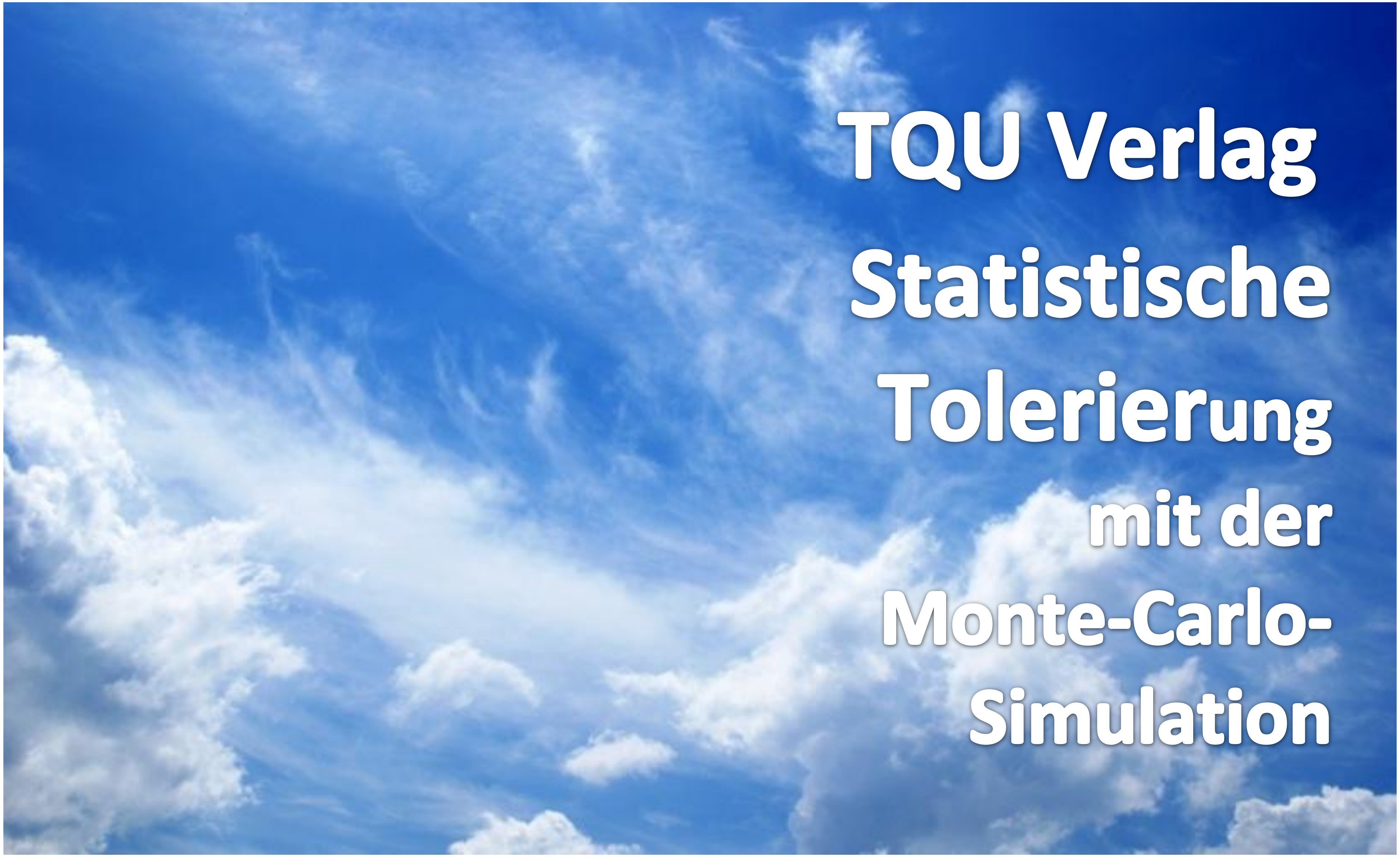

TQU Verlag
Statistische Tolerierung mit der Monte-Carlo-Simulation

QUALITY APPs Applikationen für das Qualitätsmanagement

Probieren und Studieren

Statistische Tolerierung mit Monte-Carlo-Simulation

Toleranzen mit Kenntnis der Streuung der Merkmale optimieren

Autor: Dr. Konrad Reuter

Viele Erzeugnisse des Maschinenbaues oder der Elektroindustrie sind aus Baugruppen oder Einzelteilen zusammengesetzt. Ergibt sich die Gesamtfunktion eines Erzeugnisses aus den Geometrien der beteilgten Elemente, entsteht eine Maßkette. Der Konstrukteur übernimmt die verantwortungsvolle Aufgabe, diese Maßkette so zu gestalten, dass die Gesamtfunktion optimal erfüllt werden kann. Eine Maßkette ist die Aneinanderreihung von Einzelmaßen Mi, die in einem technischen System zusammenwirken, und dem von ihnen abhängigen Schlussmaß M0. Die Maße M0 und Mi bilden bei ihrer schematischen Darstellung einen geschlossenen Linienzug (in Vektorversion).

Praktische Fertigungsprozesse unterliegen immer und grundsätzlich einer herstellbedingten Streuung. Sowohl die Eingangsgrößen (Input, Material) als auch die Prozessgrößen müssen als Variable aufgefasst werden (die bekannten 5-M). Dieser Tatsache trägt der Konstrukteur insoweit Rechnung, dass er für jedes in der Maßkette beteiligtes Geometrieelement eine zulässige Toleranz vorgibt. Werden diese Toleranzen von der Fertigung genutzt, überlagern sich die Streuungen und wirken im Schlussmaß M0 funktionswirksam. Hier ergibt sich ein typischer Zielkonflikt. Aus Funktionssicht (Konstruktion) sollten die Toleranzen möglichst klein, aus Kostensicht (Fertigung) sollten die Toleranzen möglichst groß sein. Nicht immer gelingt es, diesen Konflikt optimal zu beherrschen. Der Praktiker weiß, dass gelegentliche Toleranzüberschreitungen der Einzelmaße in der Kombination mehrerer Bauteile zu keinen merklichen Funktionsstörungen führen.

Offensichtlich enthält die übliche arithmetische Toleranzrechnung noch erhebliche Reserven. Die Grenzen dieser Methode werden immer dann erreicht, wenn hohe Funktionsanforderungen in Form enger Schlussmaßtoleranzen durch eine Vielzahl von Einzeltoleranzen erreicht werden müssen, die die Kosten der Herstellung oder Beschaffung der Bauteile nach oben treiben. Daraus folgt: Diese Toleranzrechnung ist zwar praktisch, aber aus mehreren Gründen unrealistisch. Ein Grund dafür ist die Extremwertbetrachtung (worst case), die der arithmetischen Toleranzrechnung zu Grunde liegt.

Die statistische Toleranzrechnung bietet immer dann, wenn es eng wird, eine wertvolle Alternative, die zulässigen Toleranzen der beteiligten Einzelmaße zu erweitern und praxistauglichere Fertigungsverfahren einzusetzen. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation ist es möglich, beliebige Verteilungen der Herstellprozesse zu simulieren und deren Auswirkung auf das Schlussmaß und die Gesamtfunktion abzuschätzen.

Dieses QUALITY APP bietet dem Konstrukteur die wichtige Möglichkeit, seine Toleranzarbeit erheblich zu verbessern. Mit den vom Autor realisierten Möglichkeiten erhält er ein hochwertiges Werkzeug zur Optimierung von Toleranzen. Er kann damit Kosten senken oder in besonders wichtigen Funktionen technologisches Neuland betreten. Das APP ist in Excel programmiert und kann sofort eingesetzt werden. Wertvolle Tipps zum Exceleinsatz ergänzen das attraktive Angebot. Dieses APP ist so gestaltet, dass interaktiv die Grundlagen der Tolerierung nach der Monte-Carlo-Methode verstanden und angewendet werden können.

Ansprechpartner: Dr. Konrad Reuter Telefon: 0171/6006604

TQU Verlag, Magirus-Deutz-Straße 18, 89077 Ulm Deutschland, Telefon 0731/14660200, verlag@tqu-group.com, www.tqu-verlag.com

QUALITY APPS Applikationen für das Qualitätsmanagement

Lizenzvereinbarung

Dieses Produkt "Statistische Tolerierung mit Monte-Carlo-Simulation" wurde vom Autor Dr. Konrad Reuter mit großem Aufwand und großer Sorgfalt hergestellt. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt (©). Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Weitergabe, der Übersetzung, des Kopierens, der Entnahme von Teilen oder der Speicherung bleiben vorbehalten.

Bei Fehlern, die zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Nutzung dieses Softwareproduktes führen, leisten wir kostenlos Ersatz. Beschreibungen und Funktionen verstehen sich als Beschreibung von Nutzungsmöglichkeiten und nicht als rechtsverbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften. Wir übernehmen keine Gewähr dafür, dass die angebotenen Lösungen für bestimmte vom Kunden beabsichtigte Zwecke geeignet sind.

Sie erklären sich damit einverstanden, dieses Produkt nur für Ihre eigene Arbeit und für die Information innerhalb Ihres Unternehmens zu verwenden. Sollten Sie es in anderer Form, insbesondere in Schulungs- und Informationsmaßnahmen bei anderen Unternehmen (Beratung, Schulungseinrichtung etc.) verwenden wollen, setzen Sie sich unbedingt vorher mit uns wegen einer entsprechenden Vereinbarung in Verbindung. Unsere Produkte werden kontinuierlich weiterentwickelt. Bitte melden Sie sich, wenn Sie ein Update wünschen.

Alle Ergebnisse basieren auf den vom Autor eingesetzten Formeln und müssen vom Anwender sorgfältig geprüft werden.
Die berechneten Ergebnisse sind als Hinweise und Anregungen zu verstehen.

Wir wünschen viel Spaß und Erfolg mit dieser Applikation

TQU Verlag, Magirus-Deutz-Straße 18, 89077 Ulm Deutschland, Telefon 0731/14660200, verlag@tqu-group.com, www.tqu-verlag.com

1. Statistik

1.1 Motivation

Blatt

Viele Erzeugnisse des Maschinenbaues oder der Elektroindustrie sind aus Baugruppen oder Einzelteilen zusammengesetzt. Die geometrische Funktionseigenschaft wird anschaulich durch eine **Verkettung der Einzelmaße** in der Montage dargestellt.

Eine **Maßkette** ist die Aneinanderreihung von tolerierten Einzelmaßen $\mathbf{M_i}$, die in einem technischen System zusammenwirken, und dem von ihnen abhängigen Schlussmaß $\mathbf{M_0}$. Die Maße $\mathbf{M_0}$ und $\mathbf{M_i}$ bilden bei ihrer schematischen Darstellung einen geschlossenen Linienzug (im Uhrzeigersinn).

Das **Schlussmaß $\mathbf{M_0}$** ist immer das Maß, bei dem sich die Toleranzen der übrigen Maße der Maßkette voll auswirken. Es ist immer linksgerichtet.

Das Schlussmaß ergibt sich nach der fertigungstechnischen Herstellung der Teile und deren Montage.
Dabei können Spiele oder Übermaße auftreten. Diese tragen das Nennmaß Null und werden demzufolge in Zeichnungen nicht extra angegeben.

Schlussmaße können:

abhängige Maße sein, deren Grenzmaße die Funktionsfähigkeit entscheidend bestimmen.

auch funktionsbestimmende Lageabweichungen sein.

Das Schlussmaß wird am Werkstück nicht unmittelbar gefertigt. Es ist das Resultat aus den Sollmaßen und Toleranzen der übrigen Maßkettenglieder.

Unter der Annahme, dass in der Maßkette nur lineare Glieder vorkommen die unabhängig sind, leitet sich aus der Toleranzfortpflanzung ab, dass die Richtung der Maße mit den sog. Richtungskoeffizienten $\mathbf{k_i}$ belegt werden. Diese Richtungskoeffizienten $\mathbf{k_i}$ nehmen unter den genannten Voraussetzungen nur die Werte +1 und –1 an. Zeichnung

Als statistisches Verfahren der Tolerierung wird häufig das RSS (root sum of squares) bezeichnet.
Hierbei werden lediglich die Toleranzen der Maßkette quadriert und aus der Summe die Wurzel gezogen.

Die Kenntnis der realen Fertigungsergebnisse in Form des Streuungsmodells bietet die Anknüpfung an die dargestellte eigentliche statistische Tolerierung.

1.2 Analyse von Streuungen

Aus der Sicht von Toleranzen sind Verteilungsgesetze von Zufallsgrößen und ihre Verknüpfungen in der Maßkette interessant. Aus Messungen erhält man empirische Häufigkeitsverteilungen, die mit dem Histogramm und statistischen Kennwerten beschrieben werden können.

Neben den bekannten Kennwerten von Zufallsgrößen wie Mittelwert und Standardabweichung sind auch die formbezogenen Kennwerte Schiefe und Kurtosis zu ermitteln und zu bewerten.

Kenntnisse und eine sachgerechte Anwendung von Hypothesentests zur Verteilungsanpassung sind erforderlich.

Liegen keine aktuellen Messergebnisse vor, können aus vergleichbaren bekannten Produkten und Prozessen realistische Annahmen zu Verteilungen vorgenommen werden.

1.3 Analyse von Korrelationen

Neben der Analyse der Streuung von messbaren Merkmalen steht als weitere wichtige Aufgabe die Analyse von Zusammenhängen zwischen diesen Merkmalen an.
Die grundsätzlichen Methoden dafür sind in den genannten APP's dargestellt.

Für den Fall der nachweislichen Unabhängigkeit der Variablen in der Maßkette, steht die folgende Methode mit der Benennung nach "Monte-Carlo" zur Verfügung (nach der Spielbank als Zufallsmaschine).

2 Tolerierung von Maßketten nach der Monte-Carlo-Methode

2.1 Grundsätze zur Methode

„Monte-Carlo-Simulation oder Monte-Carlo-Studie, auch: MC-Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente die Basis darstellen. Man versucht dann, aufgrund der Ergebnisse mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie analytisch unlösbare Probleme im mathematischem Kontext numerisch zu lösen." [WIKIPEDIA]

Das Simulationsverfahren benötigt Zufallszahlen, die bereits in der Tabellenkalkulation EXCEL leicht verfügbar sind.
Zufallszahlen werden in PC's von sog. Zufallszahlengeneratoren als Gleichverteilung innerhalb des Intervalls [0;1] erzeugt.

Dass es sich dabei nicht um „echte" Zufallszahlen, sondern um sog. „Pseudozufallszahlen“ handelt ist für die vorliegende Aufgabe weniger von Belang.
Zu bemerken ist, dass auch echte Zufallszahlengeneratoren preiswert zur Verfügung stehen.

Die Anwendung von gleichverteilten Zufallszahlen für die Simulation beliebiger Verteilungen erfordert die Kenntnis der jeweiligen **inversen** Verteilungen.

EXCEL stellt hierfür u.a. folgende Funktionen zur Verfügung :

bis EXCEL 2003	EXCEL 2010
NORMINV()	*NORM.INV()*
STANDNORMINV()	*NORM.S.INV()*
FINV()	*F.INV()*
TINV()	*T.INV()*
CHIINV()	*CHIQU.INV()*
LOGINV()	*LOGNORM.INV()*

Andere verwendete Verteilungen können mit Basisfunktionen von EXCEL erzeugt werden.

Der Umfang einer Simulation sollte nicht < 10.000 sein.

Simulationsläufe sollten wiederholt werden, um eine Information zur Streuung zu erhalten. Ein Verfahren zur Begrenzung der Wiederholungen (Abbruchkriterium) ist z.B. in GUM Supplement1 beschrieben.

Auswertung

Die vorliegenden Daten können mit EXCEL oder professionellen Statistikprogrammen ausgewertet werden.

Daten_S

In neueren Versionen von bekannten Statistikprogrammen stehen Monte-Carlo Module zur Verfügung.

Professionelle Simulationsprogramme für die Tolerierung arbeiten in der Regel nach dem Grundsatz der Unabhängigkeit der Variablen in der Maßkette.

Diese Annahme zu überpüfen ist Aufgabe in 1.3.
Über möglich Konsequenzen aus der Verletzung dieses Prinzips sollte man sich unbedingt Klarheit verschaffen.

2.2 Simulation geometrische Maßketten

Der Simulation geometrischer Maßketten liegt die Berechnung der Maßkette zugrunde, wie sie für die arithmetische Tolerierung abgeleitet wurde.

Die richtige Aufstellung der Maßkette aus der Zeichnung ist Voraussetzung für ein brauchbares Ergebnis.

Das arithmetische Schlussmaß $\mathbf{M_0}$ ergibt sich als Summenprodukt der Nennmaße $\mathbf{M_i}$ und der Richtungskoeffizienten $\mathbf{k_i}$.

Das Schlussmaß der Simulation ergibt sich als Summenprodukt der simulierten Maße und der Richtungskoeffizienten $\mathbf{k_i}$.

Falls das Merkmal nullbegrenzt ist (Lageabweichung), müssen in Mi und das untere Abmaß Null eingetragen werden.

2.3 Simulation physikalischer Maßketten

Die Methode der Simulation von geometrischen Maßketten kann leicht auf physikalische Maßketten übertragen werden.

Statt der Formel "SUMMENPRODUKT()" in der Zelle für das simulierte Schlussmaß muss die Formel für den physikalischen Zusammenhang eingegeben werden.

Als eine besondere Form der physikalischen Maßkette ist auch die Modellgleichung bei der Messunsicherheit zu betrachten (siehe GUM Supplement1).

2.4 Ablauf Simulation

Die vorliegende Simulation ist für 16 Variable und 10.000 Datensätze vorbereitet.
Nach Eintragung der erforderlichen Daten in "arithmetische Tolerierung" und
Zuweisung einer passenden Verteilung in "Berechnung"
aus "Formelsammlung" die zutreffende Zeile im roten Bereich kopieren
und in die passende Zeile bei "Simulation" einkopieren .
Verteilungsparameter passend eintragen (blaue Felder).
Simulation starten und eine kleine Zeit abwarten.

Berechnung

Anmerkung EXCEL

EXCEL berechnet nach jeder Simulation die Mappe komplett neu. Insofern ist es für die Rechenzeit vorteilhaft, wenn außer der eigentlichen Simulation keine weiteren Berechnungen laufen.

Es ist deshalb empfehlenswert, die Auswerteblätter mit umfangreicheren Berechnungen und die Grafiken auf externe Blätter "auszulagern" oder die Auswertung mit Statistikprogrammen vorzunehmen.

2.5 Verteilungsmodelle

Die folgenden Verteilungsmodelle sind vorbereitet und sollten ein breites Anwendungsspektrum abdecken. Berechnung

Einige Spalten mit Zwischenrechungen sind ausgeblendet.

Zur Verknüpfung mit der Prozessfähigkeit wird den Verteilungsmodellen als Hinweis ein Prozesstyp gemäß DIN ISO 21747 zugeordnet.

Normalverteilung

Mittelwert, angenommener Parameter μ oder Schätzwert x-quer

Standardabweichung, angenommener Parameter σ oder Schätzwert s

Prozesstyp A1

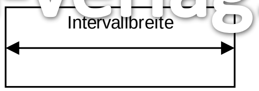
Six Sigma Prozess NV

Mittelwert, angenommener Parameter μ oder Schätzwert x-quer,

es wird eine Schwankung des Mittelwertes von +/- 1,5 Sigma erlaubt (Rechteckverteilung)

Standardabweichung, angenommener Parameter σ oder Schätzwert s

Prozesstyp C4

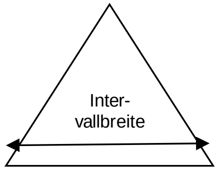


Rechteck oder Gleichverteilung

Mittelwert

Intervallbreite 2*a* ,

Prozesstyp A2

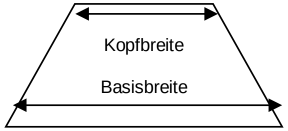


Dreieckverteilung

Mittelwert

Intervallbreite 2*a* ,

Prozesstyp A2



Trapezverteilung

Mittelwert

Kopfbreite 2*d*

Basisbreite 2*b*

Prozesstyp A2, eingeschränkt C3 oder C4

Weibullverteilung

Lageparameter *T* , dieser ist nicht identisch mit dem arithmetischen Mittelwert!

angenommener Parameter oder Schätzwert *T* -dach

Formparameter *b* , *b* > 0, *b* = 1 > Exponentialverteilung

angenommener Parameter oder Schätzwert *b* -dach

Schwellwert t_0 , Verschiebung des Nullpunktes (treshold)
angenommener Parameter oder Schätzwert t_0-dach

Prozesstyp A2

Rayleighverteilung

Lageparameter T, dieser ist nicht identisch mit dem Mittelwert!
angenommener Parameter oder Schätzwert T-dach
Die Rayleighverteilung ist ein Sonderfall der Weibullverteilung mit b = 2.
Die Verteilung ist nullbegrenzt, typisch für Rundlaufabweichungen.

Prozesstyp A2

Empirische Verteilung emp_Verteilun

Falls kein mathematisches Modell anwendbar ist, können vorliegende Histogramme verwendet werden.
Es sollten ausreichend Daten für das Histogramm vorliegen (> 100).
Die Häufigkeiten und die zugehörigen oberen Klassengrenzen sind einzutragen.

Prozesstyp D

Falls mehrere empirische Verteilungen benötigt werden, dann das Blatt "emp_Verteilung" mehrfach anlegen.

2.6 Auswertung

Das Blatt "Berechnung" liefert die Simulationsergebnisse zum Schlussmaß direkt. Berechnung

Damit ist der Vergleich zur arithmetischen Tolerierung und der Tolerierung nach RSS möglich.

Zu den Variablen X_i werden die Mittelwerte und Varianzen der Simulation berechnet. Auswertung

Die Anteile der Varianzen der Variablen X_i zur Gesamtvarianz wird als % ausgegeben (die Varianzen sind additiv).

Für das Schlussmaß $\mathbf{M_0}$ bzw. die Variablen $\mathbf{X_i}$ steht ein Histogramm zur Verfügung (Auswählen der Variablen ist möglich).

Die Ergebnisse jedes Laufes können manuell in die Tabelle "Simulationshistorie" übertragen werden. Auswertung

Das Diagramm demonstriert die Stabilität der Simulationsergebnisse.

Auf weitergehende Auswertungen wurde verzichtet.

3. EXCEL

3.1 Ablauf

Vor der Nutzung eine Sicherungskopie mit den Modelldaten anlegen.

Die Modelldaten löschen und Datei als EXCEL Vorlage ("name".xlt) speichern.

Im Weiteren diese Vorlagedatei verwenden.

Bei Änderungen die Änderungshistorie führen. Berechnung

Die Simulation ist für 16 Variable vorbereitet. Falls weniger Variable verwendet werden, wird den nicht zutreffenden Zellen ein leerer Text "" zugeordnet. Sie müssen nichts ändern.

Ein VBA Makro übernimmt die Wiederholung der Simulation und speichert deren Ergebnisse in das Blatt "Daten_S" . Daten_S

Das Makro wurde bewusst sehr simpel gehalten. "alt" "F11"

Der Simulationsumfang von 10.000 ist im Makro festgelegt und kann dort leicht geändert werden.

Soll die Anzahl der Variablen vergrößert werden, muss das Makro auf eine veränderte Zeilenzahl angepasst werden.

3.2 Formatierungen

Auf den Berechnungsblättern sind Tabellenfelder zur besseren Orientierung farbig unterlegt:

freie Eingabefelder
Beschriftungen
Ergebnisse (keine Einträge vornehmen), in der Regel gesperrt!

Berechnungen sind ohne feste Rundungen dargestellt.

Die Gitternetzlinien und Spalten/Zeilenüberschriften sowie einzelne Spalten sind auf den Blättern ggf. ausgeblendet.

Eingaben werden, wo sinnvoll, mit der Funktion "Gültigkeit" überwacht (z.B. die k-Faktoren).

3.3 Hinweis auf EXCEL Matrixfunktionen

Bei Anwendung von Matrixfunktionen muss der jeweilige Zellbereich komplett markiert werden.

Der Abschluss des Formelassistenten darf jetzt nicht durch den "OK" Button, sondern muss durch die Tastenkombination "strg", "shift", "enter" erfolgen

Als sichtbare Information wird die Formel durch EXCEL in der Eingabezeile in geschwungene Klammern gesetzt {}.

Matrixfunktionen können nur noch für den gesamten zutreffenden Bereich geändert werden

3.4 Hinweis auf EXCEL Zufallszahlen

Microsoft verwendet natürlich auch nur Pseudozufallszahlen, was für diese Anwendung nicht weiter hinderlich ist.

Hinderlich ist hingegen, dass EXCEL 2003 aus unerfindlichen Gründen gelegentlich auch einmal negative Zufallszahlen erzeugt. Deshalb wurde die Funktion ABS() eingebaut.

3.5 Hinweis auf EXCEL Szenarien

Excel ermöglicht das Speichern und Aufrufen von Eingabefeldern im Sinne eines Szenario. Menü : "Extras" "Szenarien"

Diese Eigenschaft ermöglicht Demonstrationen der Auswirkung von wesentlichen Änderungen ohne die geänderten Werte wieder manuell eingeben zu müssen.
Es ist weiter zu beachten, dass EXCEL feste Werte zurückgibt, also Formeln überschrieben werden.
Diese Funktionalität ist hier nicht verwendet worden.

3.6 Hinweis auf EXCEL Namen

Die Lösung verwendet vorzugsweise EXCEL Namen für Variable, Faktoren, Vektoren und Matrizen. Namen

Die verwendeten EXCEL Namen sind aufgelistet.

Die Liste der verwendeten Namen wird über die Funktionstaste F3 ausgegeben

4. empfehlenswerte Literatur

Jahn, W. Braun, L.: Praxisleitfaden Qualität -Prozessoptimierung mit multivariater Statistik in 150 Beispielen. Carl Hanser Verlag, München 2006

Trumpold, Beck, Richter: Toleranzsysteme und Toleranzdesign, Hanser-Verlag, 1997

Workbook "Moderne Methoden der Statistischen Tolerierung" , TQU Verlag 2007

QUALITY APP "Tolerierung_Multivariat", TQU Verlag 2012

QUALITY APP "Prozessfähigkeit_Multivariat", TQU Verlag 2013

JCGM 101:2008, Evaluation of measurement data - Supplement1 to the "Guide of the expression of uncertainty in measurement" Propagation of distributions using a Monte Carlo method

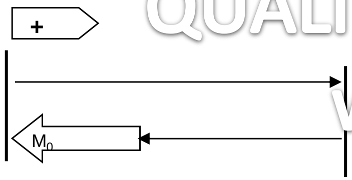
DIN ISO 21747:2007, Statistische Verfahren - Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale

TQU Verlag, Magirus-Deutz-Straße 18, 89077 Ulm Deutschland, Telefon 0731/14660200, verlag@tqu-group.com, www.tqu-verlag.com

Benennung	*Testteil*		
Merkmal M_0	*Testspiel*		
Zeichnungsnummer	*4711*	*Index*	*01*
Bearbeiter	*Reuter*	*geprüft*	*NN*
Datum erstellt	*27.06.2012*	*geprüft*	*28.06.2012*
Überschreitungswahrscheinlichkeit P(ü)	0,01%	100 ppm	für Statistik

Raum für Skizze / Kopie aus Zeichnung

Raum für Maßkettendarstellung



TQU Verlag, Magirus-Deutz-Straße 18, 89077 Ulm Deutschland, Telefon 0731/14660200, verlag@tqu-group.com, www.tqu-verlag.com

Benennung	Code	M_i	k_i	oberes | unteres Abmaß		G_i	K_i	C_i	T_i
	M_1	10	1	0,1	-0,1	10,100	9,900	10,000	0,200
	M_2	10	1	0,1	-0,1	10,100	9,900	10,000	0,200
	M_3	10	-1	0,1	-0,1	10,100	9,900	10,000	0,200
	M_4	10	-1	0,1	-0,1	10,100	9,900	10,000	0,200
	M_5	0	-1	0,05	0	0,050	0,000	0,025	0,050
	M_6	0	-1	0,05	0	0,050	0,000	0,025	0,050
	M_7								
	M_8								
	[illegible]								
	[illegible]								
	M_11								
	M_12								
	M_13								
	M_14								
	M_15								
	M_16								

Schlussmaß	M_0	0	*-1*		Summen -k	20,300	19,800	20,050	0,500
mittleres Übermaß	C_0	-0,050	*Ergebnis Simulation*	-0,045	Summen +k	20,200	19,800	20,000	0,400
Passtoleranz	T_0	0,900		0,832				RSS	0,406
Kleinstübermaß	G_0	0,400		0,370					
Größtübermaß	K_0	-0,500		-0,463					

Verteilung	Lage/ Scale	Form/ Shape		M_s	cp	cpk
Normal	10	0,1		9,9289	0,33	0,33
Rechteck	10	0,1		######		
Dreieck	10	0,1	9,95	######		
Trapez	10	0,04	0,12	######	4,994	5,037
Weibull	0,025	2	0	0,0271		
Rayleigh	0,025			0,0169		
	simuliertes Schlussmaß			-0,1455		

	Standardabweichung	s_{M0}	0,111
Statistische	Wert <= 100 ppm	x_u	-0,458
Ergebnisse	Wert > 100 ppm	x_o	0,368
auf Basis	Anteil in ppm	$<=K_0$	83
Normalverteilung von M_0	Anteil in ppm	$>G_0$	93

Legende zu Verteilungen

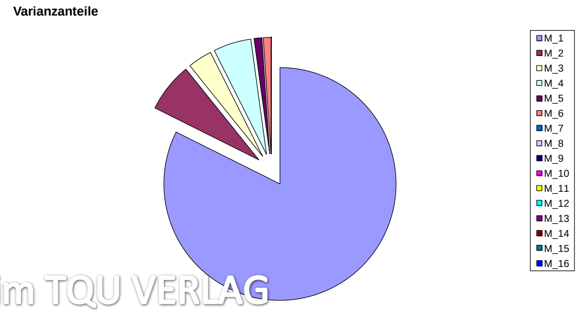
Lage / Scale	***Form/Shape***
Mittelwert μ	*Standardabweichung σ*
Mittelwert μ	*Standardabweichung σ*
Mittelwert	*Intervallbreite 2a*
Mittelwert	*Intervallbreite 2a*
Mittelwert	*Basis 2b | Kopfbreite 2d*
Lageparameter T	*Exponent b | Schwelle t_0*
Lageparameter T	

Formelsammlung zur Simulation

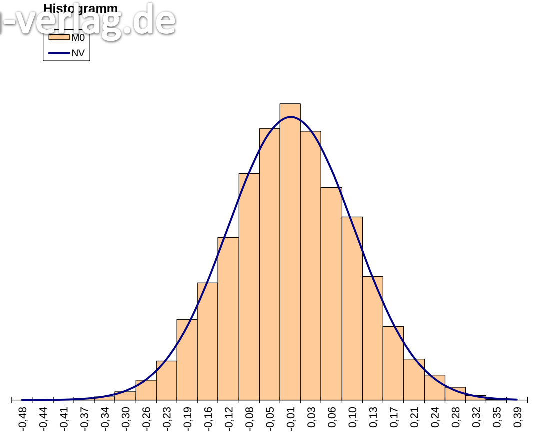
Typ	Verteilung	Scale	Shape		Formel	cp	cpk
A1	Normal						
C4	Six Sigma						
A2	Rechteck						
A2	Dreieck						
C3/C4	Trapez						
A2	Weibull						
A2	Rayleigh						
D	Empirisch				0,485		

Prozesstyp
Zuordnung gemäß ISO 21749

Code	Mittelwert	Varianz	Min	Max	Varianz %
M_1	9,999013425	0,010109331	9,593656998	10,38138946	82,1%
M_2	10,00028887	0,000840707	9,950036799	10,04997773	6,8%
M_3	10,00011911	0,000413263	9,950351828	10,0489266	3,4%
M_4	9,999987393	0,000646018	9,941265082	10,0598108	5,2%
M_5	0,022103119	0,000133701	0,000277699	0,0739655	1,1%
M_6	0,022104238	0,000132082	7,87222E-05	0,073316433	1,1%
M_7					
M_8					
M_9					
M_10					
M_11					
M_12					
M_13					
M_14					
M_15					
M_16					
M0	**-0,045011561**	**[illegible]**	**[illegible]**	**[illegible]**	

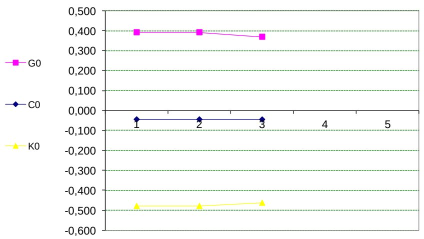


erste Klassen-grenze	-0,4628	Klasse n-weite	0,03619	[illegible]	[illegible]
M0	**Klassen-grenze**	**Klasse n-mitte**	**absolute Häufigkei**	**relative Häufigkeit**	**f(x)**
1	-0,498975146	-0,48	0	0	1,525E-05
2	-0,462788187	-0,44	1	0,0001	5,792E-05
3	-0,426601227	-0,41	1	0,0001	0,0001978
4	-0,390414267	-0,37	7	0,0007	0,0006073
5	-0,354227307	-0,34	16	0,0016	0,0016766
6	-0,318040348	-0,30	40	0,004	0,0041612
7	-0,281853388	-0,26	92	0,0092	0,0092856
8	-0,245666428	-0,23	180	0,018	0,0186295
9	-0,209479469	-0,19	371	0,0371	0,0336039
10	-0,173292509	-0,16	540	0,054	0,0544976
11	-0,137105549	-0,12	748	0,0748	0,0794625
12	-0,100918589	-0,08	1042	0,1042	0,1041706
13	-0,06473163	-0,05	1247	0,1247	0,1227793
14	-0,02854467	-0,01	1362	0,1362	0,1301078
15	0,00764229	0,03	1235	0,1235	0,1239592
16	0,043829249	0,06	977	0,0977	0,1061823
17	0,080016209	0,10	842	0,0842	0,0817755
18	0,116203169	0,13	568	0,0568	0,0566228
19	0,152390129	0,17	340	0,034	0,0352499
20	0,188577088	0,21	188	0,0188	0,0197298
21	0,224764048	0,24	115	0,0115	0,0099285
22	0,260951008	0,28	61	0,0061	0,004492
23	0,297137968	0,32	21	0,0021	0,0018273
24	0,333324927	0,35	5	0,0005	0,0006683
25	0,369511887	0,39	1	0,0001	0,0002197



Simulationshistorie

Simulationsläufe	M_0	Lauf 1	Lauf 2	Lauf 3	Lauf 4	Lauf 5
mittleres Übermaß	C_0	-0,0445	-0,0445	-0,0450		
Passtoleranz	T_0	0,8711	0,8711	0,8323		
Kleinstübermaß	G_0	0,3923	0,3923	0,3695		
Größtübermaß	K_0	-0,4788	-0,4788	-0,4628		



empirische Verteilung			
Klassen	*Einzel-häufigkeit*	*Summen-häufigkeit*	*Klassen-grenzen*
1	0,0%	0,0%	0,479
2	1,6%	1,6%	0,483
3	4,8%	6,4%	0,487
4	8,0%	14,4%	0,491
5	11,2%	25,6%	0,495
6	17,6%	43,2%	0,499
7	12,8%	56,0%	0,503
8	12,8%	68,8%	0,507
9	12,8%	81,6%	[illegible]
10	9,6%	91,2%	0,515
11	6,4%	97,6%	0,519
12	2,4%	100,0%	0,523
13		100,0%	
14		100,0%	
15		100,0%	
16		100,0%	
17		100,0%	
18		100,0%	
19		100,0%	
20		100,0%	
			0,002