Taschenbuch

der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden

Die wichtigsten
Methoden und Verfahren
für die Praxis

Curt Ronniger

www.versuchsmethoden.de

Taschenbuch

der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden

Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis

Auflage 1.64

2024

ISBN 978-3-00-043678-9

© 2024 Curt Ronniger
Kontakt: ronniger@crgraph.de

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS 1

SIX SIGMA 9

Die Six Sigma Zyklen 9
Methodenübersicht für den DMAIC-Zyklus 10
Statistische Betrachtung von Six Sigma 11

SYSTEMANALYSE UND VERFAHREN ZUR PARAMETERAUSWAHL 12

Einführung 12
Ursachen-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa 13
Erweitertes Ursachen-Wirkungsdiagramm 14
Pareto-Analyse 16
Intensitäts-Beziehungsmatrix 16
Priorisierungs-Bewertung 21
Fehlerbaumanalyse FTA 22
Übersicht über die wichtigsten Tools der Systemanalyse 25

VERSUCHSPLANUNG (DESIGN OF EXPERIMENT – DOE) 26

Einführung 26
Vollfaktorieller Versuchsplan 27
Teilfaktorielle Versuchspläne 28
Plackett-Burman-Versuchspläne 29
Taguchi Versuchspläne 29
D-Optimale Versuchspläne 333
Mischungspläne 34
Kategoriale Faktoren 36
Notwendige Versuchswiederholungen - Stichprobenumfang 36
Vergleich der Versuchspläne 37
Übersicht 38

VARIANZANALYSE (ANOVA) 40

One-Way ANOVA balanciert ($\mu1 = \mu2 = \mu3$...) 41
Two-Way ANOVA balanciert 41
Two-Way ANOVA balanciert mit Zufallsfaktoren (Random) 42
Two-Way ANOVA geschachtelt (nested) 43

KORRELATION UND BESTIMMTHEITSMAß 43

Korrelationskoeffizient nach Bravais - Pearson 43
Rangkorrelation nach Spearman 44

REGRESSION 44

Multiple Regression 45
Grafische Darstellung des Modells im Kurvendiagramm 46
Grafische Darstellung der Wechselwirkung 47
Residuen 48
Bestimmtheitsmaß 49
Vorhersagemaß des Modells Q^2 50
Hinweise: 50
Modellschwäche Lack of Fit 51
Streuungszerlegung gesamthaft 52
Wiederholbarkeit 52
Test der Regressionskoeffizienten, der p_{value} 52
Varianzinflationsfaktor (VIF) 53
Standardabweichung für das Gesamtmodell RMS 54
Normieren 54
Standardisieren 54
Box-Cox-Transformation 55

Vertrauensbereich für die Zielgröße 55
Bestimmung von Ausreißern 55
Grundsätzliche Überlegungen zu Stabilität und Robustheit 58
Probleme mit zu stark korrelierenden Daten (historische Daten) 60
Diskrete Regressionsanalyse 62
Häufigkeitsgruppen / Kreuztabellen 67

MULTIVARIATE DATENAUSWERTUNG 71

Hauptkomponentenanalyse 71
Partial Least Square (PLS) 72
Schätzung der Streuung 74
Variablenselektion mit VIP 74
Score Plot 76
Korrelations-Ladungen (Correlation Loading Plot) 76
Clusteranalyse 77

FÄHIGKEITSKENNZAHLEN 81

Normalverteilung 81
Lognormalverteilung 82
Betragsverteilung 1. Art 82
Betragsverteilung 2. Art (Rayleigh-Verteilung) 83
Verteilungsfreie Percentil-Methode 83
Verteilungsformen verschiedener Konstruktionsmerkmale 83
Übersicht der wichtigsten Verteilungen 84
Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) 84
Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU) 84
Messmittelfähigkeit & Mess-System-Analyse MSA 85
Verfahren 1, 2 und 3 85
Mess-System-Analyse mit ANOVA 88
Mess-System-Analyse analog VDA Band 5 bzw. ISO 22514-7 89
Verringerung der Messunsicherheit durch Wiederholungen 90
Gegenüberstellung zu den klassischen Verfahren 90
Mess-System-Analyse für diskrete und ordinal skalierte Merkmale 91
Auswahlübersicht Mess-System-Analyse 95

TOLERANZBERECHNUNG 96

Das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz 96
Abschätzung der Einzelstreuungen aus den Toleranzen 97
Prozessdaten Toleranzsimulation 97
Beispiel Fahrzeughinterachse 98

QUALITÄTSREGELKARTE FÜR EIN MERKMAL 99

x – Qualitätsregelkarte (Urwertkarte) 99
x/s- Qualitätsregelkarte 100
Qualitätsregelkarten für diskrete Merkmale 101

STATISTISCHE HYPOTHESENTESTS 103

Einführung 103
Bestimmung des α-Fehlers am Beispiel Mittelwertvergleich 104
Der P_{VALUE} 104
Bestimmung des β-Fehlers am Beispiel Mittelwertvergleich 105
Zusammenfassung zu Fehler 1. und 2. Art 106
Teststärke Power 106
Ermittlung der Stichprobengröße mit Hilfe der Power-Funktion 107
Hypothesentests für Verteilungen 109
Shapiro-Wilk Test 109
Kolmogorov-Smirnov Anpassungstest 109
Cramér-von-Mises Test 110
Anderson-DarlingTest auf Normalverteilung 110

Anderson-Darling Test auf Weibull-Verteilung ... *111*
χ^2-Anpassungstest ... *111*
Epps-Pulley Test ... *112*
Jarque-Bera Test (JB) ... *113*
Zusammenfassung der statistischen Tests auf Normalverteilung ... *114*
Binomial-Test ... *114*
HYPOTHESENTESTS FÜR AUSWERTUNGEN ... 114
t-Test für zwei Stichproben ... *114*
t-test für Vergleich einer Stichprobe mit einem Vorgabewert ... *115*
Mood's Median Test ... *115*
U-Test für zwei Stichproben ... *116*
Vorzeichentest für eine Stichprobe ... *117*
Vorzeichenrangtest nach Wilcoxon für eine Stichprobe ... *117*
F-Test ... *117*
Levene's Test ... *118*
Bartlett-Test ... *118*
Linearitätstest ... *119*
Steigungstest einer Regression ... *120*
AUSREIßERTESTS ... 120
Test auf einen Ausreißer nach Grubbs ... *120*
Test auf einen oder mehrere Ausreißer (Wölbungstest) ... *120*
Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson ... *120*
TESTS FÜR DISKTRETE MERKMALE UND EREIGNISSE ... 121
Binomial-Test ... *121*
Poisson-Test ... *121*
χ^2-Homogenitätstest ... *123*
χ^2-Mehrfeldtest ... *124*
Exakter Test nach Fisher ... *125*
Übersicht über die Test-Statistiken ... *127*

DIE WICHTIGSTEN STETIGEN VERTEILUNGEN ... 128

NORMALVERTEILUNG ... 128
Boxplot ... *130*
Abweichungen von der Normalverteilung ... *131*
Betragsnormalverteilung ... *132*
Mehrparametrige Normalverteilung ... *132*
5-parametrige Normalverteilung ... *133*
Zensierte Normalverteilung ... *134*
LOGNORMALVERTEILUNG ... 135
WEIBULL - VERTEILUNG ... 137
Bestimmung der Weibull-Parameter ... *140*
Vertrauensbereich der Weibull-Verteilung und -Parameter ... *141*
Vertrauensbereiche über Fisher-Matrix ... *142*
3-parametrige Weibull-Verteilung ... *143*
4- und 5-parametrige Weibull-Verteilung ... *144*
Weitere Ansätze für nicht lineare Verläufe im Weibull-Netz ... *147*
Berücksichtigung noch nicht eingetretener Ausfälle Sudden Death ... *149*
Auswertung von Daten schadhafter und nicht schadhafter Teile ... *151*
Zensierte Weibull-Verteilung ... *152*
Intervall- und linkszensierte Daten ... *152*
Felddatenauswertung – Anwärterprognose ... *154*
Weitere wichtige Kenngrößen für Weibull & Zuverlässigkeit ... *156*
Übersicht der möglichen Fälle ... *156*
Typische Weibull-Verläufe und mögliche Ursachen ... *158*

ZUVERLÄSSIGKEITSMETHODEN UND LEBENSDAUER ... 159

VERGLEICH VON 2 VERTEILUNGEN ... 159
SYSTEMZUVERLÄSSIGKEIT BEI MEHREREN KOMPONENTEN ... 160
... 160

.....160
WeiBayes - Ansatz 161
Zuverlässigkeit aus dem Binomialansatz 162
Success Run - Stichprobenumfang 163
Berücksichtigung von Vorkenntnissen 165
Berücksichtigung einer ausfallfreien Zeit t_0.....165
Berücksichtigung eines Raffungsfaktors 166
Berücksichtigung von Ausfällen.....166
Zusammenfassung für Tests ohne Ausfälle.....166
Belastungs-Testmatrix 167
Lebensdauerhochrechnung aus Verschleißgrad 171
Lebensdauer im Wöhlerdiagramm 173
Wöhlerdiagramm aus Weibullauswertung ableiten.....174
Wöhler - Perlschnurverfahren 176
Bestimmung des Raffungsfaktors.....177
Temperatureinfluss auf Lebensdauer 178
Das Arrhenius-Modell 178
Coffin-Manson-Modell und Inverse Power Law.....179
Schichtlinien.....180
Schichtlinien auf Basis des Produktionsdatums.....180

WEITERE STATISTISCHE VERTEILUNGEN.....184

Diskrete Verteilungen 184
Binomial.....184
Poisson.....185
Geometrisch.....186
Hypergeometrisch 186
Stetige Verteilungen 187
Beta 187
Cauchy 187
χ^2 (Chi²).....187
Exponential 188
Extrem 188
Fisher 188
Gamma.....188
Laplace.....189
Logistik.....189
Pareto 189
Rayleigh 189
Student- oder t-Verteilung 190

ANLAGE 191

Leitfaden zur Erstellung von Tabellen.....191
Verwendete Formelzeichen 192

STICHWORTVERZEICHNIS.....193

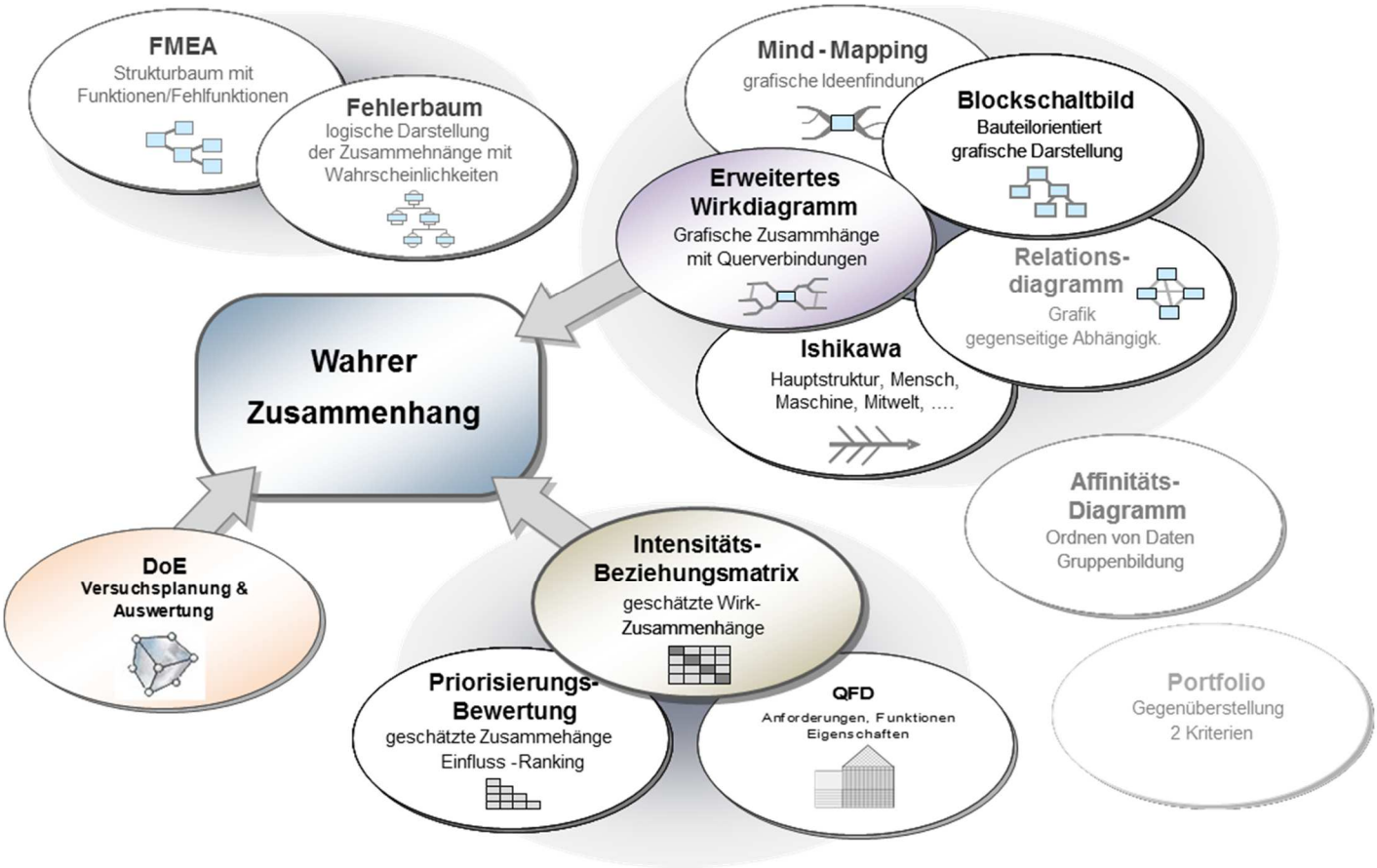
Systemanalyse und Verfahren zur Parameterauswahl

Einführung

Die Lösung technischer Probleme wird aufgrund komplexer werdender Systeme immer schwieriger. Zur Bestimmung der Zusammenhänge wird häufig Design of Experiment (DoE) eingesetzt. Leider scheitern Versuchspläne aber an der ungenügenden Vorbereitung. Die besten statistischen Methoden können aus der Beobachtung weggelassene und unterschätzte Faktoren nicht bewerten. Anhand eines Beispiels soll gezeigt werden, wie eine bestmögliche Systemanalyse als Einstieg in eine Versuchsplanung durchgeführt werden kann.

Eine Systemanalyse ist eine systematische Untersuchung von „Elementen“ die in Beziehung zueinander stehen (Kurzfassung aus Definition Duden).

Unter dem Begriff Systemanalyse verbergen sich eine Vielzahl von Methoden und Darstellungen. Im Rahmen dieser Beschreibungen sollen einschränkend die Bausteine betrachtet werden, die für eine spätere Untersuchung wichtig sind, insbesondere für die Erstellung von Versuchsplänen.
Man unterscheidet grundsätzlich zwischen grafischen Verfahren und Matrix-Strukturen, die teilweise auch ineinander übergehen. Das Ziel ist es, durch Abschätzung den wirklichen Beziehungen so nahe wie möglich zu kommen. Die wichtigsten Methoden zeigt folgendes Bild:



Im Fehlerbeseitigungsprozess verwendet man am häufigsten die „Tools“ Ishikawa, Wirkdiagramm und Fehlerbaum (Grundlage hierfür kann eine bereits vorhandene FMEA sein). Im Folgenden wird das Ursachen-Wirkungsdiagramm behandelt.

Ursachen-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa

Erfunden wurde diese Methode von einem Hr. **Ishikawa**, nach dem die Methode benannt wurde. Verbreitet ist auch der Begriff **Fischgräten-Diagramm**. Der Name resultiert aus der Ähnlichkeit mit einer Fischgräte.

Das Ziel ist die systematische Darstellung von Zusammenhängen. Der Einsatz ist meist in der Problemlösung anzufinden.

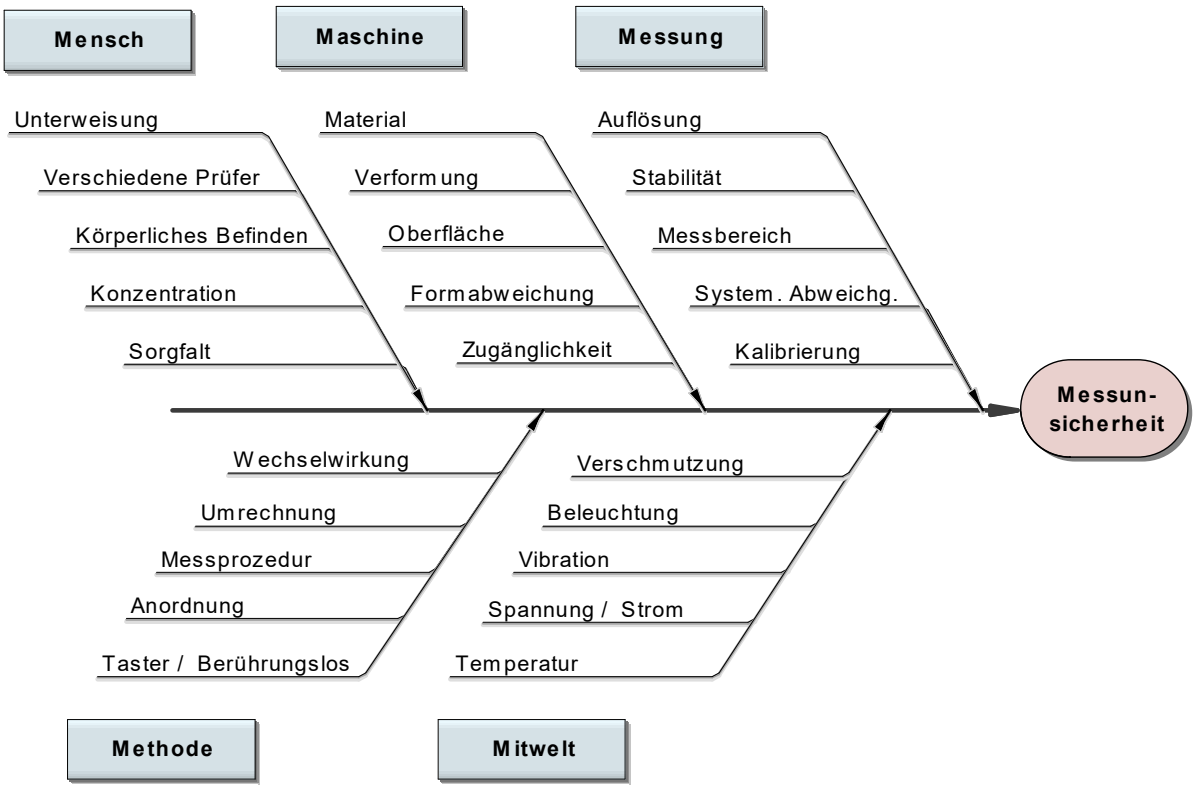
Man unterscheidet zwischen einer **erfolgsorientierten** und einer **fehlerorientierten** Darstellung. Beim erfolgsorientierten Vorgehen wird als Wirkung ein erwünschter, positiver Zustand angegeben und die dazugehörigen Bedingungen erarbeitet. Beim fehlerorientierten Vorgehen werden ausgehend von einem Problem alle möglichen Ursachen gesucht. Beide Varianten dürfen nicht miteinander vermengt werden. Die einzelnen Schritte sind im Wesentlichen:

1. Definition des zu untersuchenden Ziels oder des Problems

2. Auswahl der darstellenden Struktur. Hierzu gibt es in der Regel die so genannten **M** (**M**ensch**, M**aschine**, M**ethode**, M**aterial, **M**itwelt, **M**essung). In machen Darstellungen wird auch noch das Management einbezogen.

3. Einflussgrößen in einer Arbeitsgruppe bestimmen und eintragen

Beispiel für ein 5M Diagramm: Darstellung von Einflüssen auf die Messunsicherheit.

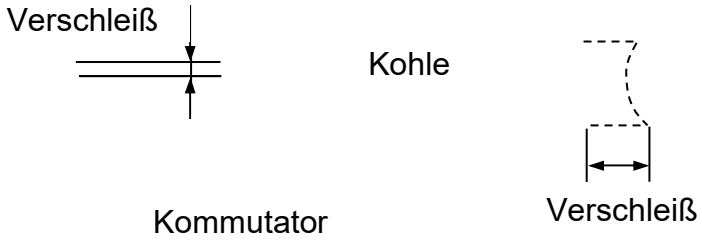


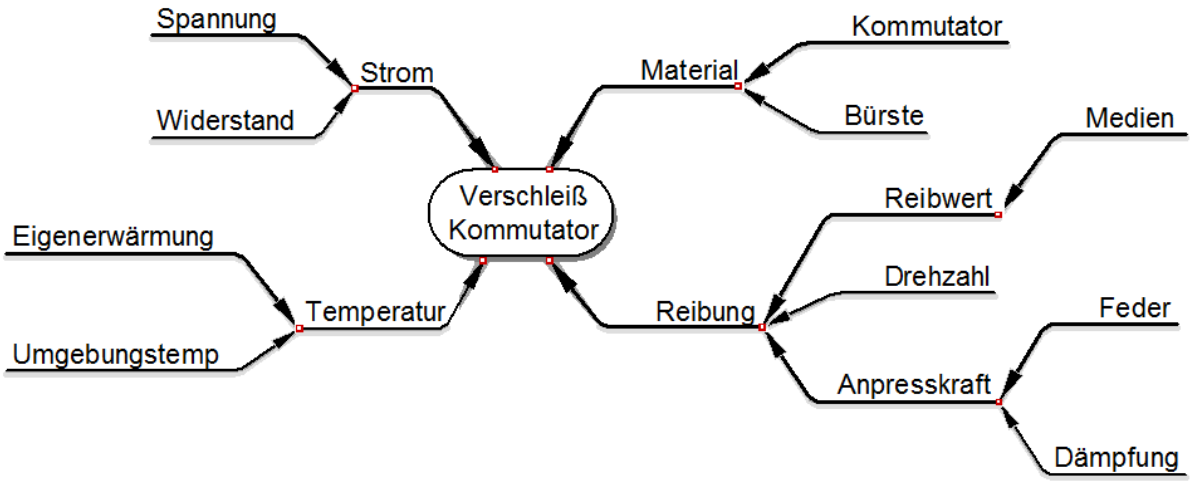
Diese Methode ist ursprünglich rein linear aufgebaut, was oft als Nachteil genannt wird. Man kann aber hier abhängige physikalische Größen dazwischen einbeziehen und gegenseitige Abhängigkeiten durch entsprechende Querverbindungen aufbauen.

Erweitertes Ursachen-Wirkungsdiagramm

In dieser Darstellung, abgekürzt auch als Wirkdiagramm bezeichnet, wird das Problem in die Mitte gestellt (problemorientierte Form). Es ist aber auch eine funktionsorientierte Darstellung möglich.
Im folgenden Beispiel soll der Verschleiß des Kommutators und der Kohlebürsten eines Elektromotors behandelt werden (vereinfachte Prinzip-Darstellung, problemorientiert):

Verwendet man hier anstelle der Bauteile physikalische, oder technische Begriffe für die Ursachen von Verschleiß, so entsteht folgende mögliche Darstellung:



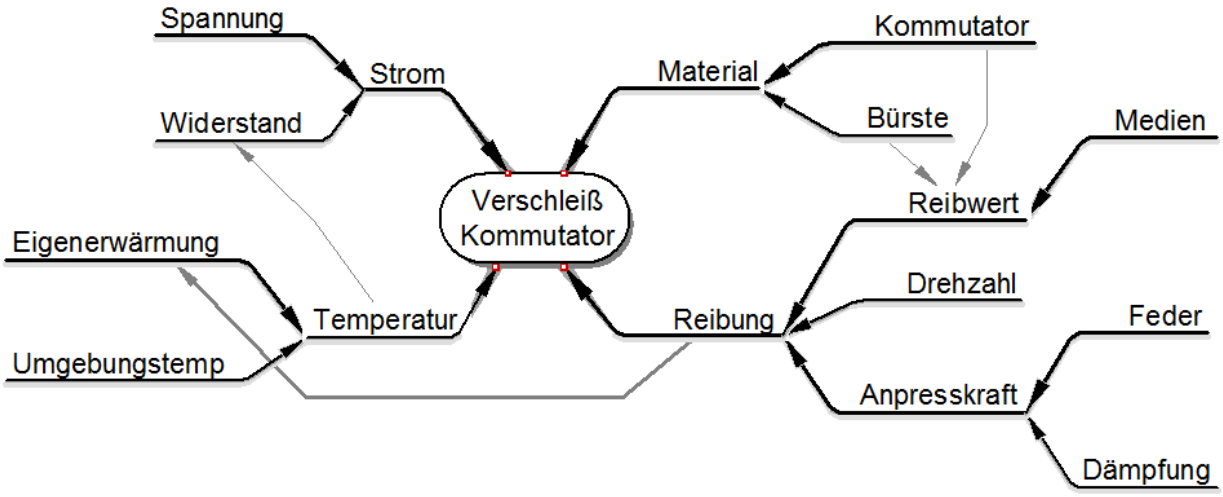


Die dargestellte Aufteilung hat den großen Vorteil, dass die Wirkreihenfolge klar erkennbar ist und eine spätere Bewertung der Ursachen den Verschleiß besser berücksichtigt. Die Betrachtung ist rein linear, physikalische Beziehungen und nichtlineare Zusammenhänge werden nicht berücksichtigt. Sie sind in der Regel im Vorfeld auch nicht bekannt.

Einbeziehung von Abhängigkeiten (Querbeziehungen)

Bei näherer Betrachtung der vorhergehenden Struktur wird schnell klar, dass es „Querbeziehungen“, bzw. weitere Abhängigkeiten gibt. Der Widerstand ist von der Temperatur und die Eigenerwärmung von der Reibung abhängig, usw.

Zu beachten ist hier der Unterschied zwischen (Quer-)Wirkungen und Wechselwirkungen! Im Gegensatz zu einer (Quer-)Wirkung zwischen zwei Parametern beeinflusst eine Wechselwirkung die Zielgröße (hier Verschleiß). Eine Wechselwirkung liegt vor, wenn sich bei Variation von 2 Parametern die Zielgröße mehr verändert, als durch die Summe der Einzeleffekte (Getrennte Änderung der Zielgröße je Parameter). Dabei muss nicht eine (Quer-)Wirkung der Parameter gegeben sein. Im Wirkdiagramm ist eine Wechselwirkung nicht erkennbar, bzw. ist grafisch nicht darstellbar.

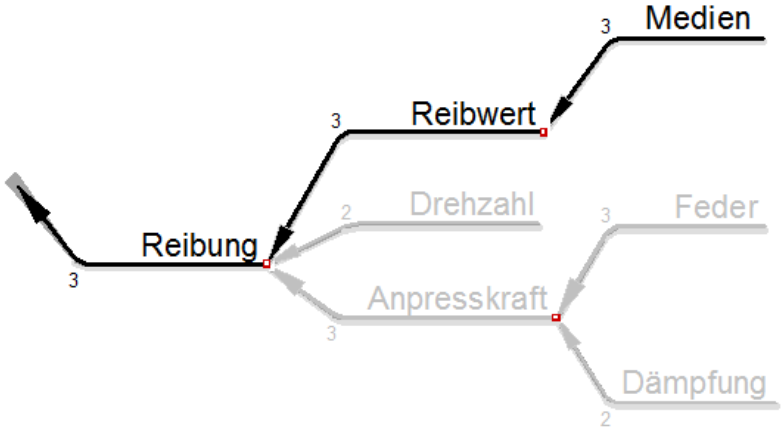


Je nach Anzahl der Querverbindungen ergibt sich eine mehr oder weniger starke Vernetzung. Die Querverbindungen sollten deshalb grau dargestellt werden, damit die Übersichtlichkeit nicht leidet.
Die Ursachen-Wirkungskette ist sehr gut ersichtlich, z.B. erzeugt die Feder eine Anpresskraft und diese wiederum eine Reibung. Eine Ausnahme sind reine Auflistungspfade, wie Material oder konstruktive Merkmale.

Eine weitere Verbesserung der Analyse ergibt sich aus der Bewertung der Wirkstärken. Werden diese noch durch unterschiedliche Strichstärken der Äste hervorgehoben, entsteht eine noch bessere Darstellung der Zusammenhänge (siehe Bild oben).

Die Wirkstärken, auch für die Querverbindungen, werden in den Bewertungen 1,2,3 und 5 gestaffelt (siehe nachfolgendes Kapitel *Intensitäts-Beziehungsmatrix*). Damit kann später eine Pareto-Auswertung gemacht werden, um die wichtigsten Einflüsse zu bestimmen. Das Ranking der Einflüsse wird dabei auch wesentlich durch die Bewertung der Querverbindungen bestimmt. Eine Staffelung der Bewertung von 1, 3 oder 9 ist deshalb nicht zu empfehlen, da die 9 alle anderen Bewertungen in den „Hintergrund“ stellen würde.

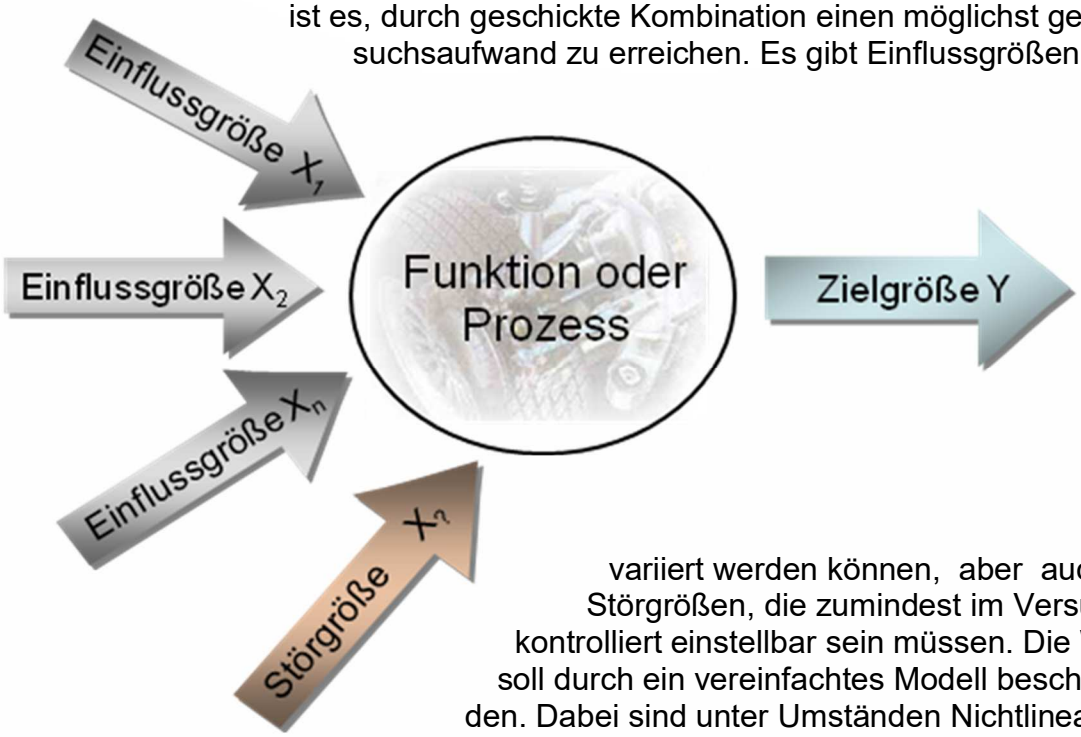
Hinweis:
Die Bewertung der außenliegenden Einflüsse sollte nicht größere Werte haben, als die der „inneren Wirkäste“. In diesem Beispiel hat die Reibung den Wert 3. Dann ist es nicht richtig dem Reibwert und dem Medium eine 5 zu geben. Das würde die Bedeutung dieser Einflüsse im Gesamtzusammenhang zu hoch setzen, denn die Reibung hat auf den Verschleiß maximal nur die 3 „vererbt“.



Versuchsplanung (Design of Experiment – DoE)

Einführung

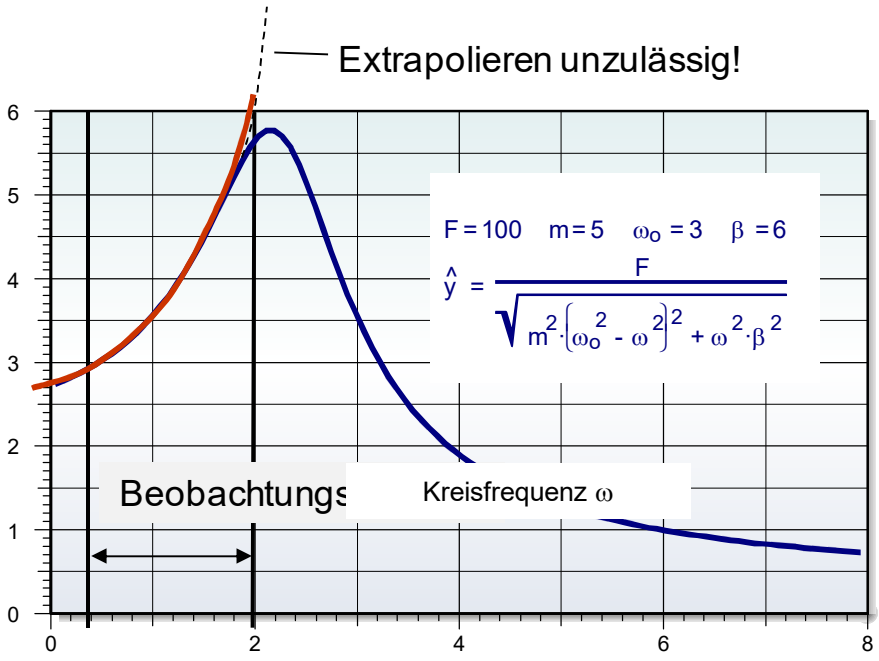
Das Ziel einer Versuchsplanung ist es, die Abhängigkeit einer Zielgröße von verschiedenen Einflussgrößen quantitativ zu ermitteln. Dabei soll die Funktion oder ein Prozess mathematisch beschreibbar sei. Wesentliches Merkmal einer guten DoE ist es, durch geschickte Kombination einen möglichst geringen Versuchsaufwand zu erreichen. Es gibt Einflussgrößen, die gezielt



variiert werden können, aber auch oft auch Störgrößen, die zumindest im Versuchsumfeld kontrolliert einstellbar sein müssen. Die Wirklichkeit soll durch ein vereinfachtes Modell beschrieben werden. Dabei sind unter Umständen Nichtlinearitäten und Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die vereinfachten Modelle mit quadratischen und kubischen Ansätzen können jedoch oft den realen Verlauf nicht vollständig wiedergeben. Es ist im Versuchsplan deshalb vorher genau zu überlegen, für welchen Beobachtungsbereich das Modell gelten soll. Für ein Feder-Masse-System, wie im Bild rechts dargestellt, reicht im vorderen Bereich ein quadratischer Ansatz:

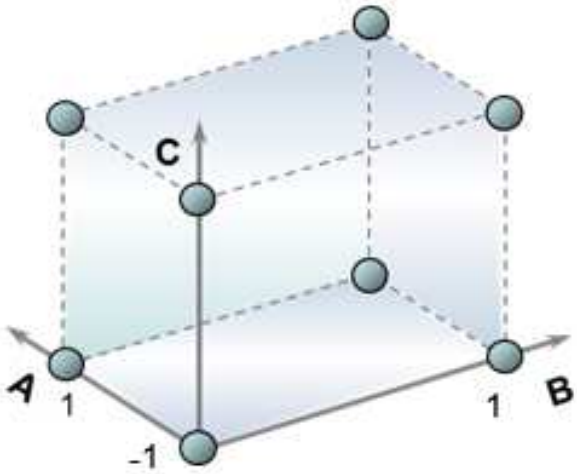
$$y = a \cdot \omega + b \cdot \omega^2 + ... + konst$$

Der weitere Kurvenverlauf ist aber danach nicht mehr gültig. Ein Extrapolieren würde falsche Ergebnisse liefern. Dieses Problem ist allzu oft der Grund für das Scheitern einer DoE.



Vollfaktorieller Versuchsplan

Ein vollfaktorieller Versuchsplan entsteht, wenn alle möglichen Einstellungen der Faktoren miteinander



kombiniert werden. Die Anzahl der hierfür benötigten Versuche ist mit p=Anzahl der Faktoren und je zwei Einstellungen: $n = 2^p$

	B	C	D	E	F	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1
11	-1	1	-1	1	-1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	-1	-1
16	1	1	1	1	-1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1	-1
18	1	-1	-1	-1	1	-1

Bei 3 Faktoren ergeben sich also 8 Versuche. Allgemein erstellt man einen vollfaktoriellen Plan (normiert -1 und 1) einfach auf folgende Weise: Beginnend in der ersten Spalte wird alternierend -1, 1, -1 usw. geschrieben. In der nächsten Spalte schreibt man mit doppelter Häufigkeit alternierend -1,-1, 1, 1,-1,-1 usw. In der dritten Spalte wiederum mit doppelter Häufigkeit, wie in der vorhergehenden, bis alle Faktoren belegt sind. Der Versuchsplan lässt sich einfach durch die Tabellenfunktion

=(-1)^AUFRUNDEN(ZEILE()/2^(SPALTE()-1);0)

erzeugen (Formel in A1 eingeben und mit der Maus bei gedrückter Strg-Taste über den Bereich ziehen). Der Vorteil des vollständigen Versuchsplans ist, dass sich alle Wechselwirkungen WW erklären lassen. So ist die 3-fach-WW A*B*C ebenso enthalten. Die Anzahl der Versuche nimmt mit der Anzahl der Faktoren jedoch schnell sehr stark zu, sodass ab ca. 5 Faktoren der Versuchsplan in der Praxis zu aufwendig wird. Es stellt sich die Frage, wie man ihn vereinfachen kann. Die 3-fach-WW haben in den meisten Fällen einen nur untergeordneten Einfluss. Verzichtet man auf diese Aussage, so kann man anstelle der Versuche zur Bestimmung von A*B*C ein weiterer Faktor verwendet werden und man erhält einen teilfaktoriellen Versuchsplan (fraktional faktoriell).

Vor- und Nachteile der vollfaktoriellen Versuchspläne

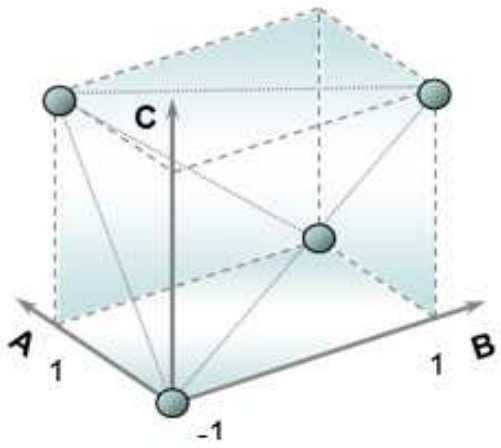
+ Orthogonale Versuchsanordnung mit allen Wechselwirkungen (auch 3-fach, etc.)
+ Absolut beste Auswertbarkeit.
– Zu großer Aufwand bei Anzahl der Parameter > 4.

Teilfaktorielle Versuchspläne

	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1

Wie vorher beschrieben, wird also die letzte „Informationsspalte“ nicht für die 3-fach-WW genutzt, sondern für einen neuen Faktor D. Allgemein werden die letzten oder der letzte Faktor durch das Produkt der vorhergehenden Spalten (Faktoren) gebildet. Im folgenden Beispiel ergibt sich die Spalte D durch die Multiplikation von A*B*C ⇨ $_2{}^{4-1}$.

Der Nachteil dieses Versuchsplanes ist, dass keine Dreifachwechselwirkungen mehr bestimmbar sind, und Zweifachwechselwirkungen miteinander vermengt sind: AB mit CD, AC mit BD und AD mit BC, da die jeweiligen Spaltenprodukte identisch sind. Erst ab dem Produkt mit mindestens 4 Spalten, z.B. F=ABCD sind 2-fach Wechselwirkungen nicht mehr vermengt. Diese Pläne haben eine so genannte Auflösung von mindestens V. Die Anzahl der Versuche berechnet sich durch: $n = 2^{p-q}$. Man bildet diesen Versuchsplan zunächst wie den vollfaktoriellen, jedoch mit q Faktoren weniger. Die Einstellungen der fehlenden Faktoren q werden durch das Produkt aller vorhergehenden Spalten gebildet. Diese nennt man auch Generatoren. Auf einen Blick gibt es bis 12 Faktoren folgende Übersicht:

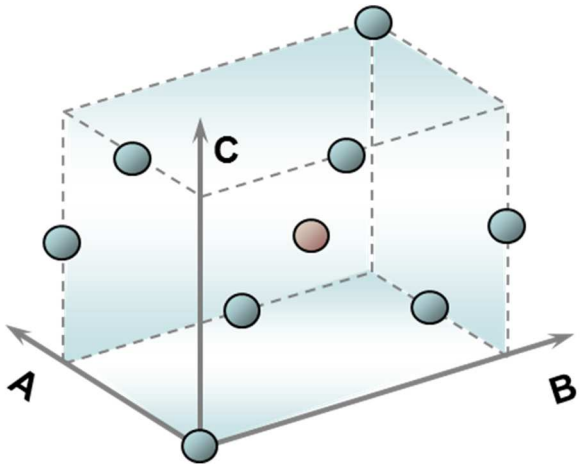


n \ p	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	2^2 vollst.	2^{3-1} III									
8		2^3 vollst.	2^{4-1} IV	2^{5-2} III	2^{6-3} III	2^{7-4} III					
16			2^4 vollst.	2^{5-1} V	2^{6-2} IV	2^{7-3} IV	2^{8-4} IV	2^{9-5} III	2^{10-6} III	2^{11-7} III	2^{12-8} III
32				2^5 vollst.	2^{6-1} VI	2^{7-2} IV	2^{8-3} IV	2^{9-4} IV	2^{10-5} IV	2^{11-6} IV	2^{12-7} IV
64					2^6 vollst.	2^{7-1} VII	2^{8-2} V	2^{9-3} IV	2^{10-4} IV	2^{11-5} IV	2^{12-6} IV
128						2^7 vollst.	2^{8-1} VIII	2^{9-2} VI	2^{10-3} V	2^{11-4} V	2^{12-5} IV

	Vollständige Pläne -> alle Wechselwirkungen
V+	Fraktionelle Pläne -> alle 2-fach-WW bestimmbar, Auflösung ≥ V
IV	Fraktionelle Pläne -> 2-fach-WW. vermengt, Haupteff. vermengt mit 3-fach-WW
III	Fraktionelle Pläne -> 2-fach-WW. vermengt, Haupteff. vermengt mit 2-fach-WW **!**

Alle teilfaktoriellen Pläne mit einer Auflösung V oder höher sind unkritisch in der Auswertung. Der Aufwand nimmt jedoch auch hier schnell über 6 Faktoren zu, sodass dann eher D-Optimale Versuchspläne zu empfehlen sind, bei denen immer alle Wechselwirkungen ermittelt werden können. Versuche mit Auflösung kleiner V werden eingesetzt um die wichtigsten Einflüsse zu erkennen. Dies nennt man auch Screening. Auch hier hat man aber mit D-Optimalen Versuchsplänen bei gleicher Anzahl Versuche immer noch die

Definitive Screening Designs DSD



Sogenannte Definitive Screening Designs sind sehr neu von Jones und Nachtsheim entwickelte Versuchspläne mit sehr geringem Versuchsumfang.
Sie ermöglichen die Auswertung von quadratischen Modellen und basieren deshalb auf 3 Stufen. Zwischen den Hauptfaktoren untereinander und den quadratischen Termen gibt es keine Vermengung (orthogonal). Die Wechselwirkungen sind nicht zu 100% vermengt.

Nr	A	B	C	D
1	0	1	-1	-1
2	0	-1	1	1
3	-1	0	-1	1
4	1	0	1	-1
5	-1	-1	0	-1
6	1	1	0	1
7	-1	1	1	0
8	1	-1	-1	0
9	0	0	0	0

In der generischen Erzeugung dieser Versuchspläne (iterativ mit Hilfe der Determinante) ergibt sich regulär die Anzahl Versuche mit n = 2*p+1. Bei ungerader Anzahl Faktoren werden je zwei Zeilen ohne 0 zusätzlich benötigt.

n = 2*p+1+(2)

Weiterhin soll der Zentrumspunkt mindestens einmal wiederholt werden.

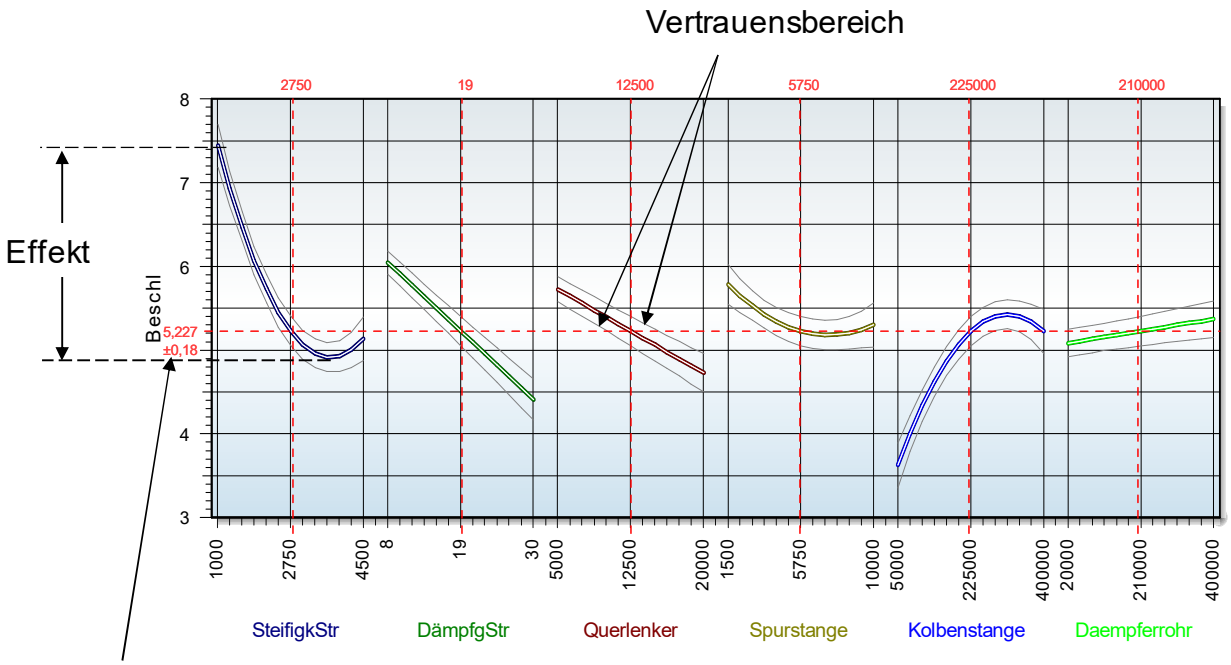
Zu empfehlen sind diese neuen Versuchspläne, wenn man nichtlineare Zusammenhänge erwartet und keine, oder nur wenige Wechselwirkungen. Allerdings müssen bis auf einen alle Faktoren 3 Stufen mit zentrischer Mitteleinstellung haben. Kategoriale Faktoren sind darstellbar, dürfen aber nicht mehr als 3 Ausprägungen aufweisen.

Ein Faktor kann also auch nur 2 anstelle von 3 Stufen haben. Dies war anfänglich nicht vorgesehen und wurde als großer Nachteil empfunden. Der Versuchsaufwand ist dabei nur einen Zentrumspunkt größer. Ab 10 Faktoren sind diese Pläne jedoch nicht mehr orthogonal, d.h. auch die Hauptfaktoren korrelieren leicht (r = 0,1). Eine Auswertung von Wechselwirkungen wird hier nicht empfohlen, da die Korrelationen r $\geq$ 0,5 sind. Schlimmer noch ist jedoch der Umstand, dass hier auch Hauptfaktoren mit Wechselwirkungen stark korrelieren. Wechselwirkungen sollten deshalb am besten nicht existieren, was man aber oft nicht ausschließen kann. Man sollte deshalb möglichst versuchen, alle Faktoren auf 3 Stufen einzustellen.

Möchte man generell Wechselwirkungen auswerten können, so ist eine weitere Variante den DSD Grundplan mit mehr Spalten als benötigte Faktoren aufzubauen, aber die letzte(n) Spalte(n) nicht zu nutzen. Diese hier als **DSD WW** genannten Versuchspläne haben ab 6 Faktoren wesentlich weniger Versuche, als D-Optimale. Diese sind aber meist genügend für die in der Auswertung verbleibenden signifikanten Wechselwirkungen.

Vor- und Nachteile:

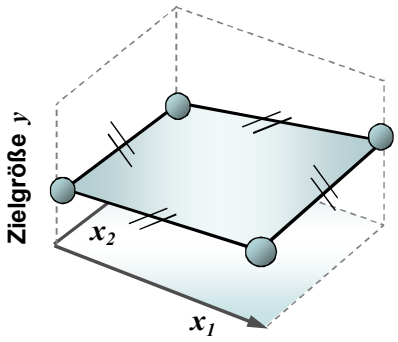
+ Orthogonale Versuchsanordnung mit extrem wenigen Versuchsdurchläufen.
+ Auswertung quadratischer Modelle möglich.
+ Möglichkeit zu Auswertung von einigen Wechselwirkungen (WW).
- Nicht alle möglichen WW darstellbar.



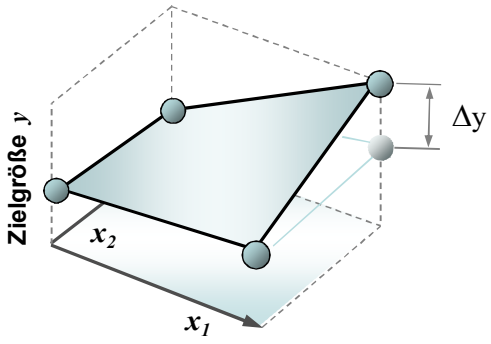
Modellwert für aktuelle Faktoreinstellungen

Grafische Darstellung der Wechselwirkung

Eine Wechselwirkung verursacht eine stärkere Veränderung der Zielgröße, als die Einflüsse der einzelnen Faktoren in Summe. Wechselwirkungen haben physikalische Ursachen:

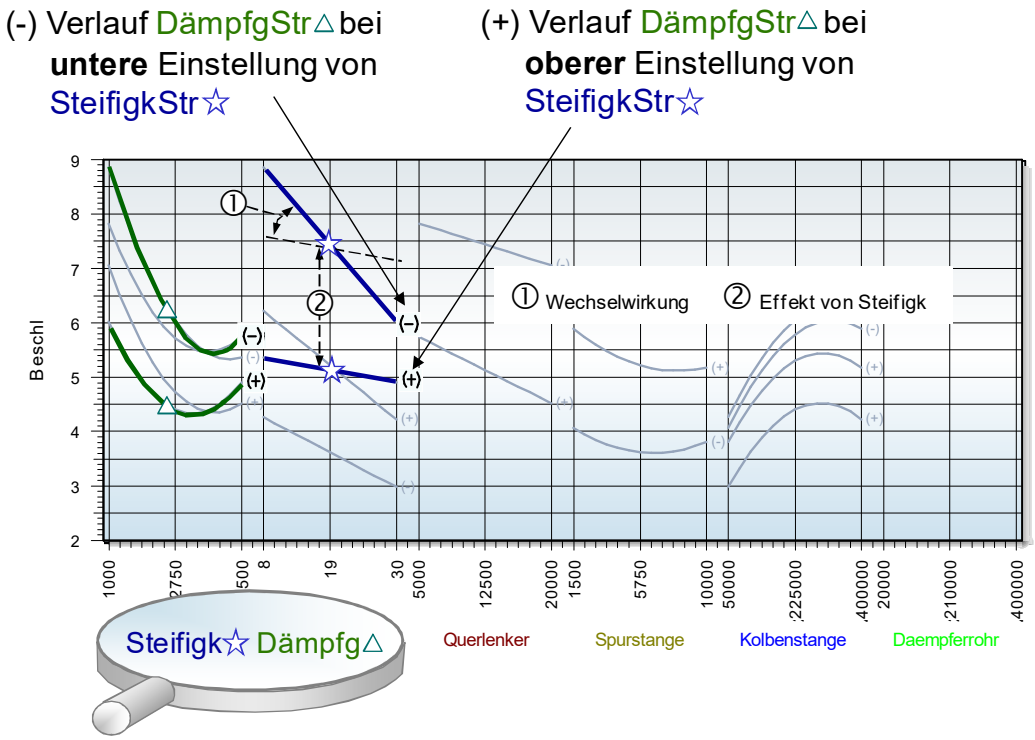


Keine Wechselwirkung
Steigungen verlaufen parallel



Wechselwirkung vorhanden
Steigungen verlaufen unterschiedlich

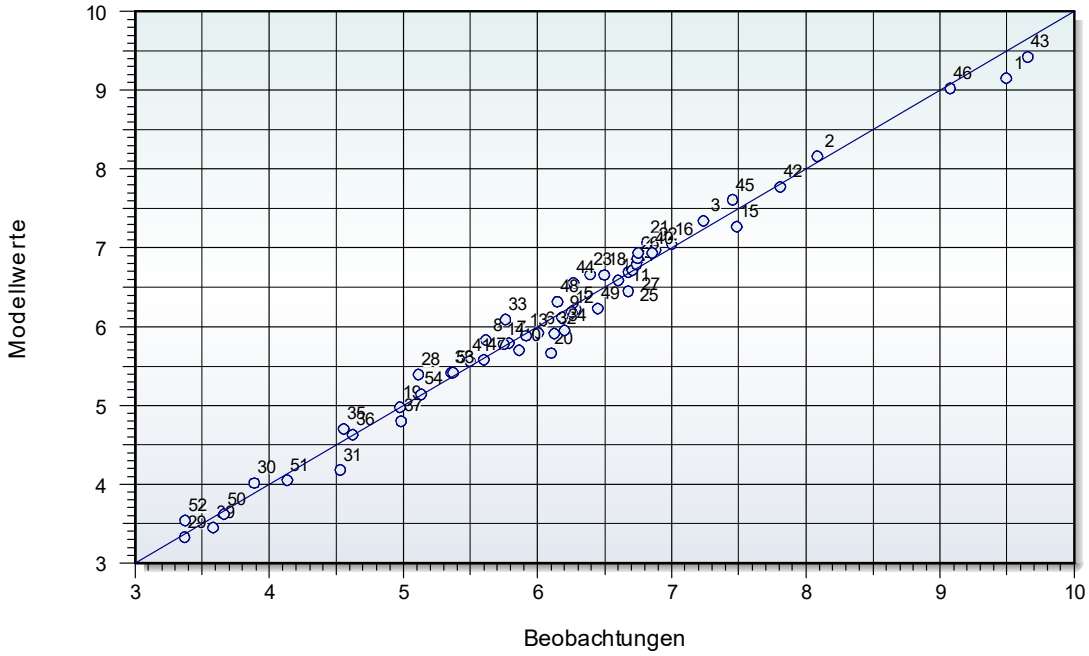
Analog zum Kurvendiagramm lassen Wechselwirkung auch als Kurvenpaare darstellen. Für jeden Faktor mit einer Wechselwirkung gibt es 2 Kurvenpaare.



Verlaufen die Steigungen der Kurvenpaare mehr und mehr unterschiedlich steil, umso höher ist der Einfluss der Wechselwirkung. Der Höhenunterschied der Kurven ist lediglich der Effekt des Faktors, der der Wechselwirkungspartner ist.

Residuen

Die „Güte“ eines Modells kann auch dargestellt werden, indem man die jeweiligen Rechenwerte (Funktionswerte) über die beobachteten Werte y_i aufträgt. Bezogen auf die tabellarischen Daten bedeutet dies, dass man für jede Zeile die Merkmale x in das Modell eingibt und $\hat{y}_i$ berechnet. Dabei wird dieser Rechenwert $\hat{y}_i$ (Modellwert) von dem Wert der Beobachtung (Messwert) y_i in der Tabelle mehr oder weniger abweichen. Diese Abweichungen stellen die so genannten Residuen dar.



Fähigkeitskennzahlen

Fähigkeitskennzahlen dienen zur Beschreibung der aktuellen, sowie der zukünftig zu erwartenden, Leistung eines Prozesses.
Allgemein versteht man unter einer Fähigkeitskennzahl das Verhältnis aus Toleranz zur Streuung des Prozesses. Dabei bezieht man sich auf einen Bereich, bei dem 99,73% innerhalb der Spezifikation liegen (±3σ bzw. ±3s). Im Falle eines Herstellungsprozesses handelt es sich um die Prozessfähigkeit C_p. Zur Berücksichtigung einer Mittelwertverschiebung (Abweichung von der idealen Prozesslage), wird der Wert C_{pk} eingeführt, der immer schlechter oder gleich groß ist wie C_p ($C_{pk} \leq C_p$). In der Regel gilt ein Prozess als fähig, wenn $C_{pk} \geq 1{,}33$ ist.

Im folgendem werden für verschiedene Verteilungsformen die Beziehungen dargestellt:

Normalverteilung

Die Normalverteilung ist anzuwenden, wenn Abweichungen vom Sollwert durch zufällige Einflüsse vorliegen, die additiv wirken.

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6s} = \frac{T}{6s}$$

mit
USG : untere Toleranzgrenze
OSG : obere Toleranzgrenze
T : Toleranz = OSG-USG
μ : Mittelwert

$$C_{pu} = \frac{\bar{x} - UTG}{3s} \qquad C_{po} = \frac{OTG - \bar{x}}{3s}$$

$$C_{pk} = Min\left(C_{pu}; C_{po}\right)$$

Ist der tatsächliche Mittelwert und die Standardabweichung bekannt, so ist μ und σ anstelle von $\bar{x}$ und s einzusetzen. Der C_{pk}- Wert kann über

$$C_{pk} = C_p\left(1 - |z|\right)$$

berechnet werden, mit

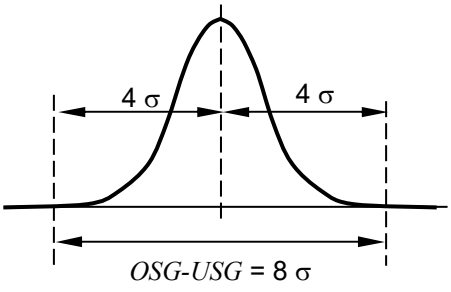
$$z = \frac{\bar{x} - (OSG + USG)/2}{(OSG - USG)/2}$$

für mittigen Sollwert

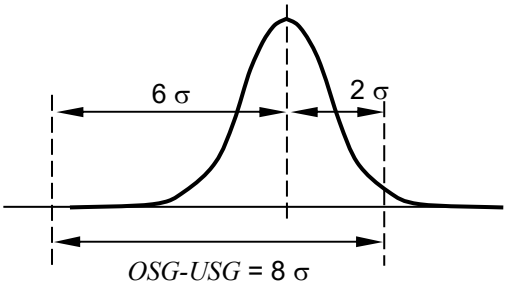
$$z = \frac{x_{soll} - \bar{x}}{(OSG - USG)/2}$$

für nicht mittigen Sollwert

Beispiele:



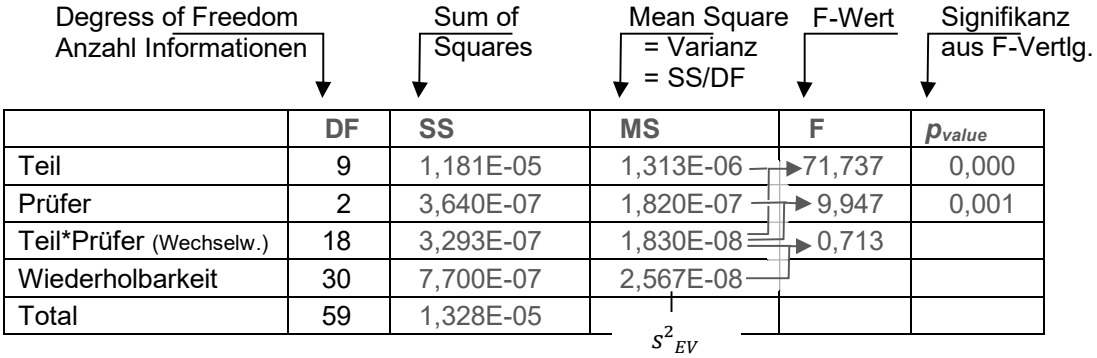
$C_p = 1{,}33 \quad C_{pu} = 1{,}33 \quad C_{po} = 1{,}33 \quad C_{pk} = 1{,}33$



$C_p = 1{,}33 \quad C_{pu} = 2{,}0 \quad C_{po} = 0{,}67 \quad C_{pk} = 0{,}67$

Mess-System-Analyse mit ANOVA

Die Einflüsse werden bei der ANOVA nicht über den Range und einem Korrekturfaktor, sondern über eine Streuungszerlegung bestimmt (siehe hierzu auch Kapitel *ANOVA*). Dabei setzen sich die Einflüsse aus der Variation der Teile, der Prüfer, sowie der Wechselwirkung zwischen diesen zusammen. Der größte Vorteil der ANOVA ist die Berücksichtigung der Wechselwirkung, weshalb dieses Verfahren zu bevorzugen ist.
Um die Einflüsse getrennt beurteilen zu können, zerlegt man die Summe der quadratischen Abweichungen über alle Messwerte in Teilsummen und betrachtet deren Varianzen. Die klassische Darstellung im angelsächsischen Sprachraum ist:



	DF	SS	MS	F	p_{value}
Teil	9	1,181E-05	1,313E-06	71,737	0,000
Prüfer	2	3,640E-07	1,820E-07	9,947	0,001
Teil*Prüfer (Wechselw.)	18	3,293E-07	1,830E-08	0,713	
Wiederholbarkeit	30	7,700E-07	2,567E-08		
Total	59	1,328E-05			

s^2_{EV}

Die Darstellung der MSA ist:

$6 \cdot \sqrt{s^2_{EV}}$ (Zusammenhang ohne WW, Zahlen im Beispiel nicht direkt vergleichbar)

	Sym.		Sym.	
Wiederholbarkeit	EV	9,080E-04	%EV	18,2
Prüfereinfluss	AV	5,351E-04	%AV	10,7
Wechselwirkung	IA	0,000E-01	%IA	0,0
Teilevariation	PV	2,782E-03	%PV	30,0
Messsystem	RR	1,054E-03	%R&R	21,1

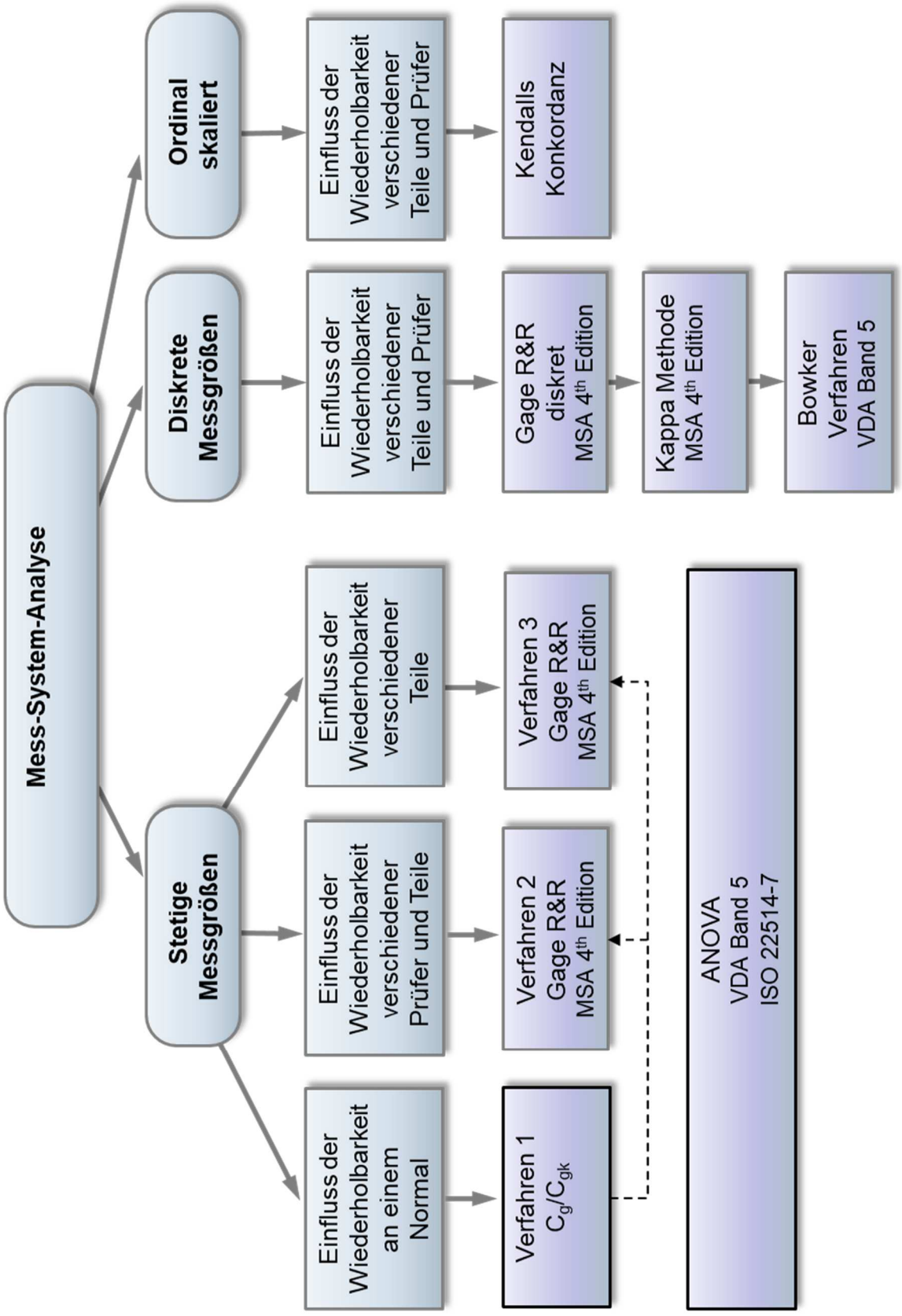
$RR = \sqrt{EV^2 + AV^2 + IA^2}$ $\quad$ $\%R\&R = \frac{RR}{T} \cdot 100\%$

Zunächst werden Quadratsummen der Tabellendaten horizontal und vertikal gebildet (Sum of Squares). Mit Hilfe der Freiheitsgrade *DF* entsteht hieraus die Varianz (Mean Square) und die Standardabweichung der Anteile. Ausgegeben wird hiervon der 6-fache Wert, was 99,73% der Teile beinhaltet. Über dem F-Wert als Verhältnis der Varianzen-Summen von Prüfer und Wiederholungen werden die Signifikanzen der Anteile bestimmt (in der Regel über den p_{value}).
Bei der Angabe der Beispielzahlen ist zu berücksichtigen, dass zur Verrechnung mit und ohne Wechselwirkungen andere Anteile entstehen.

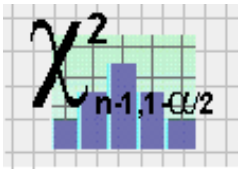
Geschachtelte (nested) ANOVA

Ist es nicht möglich, dass die Teile nach den jeweiligen Messungen ihre Eigenschaften behalten, z.B. bei zerstörenden Prüfungen, so ist eine sogenannte geschachtelte ANOVA anwendbar. Das Ergebnis der Teilevariation ist mit den Prüfern vermengt. Deshalb gibt es hier die Ausgabe Teil (Prüfer), was nicht mit der Wechselwirkung WW der normalen ANOVA zu verwechseln ist. Eine WW kann hier nicht ausgewertet werden.
Man erwartet für die Wiederholbarkeit, dass die Gruppen von Teilen vergleichbare Eigenschaften haben (gleiche Chargen).

Auswahlübersicht Mess-System-Analyse



Statistische Hypothesentests



Einführung

In einem Hypothesentest soll anhand einer Stichprobe eine Aussage auf die Datenkennwerte der Grundgesamtheit gemacht werden. Typische Formulierungen sind:

- Die **Nullhypothese** H_o behauptet:
  Es besteht Gleichheit
  (z.B. die Mittelwerte zweier Stichproben sind gleich, oder
  der Mittelwert einer angelieferten Charge entspricht der Vorgabe des Kunden,
  oder der Verbrauch zweier Fahrzeuge ist gleich, etc.).

- Die **Alternativ-Hypothese** H_1 behauptet:
  Es gibt einen Unterschied
  (z.B. die Mittelwerte zweier Stichproben sind ungleich, oder
  die angelieferte Ware ist fehlerhaft, etc.).

Aussagen hierzu sind mit einer unvermeidbaren Unsicherheit behaftet, die statistisch über eine Irrtumswahrscheinlichkeit bewertet wird.

Bei der Durchführung eines statistischen Tests können zwei Arten von Fehlern gemacht werden:

1. Die Nullhypothese H_o ist richtig und wird abgelehnt!
   ⇨ diesen Fehler bezeichnet man als Fehler 1. Art, oder den α-Fehler, oder das Produzentenrisiko.

2. Die Nullhypothese H_o wird angenommen, obwohl sie falsch ist!
   ⇨ diesen Fehler bezeichnet man als Fehler 2. Art, oder den β-Fehler, oder das Konsumentenrisiko.

Insgesamt gibt es folgende vier Situationen:

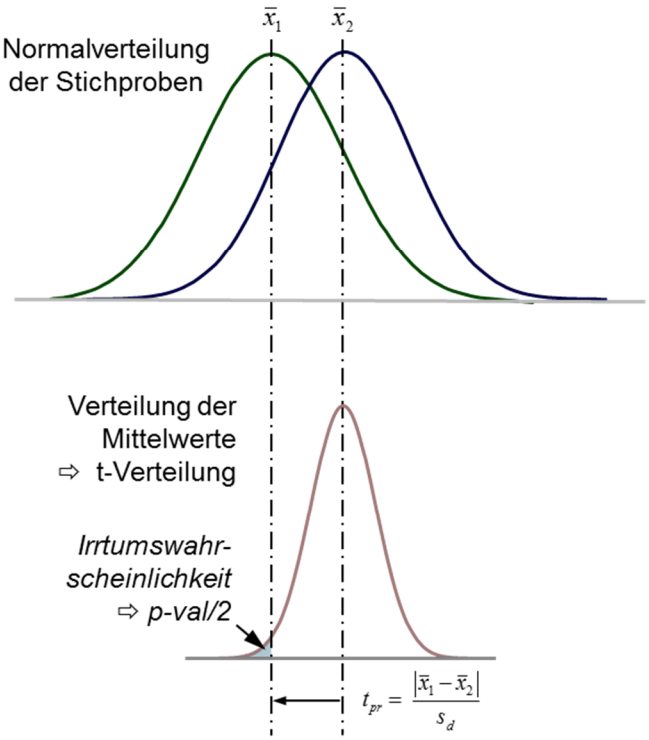
		Wirklichkeit	
		H_o	H_1
Entscheidung	H_o	richtig	β-Fehler (2. Art)
	H_1	α-Fehler (1. Art)	richtig

H_o : Nullhypothese; H_1 oder H_A : Alternativhypothese

Merke:
- Der α-Fehler beschreibt das Risiko einen „Effekt“ anzunehmen, den es gar nicht gibt.
- Der β-Fehler beschreibt das Risiko einen „Effekt“ zu übersehen.

Bestimmung des α-Fehlers am Beispiel Mittelwertvergleich

Es ist die Nullhypothese H_o zu prüfen : die Mittelwerte zweier Datenreihen sind gleich.



Der Abstand der Mittelwerte wird normiert auf eine gemeinsame Standardabweichung s_d

$$t_{pr} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} \qquad s_d = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}$$

für gleiche Stichproben-umfänge $n = n_1 = n_2$

Mit Hilfe der t-Verteilung (Studentverteilung) erhält man den gesuchten Wert für den Fehler 1. Art

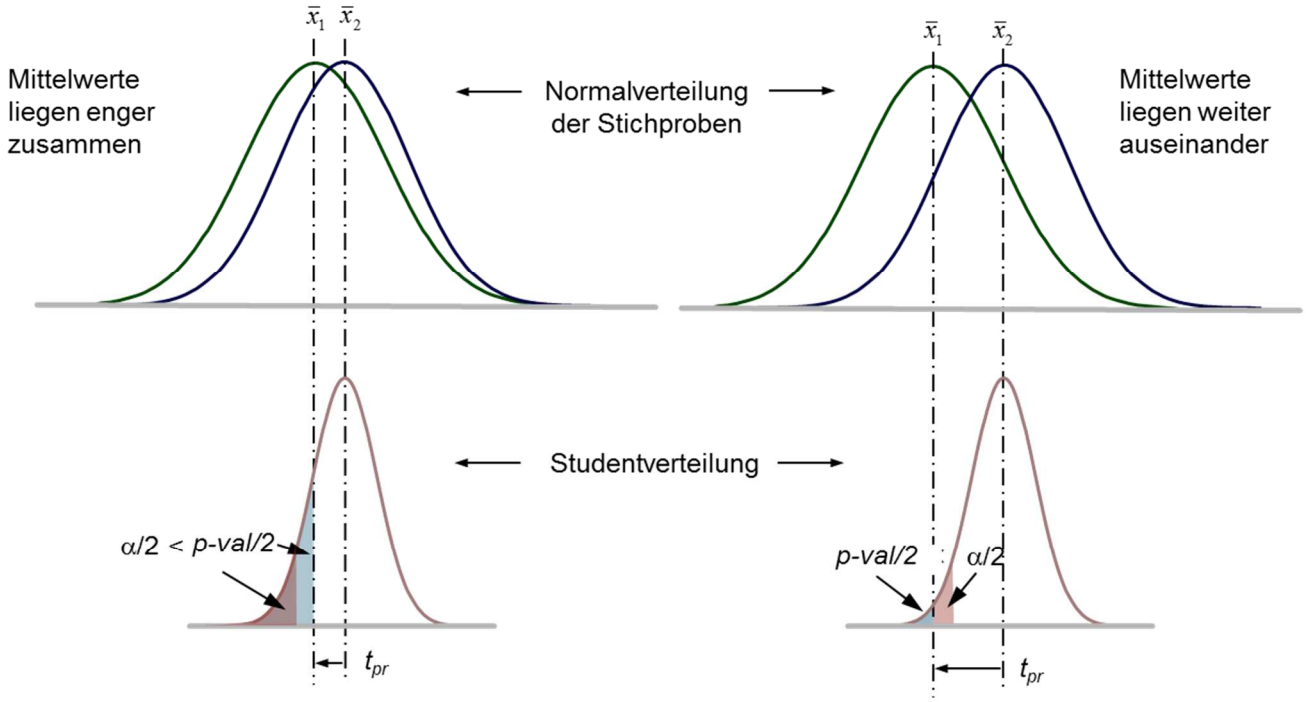
$$p\text{-}val = 2 \cdot \text{VertlgStudent}(-t_{pr}; f)$$

Freiheitsgrad $f = n_1 + n_2 - 2$
für gleiche Standardabw. der Stichproben.

Ist der Fehler 1. Art kleiner einer festgelegten Grenze von 5%, so wird die Nullhypothese auf Gleichheit abgelehnt.
Hinweis: Faktor 2 oben wegen zweiseitigem Test

Der p_{value}

Man legt für den Fehler 1. Art einen zulässigen Grenzwert für α fest, in der Regel 5%.
Den tatsächlich vorhandenen Wert nennt man den *p-value*



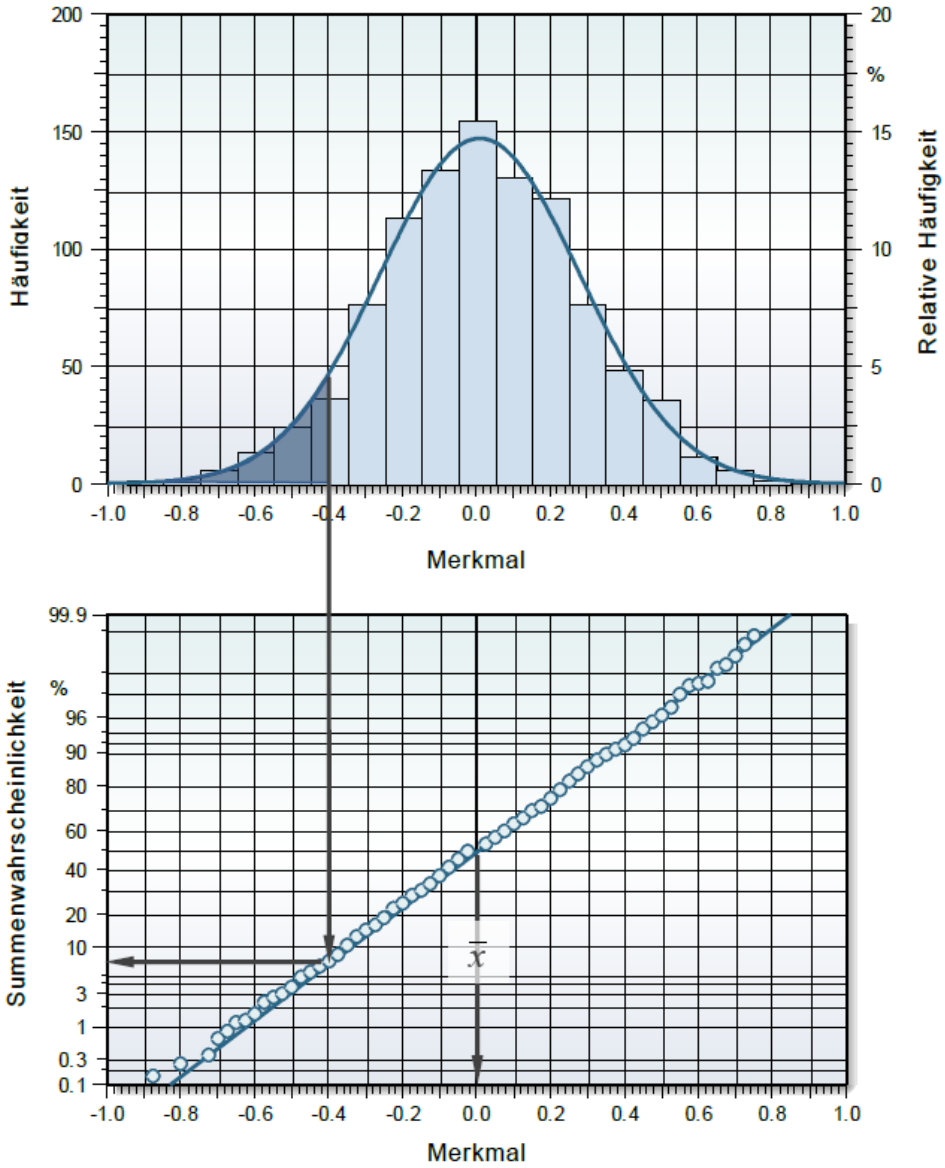
Mittelwertunterschied nicht signifikant.
⇨ $H_o : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ wird nicht verworfen

Mittelwertunterschied signifikant.
⇨ $H_o : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ wird verworfen

Die wichtigsten stetigen Verteilungen

Normalverteilung

Die Normalverteilung stellt die häufigste und gängigste Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung dar. Sie tritt auf, wenn zufällige Ereignisse auf einen Prozess wirken. Viele natur-, wirtschafts- und ingenieurswissenschaftliche Vorgänge lassen sich durch die Normalverteilung entweder exakt oder wenigstens in sehr guter Näherung beschreiben (vor allem Prozesse, die in mehreren Faktoren unabhängig voneinander in verschiedene Richtungen wirken).



$$h = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2}$$

x : Variable Merkmal
$\bar{x}$: Mittelwert
s : Standardabweichung

$$H = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2} dx$$

Integral ist hier nicht geschlossen lösbar.

Im oberen Histogramm werden die Daten in passende Klassen eingeteilt und gezählt, wie viele sich darin befinden. Die Gaußkurve stellt die ideale Wahrscheinlichkeitsdichte für dieses Histogramm dar und beschreibt den Verlauf, wenn man „unendlich“ viele Daten hätte. Im sogenannten Wahrscheinlichkeitsnetz unten kann man im Maßstab der Y-Achse ablesen wie viele Daten in Summe von links bis zu einem Wert x vorliegen. Dies ist die Fläche unter der Gaußkurve. Der Mittelwert liegt im Wahrscheinlichkeitsnetz bei 50% (hier bei x=0).

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Boxplot

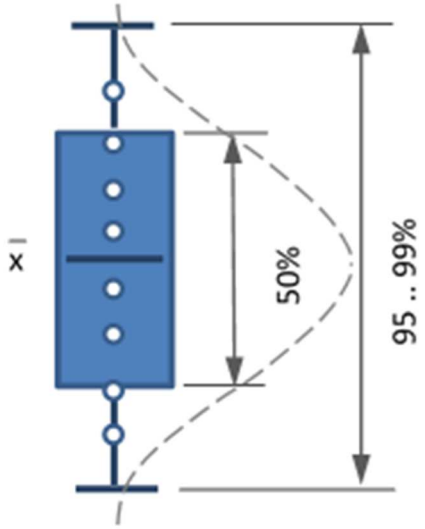
Der Boxplot, auch Box-Whisker-Plot genannt, ist eine spezielle Darstellung der Häufigkeitsverteilung. Ein Boxplot soll schnell einen Eindruck darüber vermitteln, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich verteilen.

Der große Vorteil ist hierbei, dass mehrere Datenreihen als Boxplots nebeneinander sehr komprimiert darstellbar sind, während ein Histogramm die gesamte Diagrammbreite für nur eine Datenreihe benötigt.

Grundsätzlich besteht ein Boxplot aus einem Rechteck, Box genannt, und zwei Verlängerungen mit begrenzenden Linien, meist Whisker oder Antennen genannt. Es gibt unterschiedliche Verfahren diese Bereiche zu bestimmen:

1. Normalverteilung

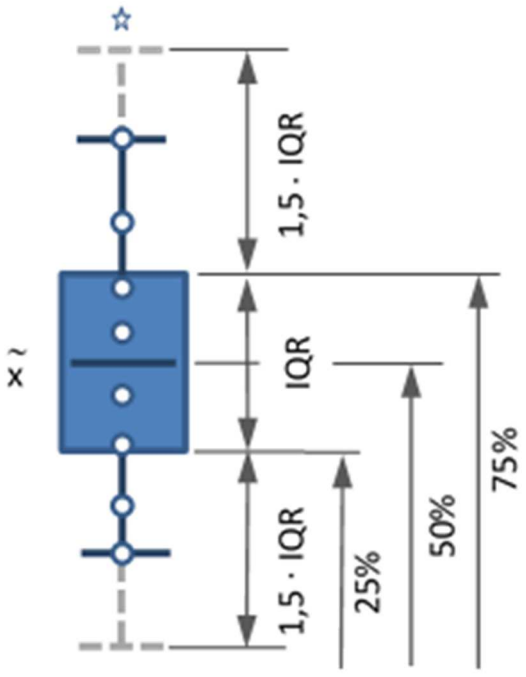
Aus den Daten werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Mit diesen Kennwerten lassen sich die Bereiche von 50% und den zu definierenden äußeren Whisker für z.B. 95% oder 99% festlegen. Diese Methode liefert gute Schätzwerte für den Box und die Whisker und ist nicht so stark von der zufälligen Lage einzelner Punkte abhängig.



2. Verteilungsunabhängig

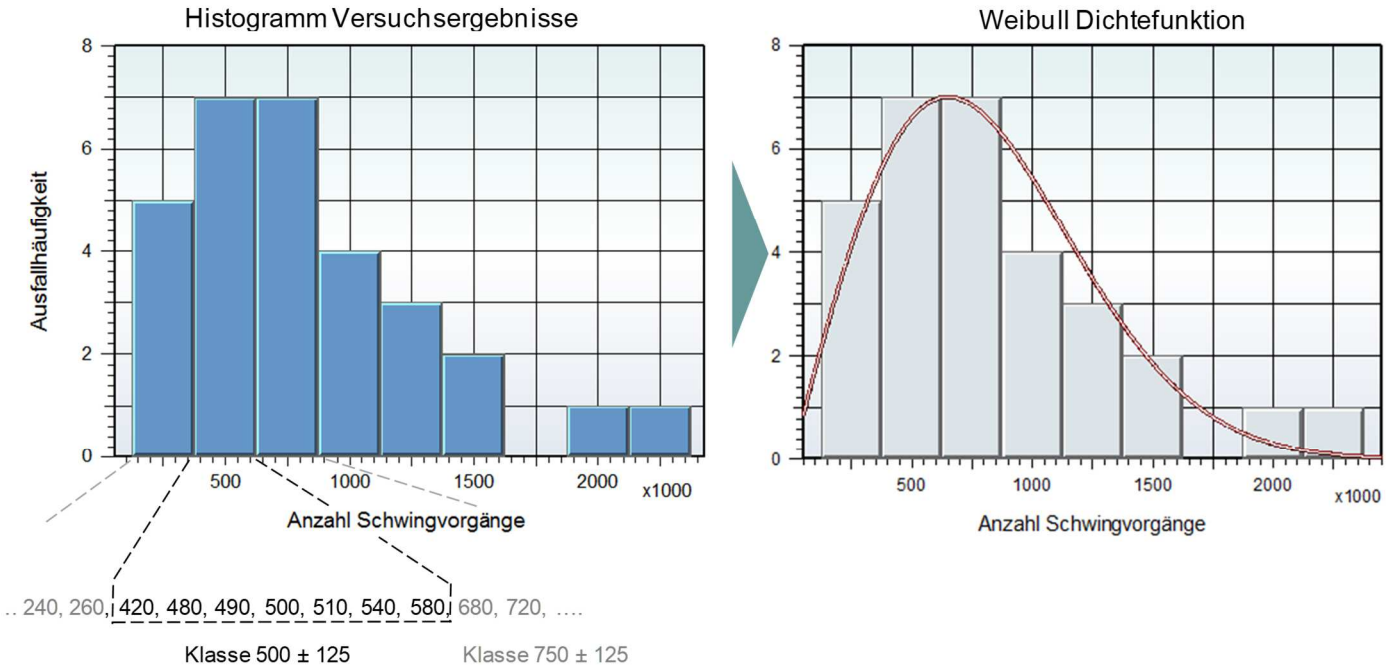
Aus den Häufigkeiten der sortierten Daten werden die Bereiche direkt bestimmt. Die Häufigkeit jedes i-ten Datenpunktes wird durch $H=i/(n+1)$ definiert. Bestimmte Literaturquellen verwenden $H=i/n$, wodurch die Bereiche etwas anders liegen.

In der Mitte des Boxplots befindet sich der Median (verteilungsunabhängiger Zentralwert). Der Box, in dem sich 50% aller Werte befinden, nennt man auch den Interquartil-Range, kurz IQR. Die Whisker liegen 1,5 · IQR ober- und unterhalb des 50%-Bereiches. Es wird jedoch nicht genau der Bereich von ±1,5 · IQR dargestellt, sondern nur bis zum nächst innerhalb liegendem Werte.
Liegen Werte außerhalb ±1,5 · IQR werden diese als „milde Ausreißer“ betrachtet und als Stern markiert.



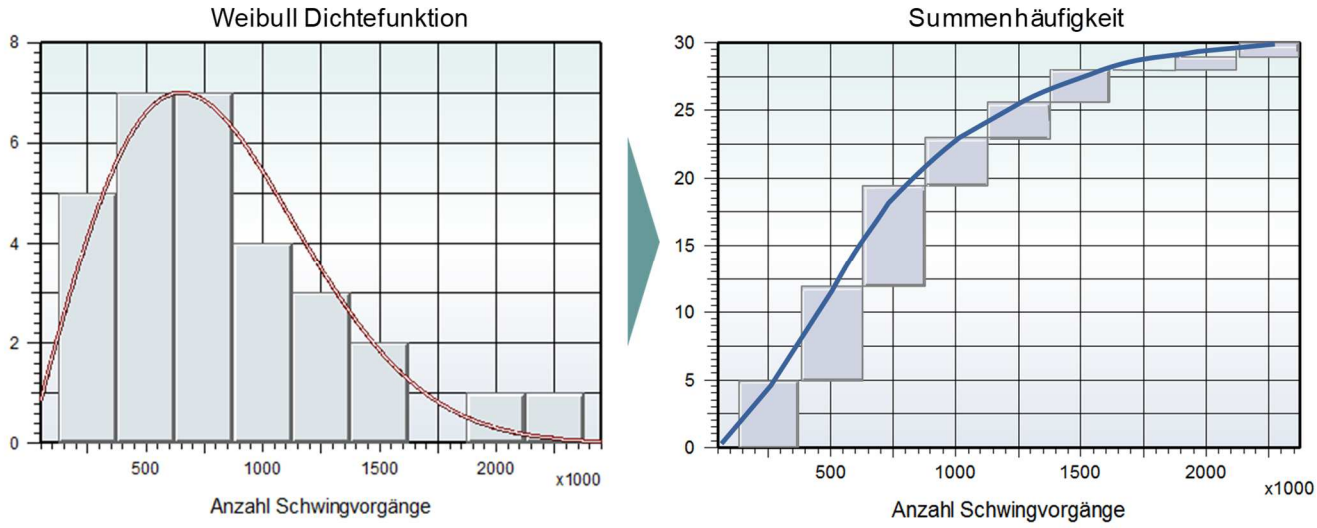
Weibull - Verteilung

Die von dem Schweden Waloddi Weibull entwickelte Verteilung ist eine universelle Verteilung, mit der die unterschiedlichsten Fragestellungen behandelt werden können. Am verbreitesten ist aber die Darstellung von Lebensdauerfragen. Im folgenden Beispiel wurde eine Gruppe von 30 Kugellagern bis zum Ausfall getestet (Schwingvorgänge). Durch eine entsprechende Klassierung ergibt sich ein Histogramm (Häufigkeiten der Ausfälle innerhalb einer Klasse):

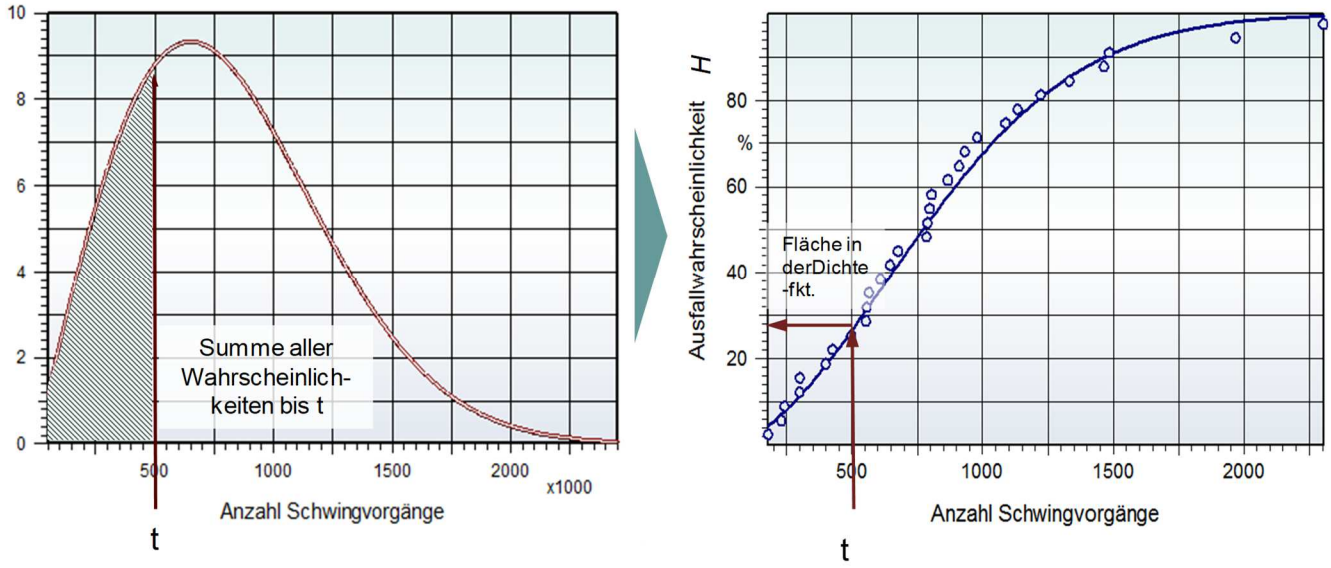


In der rechten Darstellung wird die sogenannte Weibull-Dichtefunktion als Kurve darüber gelegt. Typisch für Lebensdaueruntersuchungen ist, im Gegensatz zu Normalverteilung, der nicht symmetrische Verlauf. Laufzeiten beginnen ab > 0 und es gibt einige Bauteile, die überproportional lange halten.

Eine andere Darstellung ist die Summenhäufigkeit. Alle Häufigkeiten werden von links nach rechts aufsummiert. Erst die rechte Grafik stellt die eigentliche Verteilungsform dar.



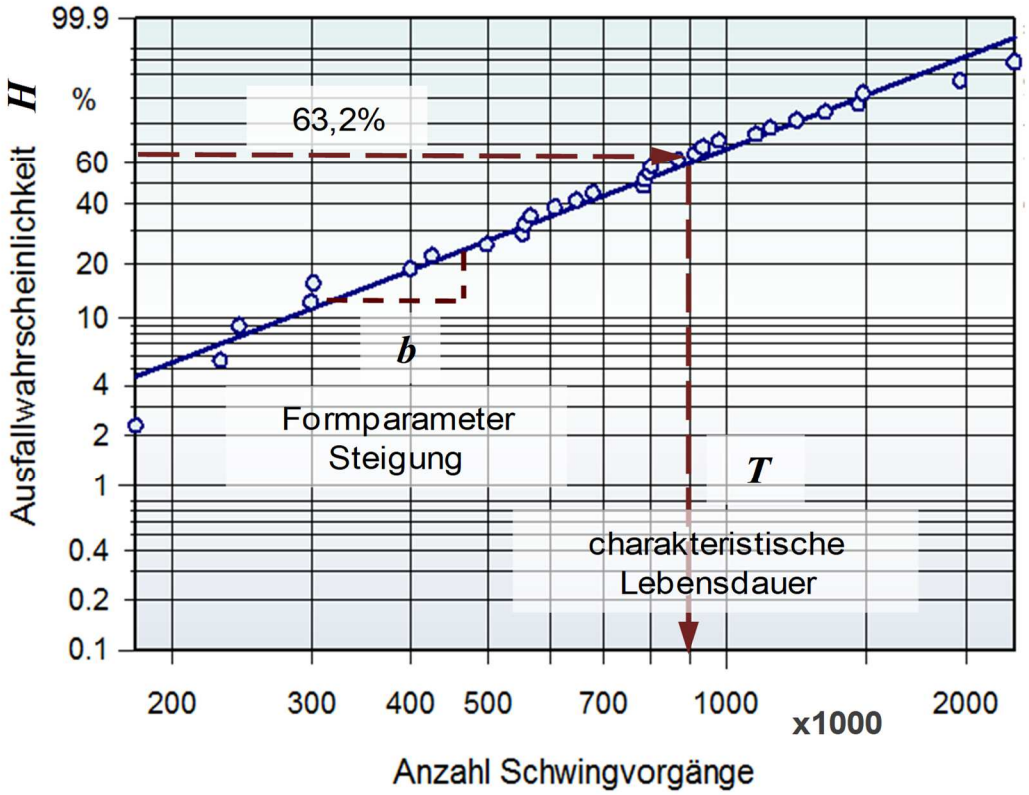
In der Praxis ist es interessanter, für eine definierte Laufzeit die Summe der Ausfälle zu nennen. Hier ohne Klassierung, ergibt die rechte Darstellung unmittelbar diese Ausfallmenge (Integral der Dichtefunktion links).



Letztlich erreicht man durch ein mehrfaches Logarithmieren der Achsen eine Weibull-Gerade und das Integral der Dichtefunktion ist eine mathematisch leicht zu handhabende Funktion, die es für die Normalverteilung nicht gibt. Zeitabhängige Ausfallmechanismen erscheinen als Gerade. Abweichungen von der Geraden können als unterschiedliche Ausfallursachen interpretiert werden. Für Lebensdauer und Zuverlässigkeit ist die Weibull-Verteilung weltweiter Standard.

$$H = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}}$$

H : Ausfallhäufigkeit
t : Laufzeit/strecke
T : charakt. Lebensdauer (engl. η)
b : Formparameter (engl. β)
Steigung der Geraden



Belastungs-Testmatrix

Definition:

Die Belastungs-Testmatrix nutzt die Informationen der sogenannten „Noise-Factors“ von Taguchi und stellt die notwendigen Tests gegenüber. Im Gegensatz zur klassischen Robustheits-Checkliste aus der Six Sigma Welt werden hier jedoch keine Bezüge auf die Funktionen, sondern nur auf die Fehlerarten dargestellt.

Ziel und Nutzen:

Die Belastungs-Testmatrix zeigt auf, was für Belastungen und Fehlerarten durch welche Tests abgedeckt werden. Durch zusätzliche Angaben von Laufzeiten, Raffungsfaktoren, etc. ist eine quantitative Aussage auf die Zuverlässigkeit *R* möglich.

Vorgehensweise:

Beziehungen zwischen Belastungen (Einflussarten) ❶ und Fehlermode ❷ herstellen ❸. Angabe der Weibull-Formparameter b ❹ für die Fehlermode (geschätzt aus Vorgängerprojekten). Definition der Tests ❺ mit Angabe von Stichprobenumfang, Lebensdauerverhältnis und Raffungsfaktoren. Angabe der ausgefallenen Einheiten ❻. Optionale Berechnung der zu erwartenden Gesamtzuverlässigkeit R_{ges}

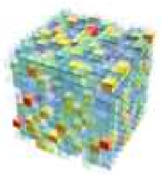
Beispiel:

❺

Test i	Dauerlauf	Thermoschock	Kältetest	Shakertest	Umweltsimulation	Voraltern (Klimak.)	
	5	2	2	6	2	10	Anz. Prüflinge n_i
	2,5	5	1	10	1,5	3	Leb.-Verh. Lv_i
	1,5	5	2	6	2	6	Raffungsfakt. κ_{ik}

❷ Fehlerort/-Mode FM ❹ ❻

Fehlerort/-Mode FM	b	Dauerlauf	Thermoschock	Kältetest	Shakertest	Umweltsimulation	Voraltern (Klimak.)	
Gebrochen	3,5	2	0	0	0	0	0	Anz. Ausfälle x_i
Verschleiß	3	0	1	0	0	0	0	
Funktionsminderung	2,5	0	0	0	0	0	0	
Geräusche	2	0	0	0	1	0	0	
Fehlereintrag	1,5	0	0	0	0	4	0	



❶ Einflussarten ❸

Belastungen und Störgrößen		Fehlereintrag	Geräusche	Funktionsminderung	Verschleiß	Gebrochen	Dauerlauf	Thermoschock	Kältetest	Shakertest	Umweltsimulation	Voraltern (Klimak.)
Kundenanwendung	Fahrprofil - Belastung		x	x	x	x	x			x	x	
	Kaltstarts	x		x			x		x			
	Sonderereignisse		x	x		x	x	x				
	Stillstandszeiten			x								x
Umwelteinflüsse	Temperaturwechsel			x	x		x	x	x		x	
	Extremtemperaturen	x		x	x			x				x
	Verschmutzung			x	x		x					
	Feuchtigkeit			x	x		x				x	
Zeiteinflüsse	Korrosion				x						x	
	Versprödung			x				x			x	x
	Setzverhalten		x			x	x	x		x	x	x
	Partikelzunahme				x		x					
Wechselwirkungen	Hitzeschild	x										
	Abgas		x		x	x						
	Rückströmung	x			x							
	Ölkontamination				x							
Teil zu Teil Einfluss	Toleranzen	x	x	x	x	x						
	Charge	x	x	x	x	x						
	Material	x	x	x	x	x						
	Oberfläche				x	x						

Stichwortverzeichnis

χ^2-Verteilung....123
3-parametrige Weibull....143
4M Methode....13
4-parametrige Normalverteilung....133
4-parametrige Weibull-Verteilung....144
5-parametrige Normalverteilung....133
Abbruchkriterium, Weibull-Test....152
abhängige Größen, Wirkdiagramm....19
Abhängigkeiten, Wirkdiagramm....14
Abknicken Wöhler....176
Abstandsdaten, Clusteranalyse....77
Abstandsmatrix, Clusteranalyse....79
Abweichungen von Normalverteilung....131
adjustiertes Bestimmheitsmaß....50
agglomerative Verfahren....77
Ähnlichkeitsmerkmale, Clusteranalyse....77
AHP....21
Aktivierungsenergie, Arrhenius....179
Aktivsummen....18
alternative Ausfallmechanismen....144
alternative Ausfallursachen....133
Alternativhypothese....103
Alternativhypothese, Hypothesentests....106
Alternativhypothese, Teststärke....106
Alterungseffekt....139
ANALYSE SixSigma....10
Analysis of Variance....40
Analytischer Hierarchieprozess....21
Anderson-Darling Test, Normalv....110
Anderson-Darling Test, Weibull....111
ANOVA....40, 52, 188
ANOVA - Grundprinzip....40
ANOVA Messsystemanalyse....88
Anteilskombinationen, DoE....34
Anwärterprognose....154, 157
Appraiser Variation....86
Approximierung, Weibull 3-parametrig....143
äquidistante Stufen D-Optimal....33
Arcus-Sinus-Funktion....63
Arrhenius-Modell....178
Auflösung Versuchspläne....28
ausfallfreie Zeit....143, 158
Ausfallmerkmal....147
Ausfallrate....156
Ausfallrate momentane....134
Ausfallrate, Arrhenius....178
Ausfallursachen verschiedene....144
Ausfallwahrscheinlichkeit....121, 140
Ausfallwahrscheinlichkeiten System....161
Ausgleichsgerade, Weibull....143
Ausreißer PLS....76
Ausreißertest....120
Ausreißertest Regression, Grubbs....55
Ausreißertest, Grubbs....120
Ausreißertest, mehrere....120
Ausreißertest, Pearson....120
Aussagewahrscheinlichkeit....162, 165
Aussagewahrscheinlichkeit, Trennschärfe....107
Aussagewahrscheinlichkeit, Weibull....141
Aussortierung Histogramm....131
Auswahlkriterien, Versuchspläne....38
Auswertung, DoE....40
B_{10} - Weibull-Kennwert....156
Bartlett-Test....118
Baumstruktur Clusteranalyse....80
Baumstruktur, FTA....22
Baureihe, Schichtlinie....180
Bauteilbelastung Wöhler....174
Bauteilspannung, Wöhler....173
Bayes-Methode....165
Bayessche Statistik....161
Belastung Wöhler....174
Belastungsgrenze, Wöhler....173
Belastungs-Testmatrix....167
Belastungszeit....149
Beschleunigungsfaktor, Arrhenius....178
Bestimmtheitsmaß....49
Bestimmtheitsmaß, adjustiertes....50
Bestimmtheitsmaß, diskrete Regression....66
Bestimmtheitsmaß, Weibull....143
Bestimmtheitsmaß, Weibull....146
Bestpunkt Optimierung....56, 57
Beta-Binomial....142
Beta-Binomialverteilung....140, 141
Beta-Verteilung....187
betragsnormale Verteilung....132
Betragsnormalverteilung, Toleranzsimulation....97
Betragsverteilung 1. Art....82
Betragsverteilung 2. Art....83
Betriebsfestigkeit, Lognormalverteilung....135
Bewertungseinfluss Matrix....17
Beyer....165
Beziehungen, Systemanalyse....12
Bezugsgröße, Messsystemanalyse....87
Biegeversuche....132
bimodale Verteilung....133, 144
Binomial-Koeffizient....125
Binomialsatz....162
Binomial-Test....114
Binomialverteilung....140, 184
Blockschaltbild....160
Bowker-Verfahren....92
Box-Cox-Transformation....55
Boxplot....130
Brainstorming....9
Bravais....43
Bravais, Korrelation nach....43
Bremsbeläge....139
Bremsscheibe Beispiel Weibull....143
Bruch....134
Bruchursachen....132
CAD-Modell....98
Cauchy-Verteilung....187
CCC....31

CCD 31
CCF 31
Central Composite Design 31
Chancen, Logit-Modell 64
charakteristische Lebensdauer, Vertrauensbereich 141, 144
Chargeneinfluss Ausfallursachen 133
chemische Reaktion, Arrhenius 178
chemischer Faktor in DoE 34
City-Block Distanz 77
Clusteranalyse 77
Clusterzentrum 77
Cm, Cmk 84
Coffin-Manson-Modell 179
Cohen's Kappa 92
CONTROL SixSigma 10
Correlation Loading Plot 76
Cp, Cpk 81, 85
Data Mining 77
Datenreduktion, Clusteranalyse 77
Datenreduktion, PCA 71
Dauerfestigkeit 175
Dauerfestigkeit, Wöhler 173
DEFINE SixSigma 10
Dendrogramm 80
Design-Scorecard 10
Determinante 33
Devianz-Test 66
DFSS 9
Diagonalmatrix 66
Differenzdevianz 66
DIN 25424 22
DIN EN 61649 162
diskrete Gage R&R 91
diskrete Regression 62
diskrete Verteilungen 184
Distanzmatrix, Clusteranalyse 78
DMADV SixSigma 9
DMAIC SixSigma 9
DoE 26
doppellogarithmisch, Wöhler 173
D-Optimal Vorteile 33
D-Optimal, Mischungspläne 35
D-Optimal, Versuchsanzahl 37
D-Optimale Versuchspläne 33
Dreifachwechselwirkung 28
Duncan 86
Effekt, grafische Darstellung 46
Effekt, sichere Ermittlung 36
Eigenerwärmung, Beispiel Wirkdiagramm 14
Eigenvektor 72
Eigenwert 72
Eigenwerte 72
Eigenwertproblem 72
Einflussgrößen DoE 26
Eingriffsgrenzen, Regelkarten 99, 101
Eintrittswahrscheinlichkeit
  diskrete Regression 64
Elastomer, Temperaturabhängigkeit 178
elektronische Bauteile, Temperatureinfluss 178
Elementar-Miner 174, 177
Ellipsen, Korrelations Ladungen 76
Entwicklungsstände 161
Epps Pulley Test 112
Equipment Variation 86
erfolgsorientiertes Wirkdiagramm 13
Erfüllungsgrad Optimierung 56
erklärte Abweichung, ANOVA 40
Ersatzteile, Weibull-Verlauf 158
Erwartungswert, Weibull 156
Erweiterungsmöglichkeit D-Optimal 33
euklidische Distanz 77
euklidsche Distanz 78
exakter Test nach Fisher 125
Exklusiv-Oder, FTA 23
Exponent
  Box-Cox 55
Exponentialform, Weibull 148
Exponentialfunktion 147
Exponentialgleichung 147
Exponential-Verteilung 139, 188
Extrem-Verteilung 188
Extremwert-Verteilungen 145
Exzess 113
Fähigkeitskennzahl 81
Fahrzeugalter 180
Faktoren, kategoriale 35
Faustformel, Arrhenius 179
Fehlende Daten, Weibull 158
Fehlentscheidung, Hypothesentests 106
Fehler 1. Art, DoE-Wiederholungen 36
Fehler 1. Art, Hypothesentests 103
Fehler 2. Art, DoE-Wiederholungen 36
Fehler 2. Art, Hypothesentests 103
Fehler der Regression 51
Fehleranteil Binomial-Test 114
Fehleranzahl Poisson 185
Fehlerbaumanalyse 161
Fehlerbild 135
Fehlerfortpflanzungsgesetz 96
fehlerhafter Einheiten, Regelkarten 102
Fehlermode 167
fehlerorientiertes Wirkdiagramm 13
Fehlerquadrate, Minimierung Weibull 140
Fehlerquote, Beispiel 108
Fehlerquote, Hypothesentest 108
Fehlerraten 123
Felddatenauswertung 154
Fertigungsfehler 139
Fischgräten-Diagramm 13
Fisher Test exakt 125
Fisher-Matrix 142
Fisher-Verteilung 188
Fleiss-Kappa 92
Flugzeugindustrie 22
Flüssigkeiten, Faktor in DoE 34
FMEA 24
Freiheitsgrade, diskrete Regression 63
Freiheitsgrade, Modell-ANOVA 50
Frühausfälle 139
FTA 22
F-Test 117
Funktionsansatz Verschleißhochrechnung 171
F-Wert, ANOVA 40
Gage R&R 91
Gamma-Verteilung 188

Garantiezeit
Weibull-Verlauf außerhalb 158
Gegenwahrscheinlichkeit 64
General Electric 9
Generator für Parameter, DoE 28
Geometrie-Einfluss, Systemanalyse 20
geometrische-Verteilung 186
Geradenabschnitte 146
Geräteeinfluss, Messmittelfähigkeit 89
Gesamtabweichung, ANOVA 40
Gesamtsystem-Zuverlässigkeit 160
Gesamtvarianz, PCA 72
gesättigter Versuchsplan 29
geschachtelte ANOVA 88
gestutzte Verteilung 131
gewichtete Regression 65
Gewichtung, Bewertungsmatrix 21
Gewichtung, Optimierung 56
Glasproben 134
gleichzeitiger Test 149
Grad, Mischungsplan 34
Grafische Darstellung Wechselwirkung 47
Grundgesamtheit, Weibull-Vertrauensbereich 141
Grundstufe, kategoriale Faktoren 36
Gruppe in Normalverteilung 131
Gruppenbildung Histogramm 131
Gruppierung, Clusteranalyse 77
gültige Daten 134
gut/schlecht Beurteilung 62
Güte des Regressionsmodells 48
Gütezahl Reproduzierbarkeit 52
Haibach 174
Häufigkeitsruppen 67
Häufigkeitsverteilung 130
Boxplot 130
Hauptachse, PCA 71
Hauptachsen 71
Haupteffekte, Mischungsplan 34
Hauptkomponenten 71
Hauptkomponentenanalyse 71, 73
Herstellungsprozess 81
Heterogenitätsmaß 77
hierarchisch agglomeratives Verfahren 78
hierarchische Methoden 77
Histogramm 128, 137
historische Daten 54, 60
Hochrechnung Schichtlinie 180
hypergeometrische Verteilung 125, 186
Hypothesentest 103
IDOV 9
IMPROVE SixSigma 10
Inbetriebnahme 181
Inclusions, D-Optimal 38
Indikator 99
Inspektion 152
Intensitäts-Beziehungs-Matrix 15, 16
Intervallzensierte Daten 152, 157
Inverse Power Law 179
Ishikawa 13, 19
ISO 22514 89
Jarque-Bera-Test 113
kammförmige Verteilung 131
Kappa (Cohens) 91
kategoriale Faktoren 35
kategoriale Merkmale Clusteranalyse 80
Kendall's Konkordanzkoeffizient 93
Kerbwirkung 132
Kick-Off Meeting 10
Klassierung 128
Klassierung, diskrete Regression 62
Klassierungsfehler Histogramm 131
Kleppmann 63
Kleppmann, DoE-Wiederholungen 37
K-Means-Verfahren 77
Kollektiv (Lastwechsel-) 173
Kolmogoroff-Smirnow 111
Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstest 109
Kombinationen Parameter 17
Kommutator, Verschleißbeispiel 171
Kompensationseffekt, Fehlerfortpflanzung 96
Komponente, PLS 76
Komponenten in DoE 34
Komponenten, Mischungspläne 34
Komponenten-Zuverlässigkeiten im System 160
Konfidenzinterval 55
Konkurrierende Ausfallmechanismen 144
Konstruktionsmerkmale, Verteilungen 83
Konsumentenrisiko, Hypothesentests 103
Kontingenztafel 123, 125
Koordinatensystems, PCA 71
Korrektur des Prozesses 99
Korrelation, historische Daten 60
Korrelation, kategoriale Faktoren 36
Korrelations Ladungen 76
Korrelationskoeffizient 49, 77
Korrelations-Ladungen 72
Korrelationsmatrix, Clusteranalyse 77
Korrelationsrechnung 43
korrelierende Daten 60
korrelierende Daten, PLS 73
Kreuztabellen 67
Kreuzvalidierung 74
Kriterium Bewertungsmatrix 21
kritischer Verschleißpunkt 172
Krümmung Weibull-Kurve 147
KS-Test 109
kubischer Ansatz, DoE-Modell 26
kubisches Modell 31
Kunststoff Temperaturabhängigkeit 178
Kurtosis 113
Kurvendiagramm 46
Kurvenpaare, Wechselwirkungen 47
Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung 84
Kurzzeitfestigkeitsbereich 173
Labortests 149
Lack of Fit 51
Ladungs-Vektor PLS 74
Laplace-Verteilung 189
Larson-Nomogramm 162
Lastkollektiv,
Raffungstest 177
Lastpunkte, Wöhler 176
Lastwechsel Wöhler 173

Lastwechselzahl Wöhler 174
Latent Variables 72
Laufstrecke 154
Laufzeiten, Sudden Death 149
Lauster 165
Least-Square-Methode, Weibull 140
Lebensdauerende, Verschleiß 172
Lebensdauerhochrechnung 171
Lebensdauertest, Sudden-Death 149
Lebensdauerversuche 10
Leitfaden-Tabellen 191
Levene's Test 118
Likelihood-Funktion 65
linearisierte Weibull-Skalierung 140
Linearitätstest 119
linkszensierte Daten 152, 157
Log Likelihood 65
Logarithmieren Normalverteilung 131
logarithmischer Maßstab Weibull 139
Logistik-Verteilung 189
logistische Verteilungsfunktion 64
logistische Regression 189
Logit-Modell 64
Lognormalverteilung 83, 135, 144, 183
Lognormalverteilung, Prozessfähigkeit 82
lokales Optimum 77
Mann Test 116
Maschine, Einfluss Wirkdiagramm 13
Maschinenfähigkeitsuntersuchung 84
Maßkette 96
Material, Einfluss Wirkdiagramm 13
Materialeinfluss Wöhler 175
Material-Einfluss, Systemanalyse 20
mathematisches Modell D-Optimal 33
Matrix-Struktur 12
Matrizenform Regression 46
Maxima Optimierung 56
Maximum-Likelihood 153, 161
Maximum-Likelihood, Weibull 140
Maximum-Likelihood-Methode 65, 133, 134, 152
Max-Likelihood-Methode 146
MEASURE SixSigma 10
Median, Vorzeichentest 117
Median, Weibull 156
Median-Rang 140
mehrparametrige Normalverteilung 132
mehrparametrige Verteilung 144
Mensch, Einfluss Wirkdiagramm 13
Messaufbau 49
Messfehler, Einfluss auf Regression 51
Messmittelfähigkeit 85
Messprozess 89
Messsystemanalyse 85, 88, 89, 91
Messung, Einfluss Wirkdiagramm 13
Messunsicherheit 87, 89
Messunsicherheit verringern 90
Methode, Einfluss Wirkdiagramm 13
MFU 84
Mindestanforderung, Success Run 164
Mindestzuverlässigkeit 164
Mindeszuverlässigkeit 165
Mind-Mapping 9
Minimum Optimierung 56
MIS 181, 182, 183
Mischungspläne 34
Mischungspläne Auswertung von 72
Mischverteilung 131, 132, 144
Mischverteilung, Weibull 145, 146, 158
Mittelwerttest, Normalverteilt 114
Mittelwertverschiebung 81
Mitwelt, Einfluss Wirkdiagramm 13
ML-Methode 65
MnP 180
Mock 141
Modell-ANOVA 52
Modellgleichung 46
Modellgleichung grafisch 46
Modellschätzer, diskrete Regression 65
Modellschwäche 51
Modellvorhersage 50
Monate nach Produktion 180
Monte-Carlo-Simulation 98
Month in Service 181
Mood's Median Test 115
Morphologischer Kasten 9
MR 72
MSA 87
MTTF 156
Multikollinearität 53
Multiple Regression 45, 191
Multivariate Datenauswertung 71
Näherungsformel 140
ndc 87
nested ANOVA 88
Netzwerkanalyse 16
Nicht schadhafte Teile 153, 156
nichtlinearer Weibull-Verlauf 147
Nichtlinearitäten, DoE-Modell 26
Nichtlinearitäten, Mischungspläne 35
NIPALS 73
Noise-Factors 167
Normalverteilung 128
Normalverteilung zensiert 134
Normalverteilung, Prozessfähigkeit 81
Normalverteilung, Shapiro-Wilk Test 109
Normiert 54
Nullhypothese 103, 121, 159
Häufigkeitsgruppen 69
Nullhypothese, ANOVA 40
Nullhypothese, Hypothesentests 106
Nullhypothese, Regressionssteigung 53
Null-Modell 66
number of distinct categorie 87
Nutzungsbeginn 181, 182
Nutzungszeit 181, 182
Objektdistanz, Clusteranalyse 77
OEG 99
one leave out 74
One-Way ANOVA balanciert 41
optimale Einstellung 56
Optimierung mehrere Zielgrößen 56
Ordnungszahl 140
orthogonal 29
orthogonale Versuchsanordnung 29
Over-Fit 50

OWG 99
Palmgren-Miner 173
Pareto-Analyse 16
Paretoauswertung 15
Pareto-Verteilung 189
  Häufigkeitsgruppen 70
Partial Least Squares 72
partitionierende Methoden 77
Passivsummen 18
PCA 71, 73
Pearson, Korrelation nach 43
Percentil-Methode 83
Perlschnurverfahren 176
PFU 84
physikalische Ursache, Wechselwirkung 47
Placket-Burman-Versuchspläne 29
plötzlicher Tod 149
PLS 72
Poisson 121
Poisson-Verteilung 185
Power, DoE-Wiederholungen 37
Power, Teststärke 106
p-Regelkarte 102
Principal Component Analysis 71, 73
Priorisierung-Bewertung 21
Probit, diskrete Regression 64
Problemanalyse 13
Produktentstehungsprozess 9
Produktionsmonate, Schichtlinie 180
Produzentenrisiko, Hypothesentests 103
produzierte Fahrzeuge 183
Prognose 55
  Wahrscheinlichkeiten 63
Prognose - Regressionsmodell 73
Project Charter 10
Prozessdaten Toleranzsimulation 97
Prozessdokumentation 10
Prozessfähigkeit 81
Prozessfähigkeitsuntersuchung 84
Prozessfähigkeitswert 97
Prozessregelkarte 99
Prozessschwankung 19
Prozessstreuung 81
Prozessthemen, Wirkdiagramm 19
Prozessüberwachung 10
Prozessveränderungen, Schichtlinie 180
Prüfereinfluss, Messmittelfähigkeit 89
Prüfintervall 152
Pseudo Bestimmtheitsmaß 66
Pugh-Matrix 9
Pumpen 172
pure Error 51
p-value 52, 66, 74, 88, 110, 112, 117, 124, 126
Q^2-Maß 50
qualitative Größen 35
qualitative Merkmale, Regelkarten 101
qualitative Zielgröße 62
Qualitätsaussage 163
Qualitätsregelkarte 99, 100
Querbeziehung 14
Querverbindung 15, 20
Quote, diskrete Regression 64
Raffungsfaktor 166
  Arrhenius 178
Raffungsfaktor Bestimmung 177
Randgipflige Verteilung 131
Randhäufung Histogramm 131
Randsummen, Kontingenztafel 125
Rangfolge, Bewertungsmatrix 21
Rangfolge, U-Test 116
Rangkorrelation 44
Rangkorrelationskoeffizient 44
Rangzahl 94
Rangzahl, Sudden-Death 149
Rayleigh-Verteilung 83, 189
Reaktionsgeschwindigkeit 178
reaktives Feld 18
Rechner-Simulation 98
Rechteckverteilung 131
Rechtskrümmung, Weibull 144
Rechtszensiert 156
Redundanz 161
Referenzwert 91
Regelkarte 99
Regression, Linearitätstest 119
Regressionsansatz PLS 74
Regressionskoeffizienten, diskrete Regr 65
relative Häufigkeiten, diskrete Regression 63
Reproduzierbarkeit, Gütezahl Regression 52
Residuen
  Box-Cox 55
Residuen, Regression 51
Residuen-Darstellung 48
Residuen-Matrix PLS 74
Residuen-Vektor PLS 74
Restdicke, Verschleißbeispiel 172
Risiko, Hypothesentests 106
RMS-Error 54
Rossow, Häufigkeiten nach 136
Schädigung, Wöhler 173
Schädigungsgrad messbar 171
Schichtlinie, Korrektur 183
Schichtlinien, Nutzungszeit 182
Schichtlinien, Produktionsdatum 180
schiefe Verteilung 131
schrittweise Regression 29
schwächstes Glied 144, 145
schwarz/weiß 62
Score Plot 76
Scores 76
Score-Werte 72
Screening 28, 29, 30
Shainin 3
Shapiro-Wilk-Test 109
Shewhart 100
Sicherheitsanalysen 22
Signifikanzniveau, DoE-Wiederholungen 36
SixSigma 9
Sollwert, Optimierung 56
Spaltenprodukte, teilfaktorielle DoE 28
Spannweite, Messsystemanalyse 86
SPC 99
Spearman 44
Spezifikation 81

sprödbrechend 145
Stahlbauteile, Festigkeit....175
Stakeholderanalyse....10
Standardabweichung aus Toleranz....97
Standardabweichung, Gesamtmodell 54
Standardabweichung, Regelkarten 99
Standardisieren, Datenspalten....54
Stärken-/Schwächen-Analyse....9
Startcluster....77
Statistische Tests 103
Steigung Weibull 139, 175
Steigung Wöhler....176
Steigungstest 120
Sterbekurve....147
stetige Verteilungen....128
Stichprobe
Häufigkeitsgruppen 67
Stichprobe, kleine....125
Stichprobe, unvollständiger Test....149
Stichprobe, Weibull-Vertrauensbereich....141
Stichprobengröße, Binomialansatz 162
Stichprobengröße, DoE....36
Stichprobengröße, Hypothesentests....107
Stichprobengröße, Mindestzuv. Vorkenntnisse 165
Stichprobengröße, Regelkarten 100
Stichprobengröße, Teststärke....106
Stichprobenkenngröße 99
Stichprobenüberwachung 10
stochastische Fehler....139
Streuung Modell-ANOVA....49
Streuungen, Toleranzberechnung....96
Streuungszerlegung 40
Streuungszerlegung, Modell-ANOVA....52
STR-Statistik 120
Struktur Clusteranalyse 77
Student-Verteilung....190
Stufenabstände D-Optimal 33
Success-Run....161
Sudden Death Testing....149
Sum of Squares 50
Summenhäufigkeit, Lognormal 135
Summenhäufigkeit, Normalvertlg. 128
Summenhäufigkeit, Weibull 137, 140
Symmetrie....117
Systemanalyse....12, 16
systematische Untersuchung....12
Systemzuverlässigkeit....160, 172
Tabellenfunktion Vollfaktoriell 27
Taguchi Versuchspläne 29
Teilevariation....87
teilfaktorielle Versuchspläne 28, 29
Teilmenge, Weibull-Verlauf....158
Teiloptimum 56
Temperaturabhängigkeit, Coffin-Manson 179
Temperatureinfluss, Lebensdauer 178
Testbedingungen Weibull 175
Teststärke 106
Testzeit, Sudden-Death....150
Tetraeder, Mischungsplan 34
textliche Benennungen, Parameter DoE 35
theoretische Lebensdauer, Verschleißhochrechnung....172
Toleranz Bezug auf....81
Toleranz-Addition....96
Toleranzberechnung 96
Toleranzbereich, Regelkarte 99
Toleranzkette, Simulation....97
Top-Event, FTA 22
träges Feld....18
Transformation diskrete Regression....63
Transformation, Weibull-Gerade....147
Trennschärfe....106, 107
Tschebyscheff Distanz....77
t-Test, 2 Stichproben....114
t-Test, Korrelationskoeffizient....44
t-test, Vorgabewert....115
t-Verteilung 190
Two-Way ANOVA balanciert 41
Two-Way ANOVA geschachtelt....43
Überschreitungsanteil, Prozessfähigkeit....82
UEG 99
Unabhängigkeit korrelierende Daten 44
Unabhängigkeitstest 124
Unabhängigkeitstest, Korrelation....44
uncontrolled factors....18
unerklärte Abweichung, ANOVA....40
Unfälle, Abnahme Grundgesamtheit....147
ungeordnete Daten 77
ungeplante Versuche 60
universelle Verteilung....137
unsymmetrische Verteilung 131
unterscheidbare Kategorien 87
Unterzielgrößen 18
unvollständiger Test....149, 161
u-Regelkarte 102
Ursachen-Wirkungsdiagramm 13, 14
U-Test 116
UWG 99
Variable Importance in the Projection....74
Variablenselektion....74
Varianz
Weibull-Parameter 142
Varianz (erklärte) 76
Varianz des Effektes 36
Varianz, diskrete Regression....65
Varianz, Modell-ANOVA....50
Varianzanalyse 40, 119
Varianzinflationsfaktor....53
Varianztest....117, 118
VDA Band 5....89
VDI/VDE 2645 84
Verfahren 1, Messsystemanalyse....85
Verfahren 2, Messsystemanalyse....85
Verfahren 3, Messsystemanalyse....86
Vergleich von Verteilungen 159
vermengt
ANOVA....88
vermengte Wechselwirkungen 28
Vermengung Histogramm 131
Vermengung, DoE 29
Versagensmechanismen....133
Verschleiß-Ausfallverhalten....143
Verschleißgrad....171

Versuchsanzahl, DoE Überblick....37
Versuchsanzahl, D-Optimal....33
Versuchsanzahl, Hypothesentests....107
Versuchsanzahl, kategoriale Faktoren....36
Versuchsanzahl, Mischungspläne....35
Versuchsanzahl, teilfaktoriell....28
Versuchsanzahl, Vollfaktoriell....27
Versuchspläne, Auswahlkriterien....38
Versuchspläne, Einführung....26
Versuchspläne, Parameterbestimmung....17
Versuchspläne, Übersicht....38
Versuchswiederholungen, DoE....36
Verteilungsformen, Konstruktionsmerkmale....83
Verteilungsfreie Prozessfähigkeit....83
verteilungsunabhängiger Test 2 Stichproben 116
Vertrauensbereich....142
  Poisson....121
  Zielgöße....55
Vertrauensbereich, Binomial....184
Vertrauensbereich, Kurvendiagramm....46
Vertrauensbereich, Lack of Fit....51
Vertrauensbereich, Maschinenfähigkeit....84
Vertrauensbereich, Minimierung D-Optimal....33
Vertrauensbereich, Mittelwert....129
Vertrauensbereich, Mittelwert Poisson....186
Vertrauensbereich, Prozessfähigkeit....82
Vertrauensbereich, Success Run....163
Vertrauensbereich, t-Test....115
Vertrauensbereich, Varianzanalyse....119
Vertrauensbereich, Vergleich Verteilungen....159
Vertrauensbereich, Weibull....141
Vertrauensbereich, Weibull-Parameter....141
Vertrauensgrenze....141
Vertrauensgrenze, WeiBayes....161
Verzugszeit....183
Vierfeld-Tabelle....125
VIF....53
VIP....74
vollständige Daten....156
Vorhersagemaß....50
Vorinformationsfaktor....165
Vorkenntnisse Zuverlässigkeit....165
Vorschädigung....146
Vorschädigung, Weibull-Verlauf....158
Vorzeichenrangtest....117
Vorzeichentest....117
Vorzugsrichtung, Daten....60
Wahrscheinlichkeit diskrete Regression....62
Wahrscheinlichkeitsbereich Wöhler....175
Wahrscheinlichkeitsdiagramm, Weibull....140
Wahrscheinlichkeitsdichte, Binomial....184
Wahrscheinlichkeitsdichte, Normalv....128
Wahrscheinlichkeitsnetz....128
Wahrscheinlichkeitsverhältnisse....64
Wald-Test....66
Warngrenzen....99
Wechselwirkung....20, 37, 61
Wechselwirkung Messsystemanalyse....88
Wechselwirkung, eindeutige Ermittlung....32
Wechselwirkung, grafische Darstellung....47
Wechselwirkung, höhere....33
WeiBayes....161, 166
Weibull in Schichtlinien....181
Weibull-Dichtefunktion....137
Weibull-Parameter....140
Weibull-Verteilung....137
Western Electric Rules....100
Whitney Test....116
Wichtung PLS....73
Wichtungsvektor PLS....73
Wiederholbarkeit, Gütezahl Regression....52
Wiederholungen, DoE....36
Wilcoxon....117
Wilcoxon Test....116
Wilk....109
Wirkdiagramm....14
Wirkreihenfolge....14
Wirkstärke....15
Wirkungen....20
Wirkungen, Systemanalyse....17
Wöhler, Raffungstest....177
Wöhlerdiagramm....173, 174
Wöhlergerade....176
Wölbung....113
Wölbungstest....120
Wunschfunktion, Optimierung....56
Zeichentest....117
zeitabhängige Ausfälle....139
Zeitfestigkeitsbereich, Wöhler....173, 175
Zeitraffung,Lebensdauer....178
zensiert....152
zensierte Normalverteilung....134
zentral zusammengesetzter Versuchsplan....31
zentrales Moment....113
Zentrumspunkt, DoE....31
zerstörenden Prüfungen....88
Zielgröße....55
Zielgröße, Systemanalyse....19
zufällige Verteilung
  Toleranzberechnung....98
Zufallsausfälle....139
Zufallsgrößen multiplikativ....135
Zugversuche....132, 133
Zusatzversuche, D-Optimal....33, 37
Zuverlässigkeit....167
zweigipflige Verteilung....131
χ^2-Mehrfeldtest
  Häufigkeitsgruppen....68
χ^2-Anpassungstest....111
χ^2-Homogenitätstest....123
χ^2-Mehrfeldtest....124
χ^2-Verteilung....187