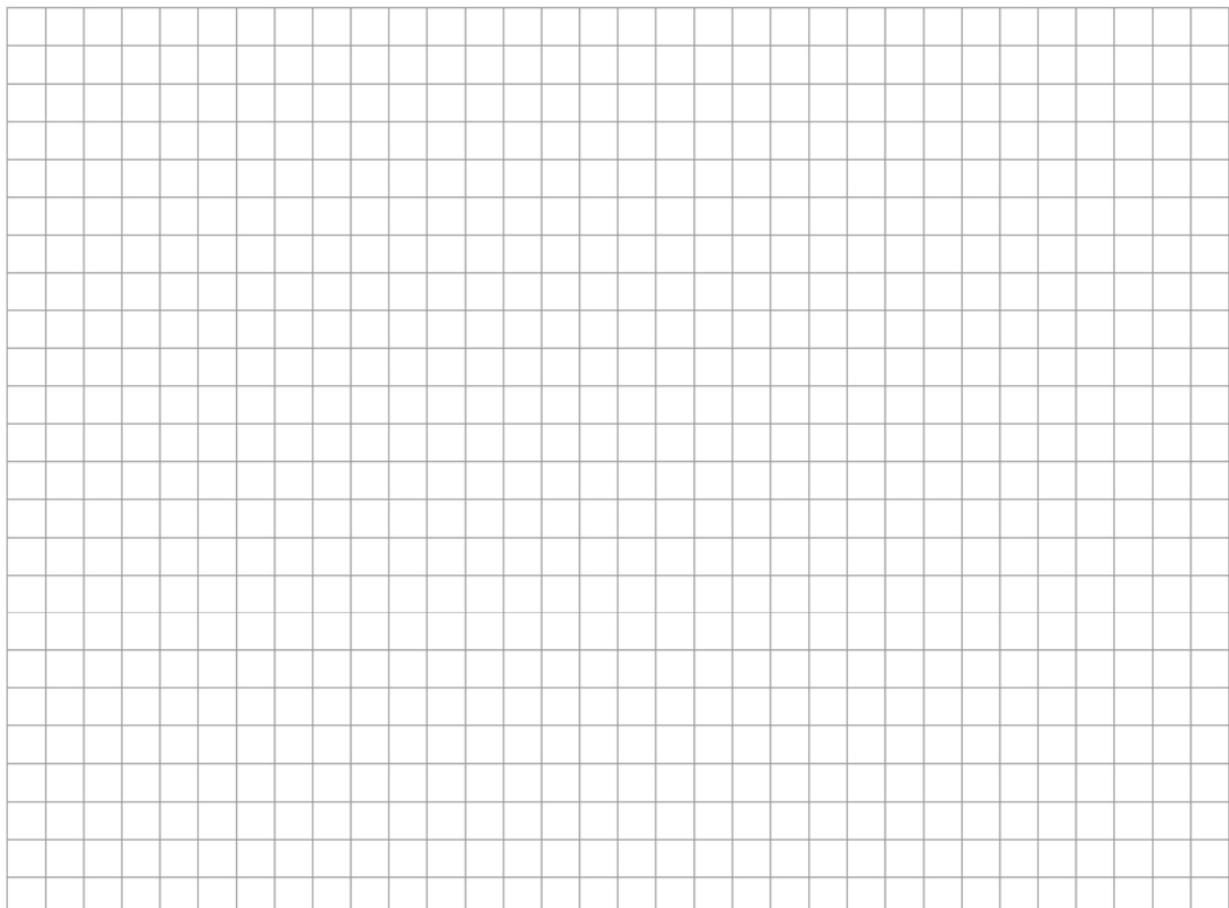


Core Tools

Stärken und Schwächen: Shewhart- vs. Annahmekarte

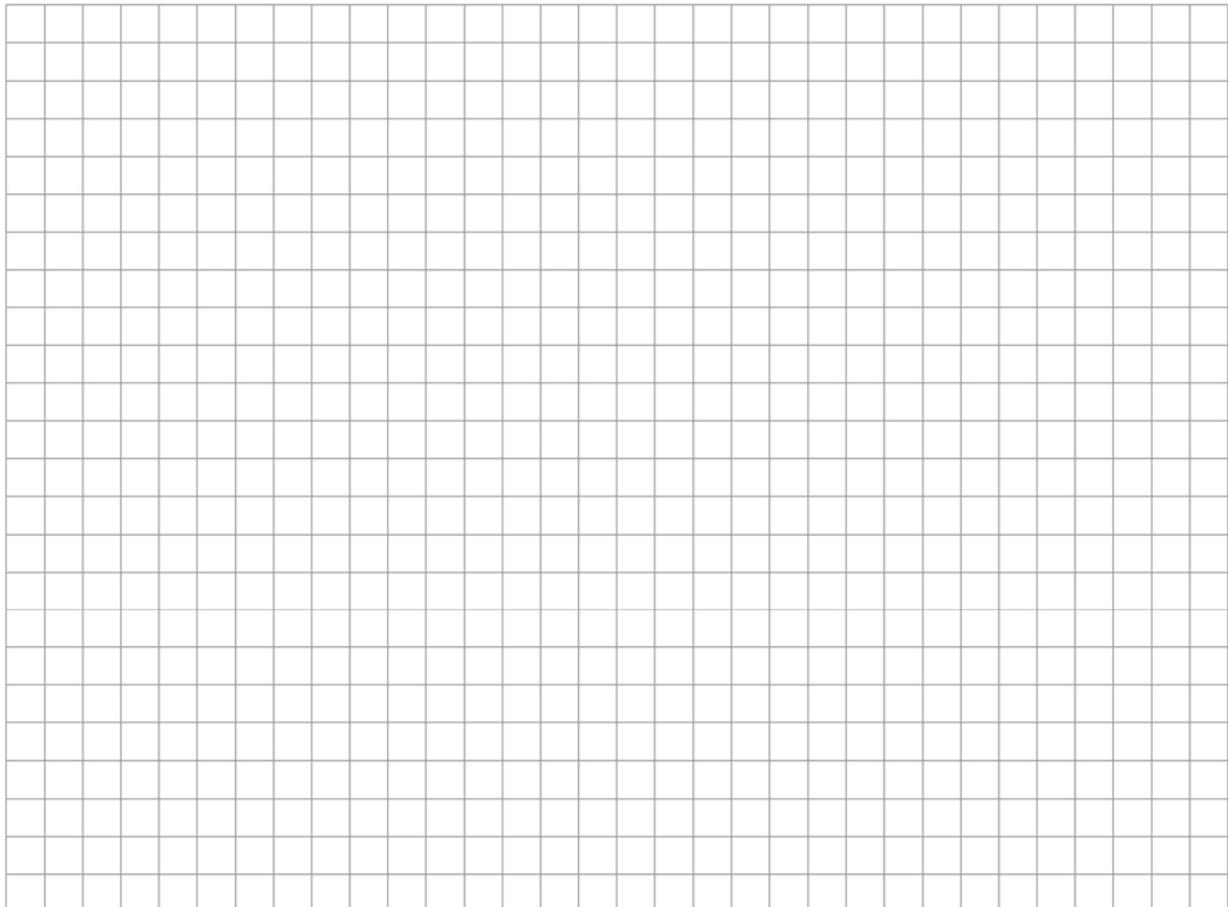
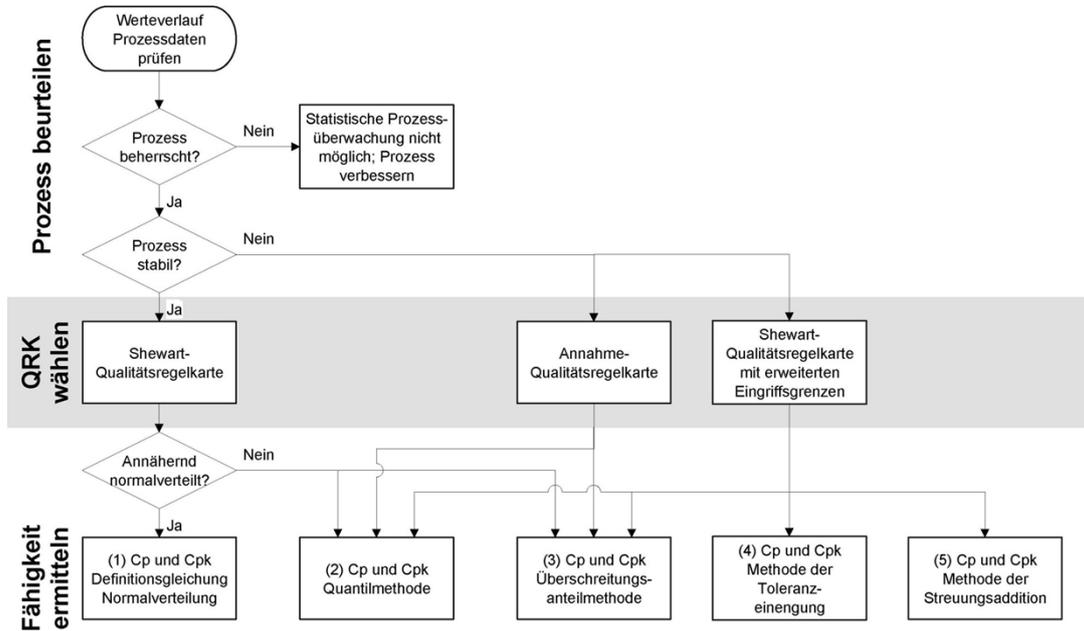


Shewhart-QRK mit erweiterten Eingriffsgrenzen		Annahme-QRK	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützt den Prozess der ständigen Verbesserung • Eingriffsgrenzen in hohem Maße beeinflussbar • Kann bei nicht stationären Prozessen eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Pflegeaufwand durch erforderliches Nachjustieren der Eingriffsgrenzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Pflegeaufwand • Kann bei nicht stationären Prozessen eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützt nicht den Prozess der ständigen Verbesserung • Eingriffsgrenzen nicht beeinflussbar (hängen von der Streuung ab) • Kleine momentane Überschreitungsanteile werden mit gewisser Wahrscheinlichkeit (i.d.R. 10 %) akzeptiert • Funktioniert nur bei kleiner Streuung: $\hat{\sigma} < \frac{1}{10}T \text{ bis } \frac{1}{12}T$



Core Tools

Bestimmung der Prozessfähigkeit



Core Tools

Core Tools Road Map: Serienproduktion

