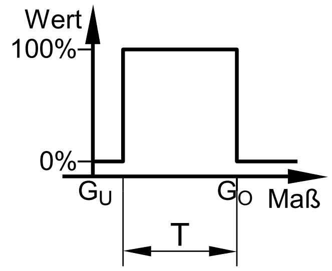
1 Problemstellung



Definition von Qualität durch eine Toleranz T

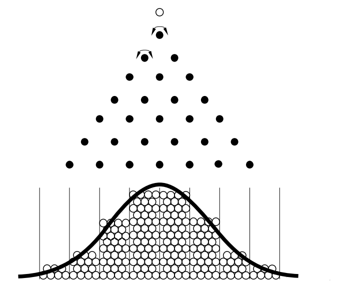
Auch industriell gefertigte Produkte sind nie vollkommen identisch, sondern variieren in ihren Merkmalen ähnlich wie Naturprodukte, wenn auch nicht so stark. Deshalb muss nach jedem Verarbeitungsprozess entschieden werden, welche Produkte zur Weiterverwendung geeignet sind.

Klassisch legt man dazu Toleranzen fest. Liegt ein Merkmal innerhalb der Grenzwerte G_u und G_o, so wird es weiter verwendet (Fertigungsqualität 100%), liegt es außerhalb, wird es aussortiert (Fertigungsqualität 0%).

Diese Art der Auswahl war lange Zeit erfolgreich, obwohl sie den Eigenheiten der Fertigung, der Funktion und der Qualitätskontrolle nicht entgegenkommt. Dagegen lehnen sich statistische Tolerierungsmethoden an diese Eigenheiten an, optimieren die Fertigung und eröffnen neue Einsparpotenziale.

2 Grundlagen

2.1 Verteilung einer Fertigung

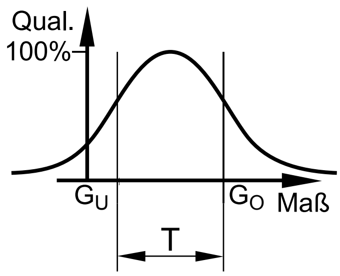

Kugeln, die durch Galtons Nagelbrett fallen, verteilen sich „normal“, ähnlich den Maßen nach einer Fertigung

Kugeln, die durch Galtons Nagelbrett fallen, werden an jedem Nagel zufällig nach links oder nach rechts abgelenkt. Die Summe der Ablenkungen bestimmt, in welches Fach die Kugel fällt. Lässt man sehr viele Kugeln über sehr viele Nägel fallen, bilden die Kugelstapel eine gaußsche Glockenkurve ab.

Carl Friedrich Gauß entdeckte diese Kurve, als er die Verteilung natürlicher Größen untersuchte[1], und interpretierte sie als das Ergebnis vieler kleiner Ablenkungen an vielen „Nägeln“ (Gene, Nährstoffe, Wetter, Konkurrenz, Schädlinge...). Das Mathematik-Genie erkannte, dass es sich um ein grundlegendes Prinzip handelt und entwickelte dazu die Mathematik der (Standard-) Normalverteilung.

Auch Fertigungsprozesse unterliegen kleinen Ablenkungen (Lagerspiel, Temperatur, Material..), deshalb ist ihr Ergebnis häufig normalverteilt[2].

2.2 Nutzwert bzw. Funktionsqualität



Funktionsqualität

Ein Widerstand mit dem Sollwert 100±5 Ω funktioniert mit genau 100 Ω am besten (Funktionsqualität 100%). Liegt er darüber oder darunter, sinkt seine Funktionsqualität mit der Abweichung vom Sollwert, und aber selbst wenn er außerhalb der Toleranz liegt, wird ein Widerstand nicht völlig unbrauchbar sein.

Stellt man die Qualität im Sinne von Nutzwert eines Widerstandes abhängig vom Istwert dar, erhält man wieder eine Kurve, die der Glockenkurve ähnelt.

2.3 Kontrollierbarkeit

Bei der Prüfung der Widerstandswerte (Merkmale) haben klassische Toleranzen Nachteile:

– Jede Verteilung innerhalb der Toleranz ist zulässig, deshalb kann man aus der Verteilung einer Stichprobe keine Schlüsse auf den Rest der Fertigung ziehen. Liegen alle Teile einer Stichprobe an der oberen Toleranzgrenze, weiß man nicht, ob alle Teile ebenda liegen oder ob die Stichprobe nur zufällig solche Teile traf.

– Will man sicher gehen, muss man alle Teile prüfen, aber 100%-Prüfungen sind teuer. Außerdem haben manuelle Prüfungen erfahrungsgemäß eine Fehlerquote von 0,5%, sind also ganz und gar nicht sicher.

Dagegen kann man mit einer statistisch abgesicherten Stichprobe gut auf die Verteilung der restlichen Fertigung schließen und erhält mit weniger Aufwand mehr Zuverlässigkeit (als durch manuelle 100%-Prüfung).

2.4 Schlussfolgerung

Da ein Verteilungsmodell für Fertigung, Funktion und Qualitätskontrolle besser geeignet ist, sollte man es auch anwenden.

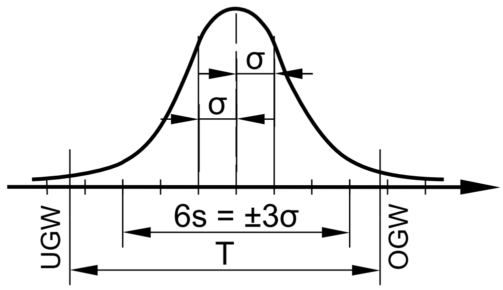
1 Daniel Kehlmann: Die Vermessung der Welt, nennt als Beispiel für Gauß' Untersuchungen die Durchmesser von Nüssen.

2 In der Praxis geregelter Prozesse (CNC-Maschinen) gilt das nur eingeschränkt oder es liegen andere Verteilungen vor, z.B. nach Weibull, aber das kann in der Grundlagenausbildung vernachlässigt werden.

3 Statistisches Toleranzsystem

Verlangt man für ein Produktmerkmal eine bestimmte Verteilung, müssen die Verteilungsart und ihre geforderten Parameter angeben werden. Die Parameter einer Normalverteilung sind der Mittelwert μ bzw. $\bar{x}$ (x-quer) und die Standardabweichung σ bzw. s[1]. In einer Zeichnung findet man diese Angaben zwar nicht direkt, kann sie aber aus der Forderung nach "6-Sigma-Fertigung" erschließen.

3.1 6-Sigma-Fertigung[2]



6-Sigma liegen innerhalb der Toleranz T

Der kleine griechische Buchstabe σ (Sigma) ist ein Formelzeichen für die Standardabweichung der Normalverteilung (siehe Bild), die ein Maß dafür ist, wie stark die Fertigung streut.

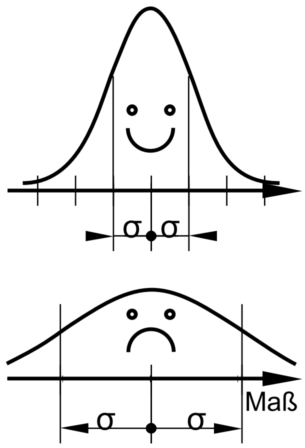
Die Forderung nach 6-Sigma bedeutet, dass die Standardabweichung der Fertigung mindestens 6 mal in die Toleranz passen muss. Man kann also aus der Toleranz ausrechnen, wie groß die Streuung einer Maschine höchstens sein darf.

Für die Fertigung bedeutet 6-Sigma, dass die Toleranz nicht mehr beliebig ausgenutzt werden darf, sondern ca. 2/3 der Fertigung im mittleren Drittel der Toleranz liegen müssen. Im Gegenzug nimmt man in Kauf, dass gelegentlich ein Teil außerhalb der Toleranzgrenzen liegt. Man spricht zwar von Null-Fehler-Fertigung, toleriert aber gewöhnlich 10 ppm Ausschuss.

3.2 Vorteile der 6-Sigma-Methode

Die Methode, die alten Toleranzangaben beizubehalten und das Verteilungsmodell per 6-Sigma-Forderung darüber zu stülpen, hat m.E. folgende Vorteile

- Alte Zeichnungen und Normen müssen nicht geändert werden.
- Zeichnungen bleiben auch für Einzelteile und Kleinserien gültig, für die ein Verteilungsmodell nicht brauchbar ist.



gute Streuung
schlechte Streuung

4 Verfahren der statistischen Prozesskontrolle

4.1 Prozessfähigkeitsuntersuchungen

Wenn unklar ist, ob ein Fertigungsprozess 6-Sigma (6-σ) innerhalb der geforderten Toleranz einhalten kann, werden vor Beginn der Fertigung Prozessfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Das Ergebnis wird als Prozessfähigkeitskennzahl c_p angegeben.

Dazu fertigt man eine <u>größere Serie</u> (mind. 125, besser 250 Teile) <u>unter Normalbedingungen</u>, misst die Teile und berechnet die Standardabweichung σ der Messwerte[3]. Aus der Toleranz T und der Standardabweichung σ berechnet man den Prozessfähigkeitsindex c_p mit der folgenden Formel.[4]

$$c_p = \frac{T}{6 \cdot \sigma}$$

Erfüllt die Fertigung 6-Sigma, dann wird c_p in dieser Formelgrößer als 1 ($c_p > 1{,}00$). Kleinere c_p -Werte bedeuten, dass der Prozess nicht fähig ist und 6-Sigma nicht erfüllt. Sind 8 oder mehr Sigma verlangt, verwendet man die gleiche Formel wie oben und erwartet $c_p > 1{,}33$ für 8-Sigma usw., siehe Tabelle rechts.

c_p >	c_m >	σ
1,00	1,33	6 σ
1,33	1,66	8 σ
1,66	2,00	10 σ
2,00	2,33	12 σ

Wie viele σ bedeuten die c-Werte?

Um Kosten zu sparen, führt man vorher eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung mit einer <u>kleinen Anzahl</u> Teile (z.B. 50 Stück) <u>unter Idealbedingungen</u> durch und ermittelt den Maschinenfähigkeitsindex c_m genauso wie c_p (siehe oben). Der Maschinenfähigkeitsindex c_m muss mindestens eine Stufe größer als der verlangte Prozessfähigkeitsindex c_p ausfallen, sonst erwartet man, dass die Prozessfähigkeit unter normalen Bedingungen nicht erreicht werden kann und spart sich die aufwändige Untersuchung. Verlangt wird also $c_m > 1{,}33$ für 6-Sigma; $c_m > 1{,}66$ für 8-Sigma usw., siehe Tabelle rechts.

1 In der Literatur sind jeweils beide Abkürzungen üblich.

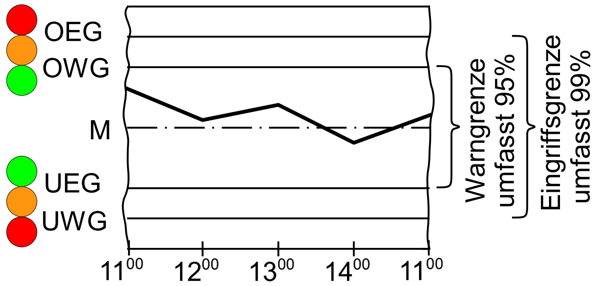
2 In der Praxis gibt es neben 6-Sigma auch 8-, 10-, 12-, 14-, .. Sigma, das Prinzip ist übertragbar.

3 Die Standardabweichung σ kann man für kleinere Stichproben mit dem Taschenrechner berechnen, für größere Stichproben sind Tabellenkalkulationen oder spezielle Programme besser geeignet. Grafische Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz erscheint mir veraltet zu sein.

4 Fähigkeitskennzahl oder Fähigkeitsindex sind gleichbedeutend. Das c in c_p steht für capability (=Fähigkeit), die Indizes p und m kann man für Maschine und Prozess nehmen. Wenn die Fertigung nicht in der Mitte der Toleranz liegt, betrachtet man nur die „kritische“ Seite und gibt die kritischen Indizes c_{mk} bzw. c_{pk} an.

4.2 Qualitätsregelkarten QRK

Qualitätsregelkarten werden zur Überwachung einer laufenden (Serien-)Fertigung eingesetzt. Dazu werden regelmäßig Stichproben aus der Fertigung entnommen, ausgewertet und die Ergebnisse als fortlaufender Linienzug dargestellt. Der Verlauf wird hinsichtlich mehrerer Kriterien beurteilt, damit Abweichungen im Fertigungsprozess bemerkt und behoben werden können, bevor Ausschuss auftritt.



Schema einer Qualitätsregelkarte

4.2.1 Vorteile von QRK

- Regelmäßige Stichproben zeigen den aktuellen Stand der Fertigung.
- Änderung in der Fertigung werden erkannt, bevor Ausschuss auftritt.
- Wenn die Ursachen der Änderungen gefunden werden, ist eine Qualitätsverbesserung möglich.
- QRK dokumentieren die Fertigung und können die Eingangsprüfung des Kunden ersetzen.

4.2.2 Aufbau einer QRK

In QRK sind obere und untere Warn- und Eingriffsgrenzen markiert. Die Eingriffsgrenzen umschließen gewöhnlich 99% der Fertigung, die Warngrenzen 95%. Toleranzgrenzen können eingetragen sein, müssen aber nicht.

In einer Fertigung sind zwei Größen bedeutsam, nämlich die Lage der Messwerte (Fertigungslage) und ihre Streuung. Um beide Kriterien zu überwachen, sind QRK meist zweispurig aufgebaut.

Als Indikator für die Fertigungslage dient der Mittelwert $\bar{x}$ oder der Medianwert $\tilde{x}$ einer Stichprobe.

Indikator für die Streuung der Fertigung sind entweder die Standardabweichung s oder die Spannweite R (Range).

4.2.3 Überwachung im QRK

Liegt eine Stichprobe außerhalb der Eingriffsgrenzen, wird die Fertigung unterbrochen und die Ursache für die Abweichung gesucht und behoben. Teile, die seit der letzten Stichprobe gefertigt wurden, werden aussortiert.

Liegen Stichproben außerhalb der Warngrenzen, wird sofort eine weitere Stichprobe gezogen, weil es sich um einen der 5% Fälle[1] handeln kann, die außerhalb der Warngrenzen, die 95% umschließen, liegen dürfen. Wenn die 2. Stichprobe wieder außerhalb der Warngrenzen liegt, wird die Ursache erforscht.

Weitere Kriterien für Eingriffe sind Run, Trend, Middle Third und Perioden[2].

4.2.4 Regelkarten erstellen

Auf die komplette Statistik möchte ich hier verzichten ☺. Für Übungsbeispiele mit Stichproben vom Umfang n = 5 kann man die Grenzen für Regelkarten vereinfacht berechnen:

	x-Karte Einzelwert	$\bar{x}$-Karte (Mittelwert)	σ-Karte (Standard-abweichung)	$\tilde{x}$-Karte (Median)	R-Karte (Spannweite bzw. Range)
OEG	$\bar{x} + \sigma \cdot 2{,}58$	$\bar{x} + \sigma \cdot 1{,}1519$	$\sigma \cdot 1{,}9275$	$\bar{x} + \sigma \cdot 1{,}380$	$\sigma \cdot 4{,}886$
OWG	$\bar{x} + \sigma \cdot 1{,}96$	$\bar{x} + \sigma \cdot 0{,}8765$	$\sigma \cdot 1{,}6691$	$\bar{x} + \sigma \cdot 1{,}050$	$\sigma \cdot 4{,}197$
M	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\sigma \cdot 0{,}940$	$\bar{x}$	$\sigma \cdot 2{,}326$
UWG	$\bar{x} - \sigma \cdot 1{,}96$	$\bar{x} - \sigma \cdot 0{,}8765$	$\sigma \cdot 0{,}3480$	$\bar{x} - \sigma \cdot 1{,}050$	$\sigma \cdot 0{,}850$
UEG	$\bar{x} - \sigma \cdot 2{,}58$	$\bar{x} - \sigma \cdot 1{,}1519$	$\sigma \cdot 0{,}2275$	$\bar{x} - \sigma \cdot 1{,}380$	$\sigma \cdot 0{,}555$

In den Formeln bedeuten $\bar{x}$ und σ Mittelwert und Standardabweichung der ganzen Fertigung. Wenn sie nicht bekannt sind, nimmt man die Werte aus der Prozessfähigkeitsuntersuchung.

1 5% wird in der Statistik signifikant genannt, weil der Wert so groß bzw. klein ist, dass es auffällig ist, wenn eine Stichprobe dort liegt.
2 Weiteres siehe Tabellenbuch.