

Jürgen P. Bläsing (Hrsg.)



# Workbook DoE

Design of Experiments  
nach G. Taguchi  
Produkte und Prozesse robust auslegen

Bernhard Lau

Steinbeis-Transferzentren  
Qualität im Unternehmen

**TQU**

**Bernhard Lau**

# **Workbook**

**DoE**

**Design of Experiments nach  
G. Taguchi**

**Produkte und Prozesse robust auslegen**

**TQU VERLAG**

## Der Autor

**Prof. Dr. Bernhard Lau** lehrte an der Fachhochschule Ulm im Fachbereich Feinwerktechnik das Fach Technische Optik. Er leitete das Labor für Technische Optik, Lasertechnik und Optoelektronik, ist Referent in der TQU AKADEMIE und betreut Projekte unter Einsatz der Taguchi-Methoden. Prof. Lau hat als erster Fachmann die Taguchi-Methoden in Deutschland eingeführt und verbreitet.

Workbook

DoE

Design of Experiments nach G. Taguchi  
Produkte und Prozesse robust auslegen

Erstausgabe 2001, Ausgabe 2010, überarbeitet 2018

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch bedingten Rechte, insbesondere in der Übersetzung, im Nachdruck, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen oder Tabellen, der Vervielfältigung und der Speicherung bleiben vorbehalten. Wenn in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften, Normen oder andere Richtlinien verwiesen oder auszugsweise zitiert wird, so übernehmen der Verlag und die Autoren keine Garantie für Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität. Bitte ziehen Sie bei Ihren eigenen Arbeiten die vollständigen und autorisierten Dokumente in der jeweils gültigen Fassung heran.

Eigenverlag und Eigenvertrieb

TQU VERLAG, Magirus-Deutz-Straße 18, 89077 Ulm Deutschland

Fon: +49 731 14660-200

email [verlag@tqu-group.com](mailto:verlag@tqu-group.com)

Internet [www.tqu-group.com](http://www.tqu-group.com)

## Vorwort

### Workbook

### DoE Design of Experiments nach G. Taguchi

### Produkte und Prozesse robust auslegen

In der Reihe der "Denker der Qualitätswissenschaften" steht der Japaner Genichi Taguchi neben Philip B. Crosby, Edwards D. Deming oder Joseph M. Juran in erster Reihe. Sein Verdienst ist es, die so schwierige Theorie der statistisch fundierten Versuchsplanung in eine Reihe praktikabler Methoden überführt zu haben. So kann es heute Versuchingenieuren, Konstrukteuren oder Qualitätsfachleuten besser gelingen, den Versuchsaufwand zu reduzieren und die Versuchsergebnisse zu verbessern. Von Taguchi haben wir gelernt, die Toleranzgrenzen in unseren Zeichnungen und in den Spezifikationen mit dem Wissen um die kontinuierliche Verlustfunktion kritischer und gelassener zu sehen und zu interpretieren. Von Taguchi haben wir gelernt, mit orthogonalen Versuchsplänen zu arbeiten und Wechselwirkungen zwischen mehreren Parametern zu erkennen. Von Taguchi haben wir gelernt, dass optimale Zielerfüllung nur dann wertvoll ist, wenn es gelingt, diesen Zustand robust auszulegen.

Design of Experiments, die Versuchsplanung nach Genichi Taguchi, ist für jeden Ingenieur wahrhaft eine Quelle materieller und geistiger Potenziale. Mit diesem Workbook kann es gelingen, diese Quellen zum Sprudeln zu bringen.

Trotz dieser Bedeutung gibt es weltweit nur wenige wirkliche Fachleute, die die Taguchi-Methoden nicht nur rezeptartig anwenden, sondern damit auch Lösungen für die unterschiedlichsten Praxisaufgaben entwickeln können. Prof. Dr. Bernhard Lau, der die Methoden bereits 1988 in Deutschland eingeführt hat, gehört zu dieser kleinen Gruppe. Für seine wissenschaftlichen Erfolge ist er in diesem Jahr mit dem Wissenschaftspreis der Stadt Ulm ausgezeichnet worden.

Wir wünschen für alle Vorhaben viel Erfolg!

TQU VERLAG

**Inhaltsverzeichnis**

Von Galileo bis Taguchi .....	8
Die Taguchi-Story .....	9
Robuste Produkte und Prozesse durch Parameter Design .....	10
<b>Die Verlustfunktion.....</b>	<b>11</b>
Qualität als kontinuierliche Größe verstehen .....	12
Optimale Qualität entspricht dem Zielwert .....	13
Toleranzgrenzen verstehen .....	14
Zielabweichungen führen zu Verlusten .....	15
Entwickeln der Verlustfunktion .....	16
Den durchschnittlichen Verlust berechnen.....	17
Verluste in Fertigungsprozessen bestimmen .....	17
<i>Beispiel: Qualitätsvergleich zwischen zwei Herstellern.....</i>	<i>19</i>
<i>Beispiel: Kundenorientierte Bewertung von Qualität.....</i>	<i>21</i>
Nicht symmetrische Verlustfunktion .....	22
Minimierung eines Produktmerkmals ("smaller the better"): .....	23
Maximierung eines Produktmerkmals ("larger the better"):.....	24
Kundenorientierte Bestimmung der Toleranzgrenzen.....	25
Aufgaben zum Abschnitt .....	25
<b>Die Parameter .....</b>	<b>27</b>
Optimierungsziel: Robustheit .....	28
Die Steuergrößen.....	29
Die Störgrößen.....	31
Die Wirkungen der Prozesskenngrößen .....	31
<b>Die Versuchspläne .....</b>	<b>32</b>
Prinzip der statistischen Versuchsplanung .....	33
Orthogonale Felder .....	34
Auswahl geeigneter Felder .....	34
Analyse der Wirkungen der Prozessgrößen .....	35
Orthogonalität .....	36
Statistische Freiheitsgrade.....	37
Signifikanz.....	39
Wechselwirkungen.....	39
<i>Aufgabe zum Abschnitt.....</i>	<i>40</i>
<b>Die Wechselwirkungstabellen und die linearen Graphen.....</b>	<b>41</b>
Wechselwirkungstabellen .....	42
Lineare Graphen .....	43
Statistische Freiheitsgrade von Wechselwirkungen.....	45
Auswerten von Wechselwirkungen .....	45
Auswählen des Feldes mit Spaltenzuweisung .....	46
<i>Aufgabe zum Abschnitt.....</i>	<i>47</i>
<b>Die zugeschnittenen Versuchspläne .....</b>	<b>48</b>
Orthogonale Felder der Problemstellung anpassen.....	49
Vielstufige Spalten (multilevel design, column merging) .....	50

Erzeugung einer vierstufigen Spalte in einem zweistufigen Feld .....	50
Erzeugung einer achtstufigen Spalte in einem zweistufigen Feld .....	51
Erzeugung einer neunstufigen Spalte in einem dreistufigen Feld .....	53
Sonderfall: Das Feld $L_{18}$ .....	54
Wechselwirkungen .....	55
Blindspalten-Methode (idle column method).....	55
Erzeugung dreistufiger Spalten in einem zweistufigen Feld .....	56
Erzeugung siebenstufiger Spalten im einem dreistufigen Feld .....	57
Spalten-Mehrfachnutzungsmethode (combination design) .....	59
Scheinstufen-Methode (dummy level method).....	60
<b>Das Signal/Rausch-Verhältnis.....</b>	<b>61</b>
Äußeres Feld und inneres Feld.....	62
Einfluss der Störgrößen .....	63
Zielkonflikte beherrschen .....	64
Das Signal/Rausch-Verhältnis als Kompromiss .....	66
Die wichtigsten Signal/Rausch-Verhältnisse .....	67
Maximierung des Produktmerkmals: ("larger the better") .....	67
Minimierung des Produktmerkmals: ("smaller the better") .....	67
Erreichen eines ganz bestimmten Zielwertes: ("nominal the best").....	67
Das Signal/Rausch-Verhältnis und die Verlustfunktion.....	69
Tipps für das Arbeiten mit Steuer- und Störgrößen .....	70
<i>Aufgaben zum Abschnitt</i> .....	71
<b>Der zufallsverteilte Versuchsplan und das Bestätigungsexperiment.....</b>	<b>72</b>
Zufallsverteilter Versuchsplan .....	73
Vorausberechnung und Bestätigungsexperiment .....	75
<b>Die umfassende Taguchi-Fallstudie .....</b>	<b>77</b>
Aufgabenstellung .....	78
Steuergrößen und Störgrößen .....	78
Inneres Feld der Steuergrößen .....	79
Äußeres Feld der Störgrößen.....	80
Versuchsplan (mit Ergebnissen) .....	80
Auswertung der Wirkungen auf den Mittelwert .....	81
Wirkungen der Steuergrößen .....	81
Wirkungstabelle für den Mittelwert .....	82
Wirkungsdiagramme für den Mittelwert .....	82
Auswertung der Wirkungen auf die Streuung .....	83
Wirkungstabelle für die Standardabweichung .....	84
Wirkungsdiagramme für die Standardabweichung.....	84
Mittelwert-Streuungs-Diagramme .....	85
Auswertung der Wirkungen auf das Signal/Rausch-Verhältnis.....	86
Wirkungstabelle für das Signal/Rausch-Verhältnis .....	87
Wirkungsdiagramme für das Signal/Rausch-Verhältnis: .....	87
Wechselwirkungen.....	88
Zusammenfassung der Ergebnisse .....	90
Vorausberechnung und Bestätigungsexperiment .....	91
Alternative Versuchspläne .....	92
<i>Aufgabe zum Abschnitt</i> .....	94

<b>Taguchi-Verbesserungsprojekte managen .....</b>	<b>95</b>
Günstige Voraussetzungen schaffen .....	96
Anwendungsfelder und Ziele festlegen .....	96
Projektteams auswählen und trainieren .....	97
Istzustand analysieren .....	97
Experimente vorbereiten .....	98
Experimente durchführen.....	100
Experimente auswerten .....	100
Bestätigungsexperiment durchführen .....	101
Erfahrungen zusammenstellen .....	101
Versuchsberichte erstellen.....	102
Ergebnisse präsentieren .....	102
Verbesserungen umsetzen .....	102
<b>Nützliches im Anhang .....</b>	<b>103</b>
Tabellen zur Berechnung des durchschnittlichen Verlustes .....	104
Formelzeichen .....	105
Ausgewählte Felder, Wechselwirkungstabellen und lineare Graphen .....	106
Lösungen zu den Aufgaben .....	115
F-Tabellen.....	118
Literatur.....	120
Software und Programme .....	122
Taguchi-Lexikon.....	123

## Die Taguchi-Story

Der Anstoß zur Entwicklung der sogenannten "Taguchi-Methoden" kam nicht aus Japan, sondern aus den Vereinigten Staaten: nach dem zweiten Weltkrieg war Japan von den Amerikanern besetzt, und diese ärgerten sich sehr über die miserablen Telefonverbindungen in diesem Land. Sie ordneten die Gründung eines Forschungsinstituts an, das diesem Missstand abhelfen sollte. Vergleichbar zu den AT&T Bell Laboratories in den Vereinigten Staaten wurde so das Electrical Communications Laboratory (ECL) eingerichtet; einer der Mitarbeiter war Dr. Genichi Taguchi.

Dieses Institut war vor eine schwere Aufgabe gestellt: Japan war nahezu ein Entwicklungsland, hatte fast keine technologischen Erfahrungen, wenig Geld, wenig Rohstoffe, wenig ausgebildete Leute. Diese Situation zwang zur Entwicklung rationeller Experimentiermethoden: mit wenig technologischen Kenntnissen und minimalem experimentellem Aufwand musste möglichst viel technologische Erfahrung gesammelt werden.

So entwickelte Taguchi mit seinen Mitarbeitern eine "Experimentiertechnologie", mit der sich mittels statistischer Versuchsplanung die Wirkungen der Änderungen von Prozessgrößen auf die Qualität der Produkte feststellen lassen. In Weiterentwicklung der in den zwanziger Jahren von R. A. Fisher entwickelten faktoriellen Versuchsplanung arbeitete Taguchi mit "orthogonalen Feldern", von denen die ersten von Plackett und Burman angegeben wurden. Mit diesen Versuchsplänen ist der experimentelle Aufwand wesentlich geringer und damit für komplexe industrielle Verhältnisse vertretbar, allerdings müssen dabei gewisse Randbedingungen beachtet werden. Ferner berücksichtigte Taguchi in seinen Versuchsplänen als Erster unkontrollierbare Störeinflüsse mit dem Ziel, den Prozess bzw. das Produkt robust gegenüber diesen zu bekommen. Ein weiterer Meilenstein war die Einführung der Qualitätsverlustfunktion zur Qualitätsbewertung aus der Sicht des Kunden.

So entwickelte sich die Qualitätssicherung in Japan zunehmend aus einer Überwachungsmaßnahme am fertigen Produkt zu einer Präventivmaßnahme bei der Entwicklung von Produkt und Prozess.

Ziel ist es, die gewünschten Produkteigenschaften genau einzustellen und mit einer geringen, kontrollierbaren Streuung im Fertigungsprozess und beim späteren Gebrauch des Produkts einzuhalten - dies bei gleichzeitiger Minimierung der Herstellungskosten.



## Robuste Produkte und Prozesse durch Parameter Design

Um diese Unempfindlichkeit des Produkts gegenüber Störeinflüssen bereits in der Entwicklungsphase in das Produkt und in den Herstellungsprozess einzubauen, unterteilt Taguchi die Produkt- und Prozessentwicklung in drei Stufen:

1. die Systementwicklung (System design), d. h. die innovative Festlegung der Eigenschaften des Produkts und der Art des Herstellungsprozesses,
2. die Festlegung der Werte der Steuergrößen des Produkts oder Prozesses (Parameter design), um die Produktmerkmale gegenüber Störeinflüssen robust zu bekommen, und
3. die Festlegung der Toleranzen der Steuergrößen des Prozesses (tolerance design) [1].

Der zweite Schritt - der bei uns in der Regel übersprungen wird - dient dazu, hohe Qualität bei möglichst niedrigen Kosten zu erreichen; der dritte Schritt kostet Geld und sollte nur durchgeführt werden, wenn die nach dem zweiten Schritt erreichte Qualität nicht ausreichend ist.

Taguchis Experimentiertechnologie geht untrennbar einher mit einem neuen Qualitätsverständnis, das sich nicht an den Spezifikationsgrenzen, sondern an dem mit dem Kunden vereinbarten Zielwert und am Eindruck des Produktes beim Kunden orientiert. Als Maß für die Qualität des Produkts dient dabei die ebenfalls von Taguchi eingeführte kundenorientierte Verlustfunktion, bei der nicht die Anzahl der produzierten Ausschussteile zählt, sondern die Werte der Abweichungen der Merkmale des Produkts von ihren Zielwerten.

Robuste Produkte und Prozesse sind der Schlüssel zu maximaler Produktqualität bei minimalen Kosten. Gezielte Experimente bei minimalem Aufwand liefern die entscheidenden Produkt- und Prozesskenntnisse hierzu; die Verlustfunktion ist der Maßstab zur Qualitätsbewertung. Wenn man weiß, dass der Produktionsprozess nur "gute" Teile mit wenig Streuung liefert, kann man teure Qualitätskontrollen und teure Prozessüberwachung auf ein Minimum reduzieren; die Kosten durch die Produktion und Nacharbeit schlechter Teile entfallen.

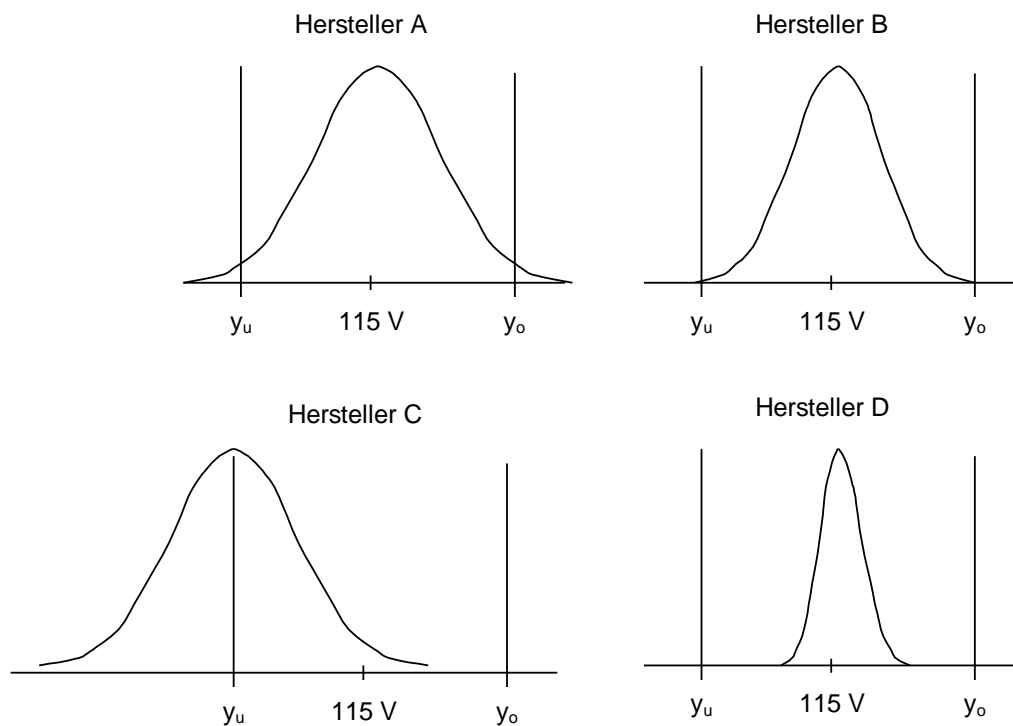
Die Erfahrungen in Japan und inzwischen auch in anderen Ländern zeigen, dass die konsequente Anwendung dieser Denkweisen und Methoden zu großen Wettbewerbsvorteilen führt.

Dieses Workbook befasst sich mit dem wichtigsten Werkzeug Taguchis zur präventiven Qualitätssicherung, mit dem **Parameter-Design**.

## Die Verlustfunktion

## Qualität als kontinuierliche Größe verstehen

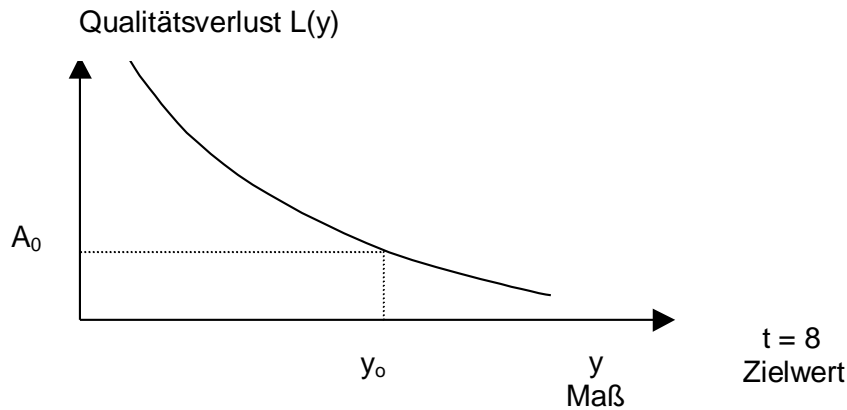
Nehmen wir an, Sie produzieren elektronische Geräte, die eine Versorgungsspannung von 115 V benötigen. Die erforderlichen Netzteile wollen Sie einkaufen. Sie erhalten Angebote von vier Lieferanten (A bis D), die Ihnen alle die Einhaltung Ihrer Spezifikationsgrenzen zusichern. Die Ausgangsspannungen der gelieferten Netzteile zeigen die unten dargestellten Häufigkeitsverteilungen. Netzteile, deren Spannung außerhalb der Spezifikationsgrenzen liegt, werden von den Herstellern aussortiert und nicht an Sie verkauft [5].



- Wenn alle Hersteller die Netzteile zum selben Preis anbieten, bei welchem Hersteller würden Sie dann kaufen?
- Wie würden Sie die unterschiedliche Qualität der Produktionen der vier Hersteller zahlenmäßig bewerten?
- Welche Hersteller werden die größten betriebsinternen Qualitätsprobleme haben?
- Gibt es eine 100%-Qualitätsprüfung, die 100% zuverlässig ist?
- Schlussfolgerung?

## Maximierung eines Produktmerkmals ("larger the better"):

Hier ist das Produktmerkmal  $y \geq 0$  und der Zielwert  $t = \infty$ ; die untere Spezifikationsgrenze sei  $y_u$  und der Verlust für Nacharbeit oder Ausschuss beim Unterschreiten der Minimalspezifikation  $A_u$ . Es soll also der Kehrwert des Produktmerkmals minimiert werden mit dem Zielwert  $1/y = 0$ , der Verlust ist also proportional zu  $1/y^2$ .



Hier ist also

$$L(y) = k \cdot \frac{1}{y^2} \quad (y \geq 0) \quad \text{mit}$$

$$L(y_u) = k \cdot \frac{1}{y_u^2} = A_u, \quad \text{also } k = A_u \cdot y_u^2.$$

Die Verlustfunktion ergibt sich zu

$$L(y) = A_u \cdot y_u^2 \cdot \frac{1}{y^2} \quad (y \geq 0). \quad \text{Gleichung [2-16]}$$

Für den Fall einer Gaußschen Normalverteilung des Produktmerkmals  $y$  gilt

$$\bar{L} = A_u \cdot y_u^2 \cdot \frac{1}{\bar{y}^2} \left[ 1 + 3 \frac{\sigma^2}{\bar{y}^2} \right] \quad \text{Gleichung [2-17]}$$

Diese verschiedenen Fälle für die Berechnung des durchschnittlichen Verlustes pro Teil  $\bar{L}$  sind im Anhang zusammengestellt.

## Orthogonalität

Ein Feld wird als orthogonal bezeichnet, wenn jedes mögliche Wertepaar zweier beliebiger Spalten gleich oft vorkommt.

Beispiel für das Feld L4:

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Für jeweils zwei Steuergrößen (= Spalten) mit je 2 Stufen gibt es  $2^2 = 4$  mögliche Wertepaare: [1,1] [1,2] [2,1] [2,2].

Wertepaare Spalten A und B	Anzahl pro Spaltenpaar	Wertepaare Spalten A und C	Anzahl pro Spaltenpaar	Wertepaare Spalten B und C	Anzahl pro Spaltenpaar
1,1	1	1,1	1	1,1	1
1,2	1	1,2	1	1,2	1
2,1	1	2,1	1	2,1	1
2,2	1	2,2	1	2,2	1

Alle möglichen Kombinationen der Stufen treten in jedem dieser Spaltenpaare gleich oft auf (1mal); also sind alle Spaltenpaare zueinander orthogonal.

Die Folge der Orthogonalität: Bei allen Versuchen, in denen eine bestimmte Steuergröße eine bestimmte Stufe einnimmt (z. B. Stufe 1), sind alle Stufen der anderen Steuergrößen gleich oft vertreten; deren Hauptwirkungen mitteln sich also heraus.

## Statistische Freiheitsgrade

Die Bezeichnung Freiheitsgrad in der Statistik ist aus der Mechanik entlehnt.

- Eine feste mechanische Einspannstelle lässt sich in keine Richtung bewegen; sie hat demnach 0 Freiheitsgrade:



- Ein Türscharnier kann sich um eine Drehachse frei bewegen; es hat 1 Freiheitsgrad (1 Winkel).
- Ein Kugelgelenk in einem Fotostativ hat 2 Freiheitsgrade (2 Winkel).

In der Statistik ist ein Freiheitsgrad folgendermaßen zu verstehen:

Wenn ein Mittelwert  $\bar{y}$  aus  $n$  Zahlenwerten vorgegeben ist, dann können wir  $n-1$  dieser Zahlen frei wählen. Um dann den Mittelwert zu erreichen, ist der  $n$ -te Wert nicht mehr frei wählbar.

In einem **orthogonalen Feld** ist die Anzahl der **Freiheitsgrade** gleich der Anzahl der Versuchsergebnisse minus 1. Das orthogonale Feld  $L_4$  ( $2^3$ ) hat also 3 Freiheitsgrade, das Feld  $L_8$  ( $2^7$ ) 7 Freiheitsgrade, wenn zu jeder Einstellung der Steuergrößen ein einzelner Messwert vorliegt.

Die Anzahl der **Freiheitsgrade einer Spalte** ist gleich der Anzahl der Stufen der dieser Spalte zugeordneten Steuergröße minus 1.

Eine zweistufige Spalte hat also 1 Freiheitsgrad, eine dreistufige Spalte 2 Freiheitsgrade.

Man beachte: Die Summe der Freiheitsgrade der einzelnen Spalten (= Steuergrößen) in einem orthogonalen Feld kann nicht größer sein als die Anzahl der Freiheitsgrade der Einstellungen des Feldes insgesamt. Daher können nicht beliebig viele Steuergrößen in einem Feld mit einer gegebenen Anzahl von Einstellungen untersucht werden. Beispielsweise können mit 8 Freiheitsgraden die Wirkungen von maximal 4 Prozessgrößen mit je 3 Stufen - entsprechend  $4 \cdot (3 - 1)$  Freiheitsgraden - untersucht werden: siehe das orthogonale Feld  $L_9$  ( $3^4$ ) unten. Das Feld  $L_{16}$  ( $2^{15}$ ) für zweistufige Größen ermöglicht mit seinen 15 Freiheitsgraden die Untersuchung der Wirkungen von 15 Größen mit je einem Freiheitsgrad. Dieses Feld kann z. B. so abgeändert werden, dass drei zweistufige Größen durch eine vierstufige ersetzt werden können.

Werden Wiederholungsexperimente durchgeführt, so bringt jeder zusätzliche Messwert für  $y$  einen zusätzlichen Freiheitsgrad mit sich, der aber nicht den Änderungen der Steuergrößen zugeordnet werden kann. Er muss vielmehr als "statistisches Rauschen", bedingt durch sonstige, nicht näher spezifizierte Einflüsse (unbekannte Störgrößen, Messunsicherheit) interpretiert werden.

Versuch Nr.	Steuergröße				Ergebnisse
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	$y_{11}, y_{12}, y_{13}$
2	1	2	2	2	$y_{21}, y_{22}, y_{23}$
3	1	3	3	3	$y_{31}, y_{32}, y_{33}$
4	2	1	2	3	$y_{41}, y_{42}, y_{43}$
5	2	2	3	1	$y_{51}, y_{52}, y_{53}$
6	2	3	1	2	$y_{61}, y_{62}, y_{63}$
7	3	1	3	2	$y_{71}, y_{72}, y_{73}$
8	3	2	1	3	$y_{81}, y_{82}, y_{83}$
9	3	3	2	1	$y_{91}, y_{92}, y_{93}$

Dieser Versuch mit einem orthogonalen Feld  $L_9$  ( $3^4$ ) und mit jeweils drei Einzelwerten pro Einstellung hat insgesamt  $3 \cdot 9 - 1 = 26$  Freiheitsgrade; die Anzahl der Freiheitsgrade jeder Spalte ist  $3 - 1 = 2$ .

Überschüssige Freiheitsgrade (hier  $26 - 8 = 18$ ), die nicht den Wirkungen der einzelnen Spalten (= Steuergrößen) zugeordnet werden können, erlauben eine Aussage über die Reproduzierbarkeit.

## Scheinstufen-Methode (dummy level method)

Beim Arbeiten mit einem Feld mit drei- oder mehrstufigen Größen lässt sich unter Umständen die hohe Stufenanzahl nicht für alle Steuergrößen ausnutzen. Hier setzt die Scheinstufen-Methode an, mit der beispielsweise eine zweistufige Spalte in einem dreistufigen Feld oder eine dreistufige Spalte in einem vierstufigen Feld erzeugt werden kann. Ihr Vorteil gegenüber der Spalten-Mehrfachnutzungsmethode ist, dass die angepassten Spalten in Wechselwirkungen eingebunden werden können.

Bei der Scheinstufen-Methode wird als höchste Stufe der neuen Spalte nochmals die Stufe 1 der ursprünglichen Spalte verwendet. Als Beispiel ihre Anwendung auf die Spalte 3 im dreistufigen Feld  $L_9$ :

A1 (neu) = A1      A2 (neu) = A2      A3 (neu) = A1'

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	1'	3
4	2	1	2	3
5	2	2	1'	1
6	2	3	1	2
7	3	1	1'	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Da in dieser Spalte jetzt die Stufe 1 wesentlich häufiger als Stufe 2 auftritt, muss dies durch entsprechende Bewichtung bei der Berechnung der Wirkungen und bei der Varianzanalyse berücksichtigt werden. - Von den 2 Freiheitsgraden der Spalte 3 wird jetzt nur noch einer genutzt.



## Das Signal/Rausch-Verhältnis

## Äußeres Feld und inneres Feld

Wir haben uns vorgenommen, ein Produktmerkmal durch die Wahl passender Werte der Steuergrößen des Prozesses auf einen bestimmten Zielwert einzustellen. Gleichzeitig soll unser Prozess möglichst unempfindlich auf die unvermeidlichen Einflüsse der Störgrößen reagieren, also robust sein, was wir ebenfalls durch die Wahl passender Werte der Steuergrößen des Prozesses erreichen wollen. Wie lassen sich diese beiden - unter Umständen widersprüchlichen - Ziele miteinander vereinbaren?

Dazu wählen wir zunächst für unsere Steuergrößen (und evtl. ihre Wechselwirkungen) ein passendes orthogonales Feld mit n Versuchen aus. Dieses Feld heißt inneres Feld (inner array, [1]); es möge zum Beispiel das Feld  $L_9 (3^4)$  mit  $n = 9$  Versuchen für vier Steuergrößen mit je drei Stufen sein.

Inneres Feld der Steuergrößen: Orthogonales Feld  $L_9 (3^4)$

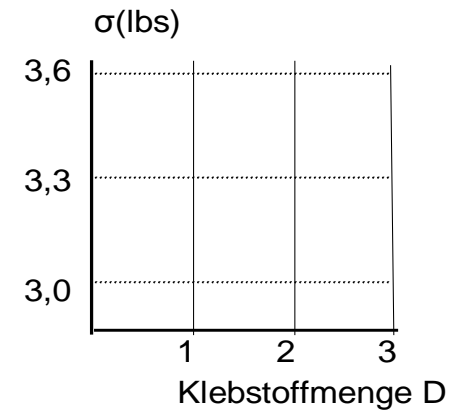
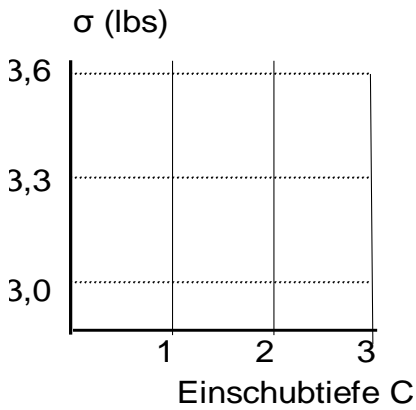
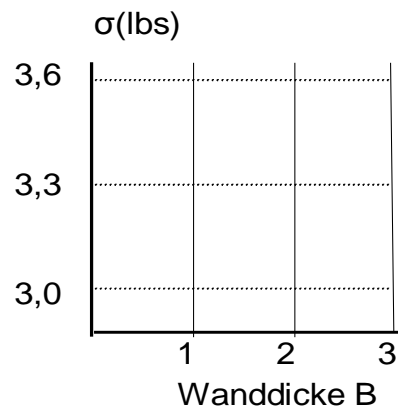
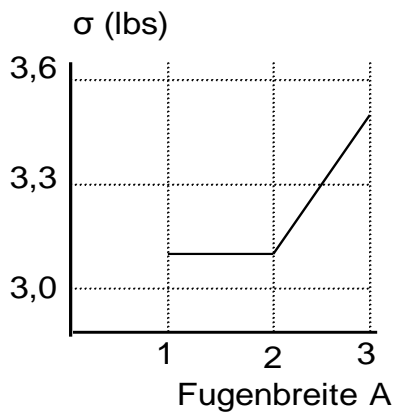
Versuch	Steuergröße:			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Wirkungstabelle für die Standardabweichung

Größe	Stufe	$\sigma$	Größe	Stufe	$\sigma$
A	1	3,134	C	1	.....
	2	3,135		2	.....
	3	3,569		3	.....
B	1	3,065	D	1	3,663
	2	3,370		2	3,090
	3	3,404		3	3,085

Ergänzen Sie die fehlenden Werte!

Wirkungsdiagramme für die Standardabweichung



Ergänzen Sie die fehlenden Werte!

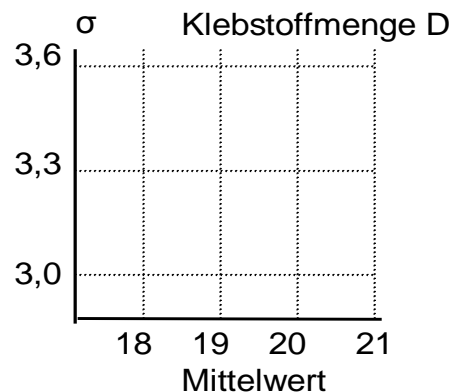
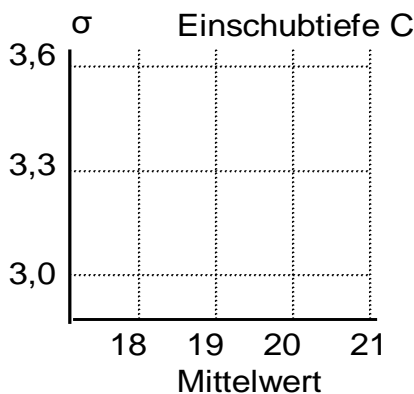
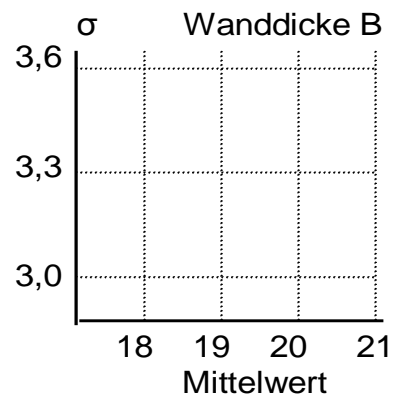
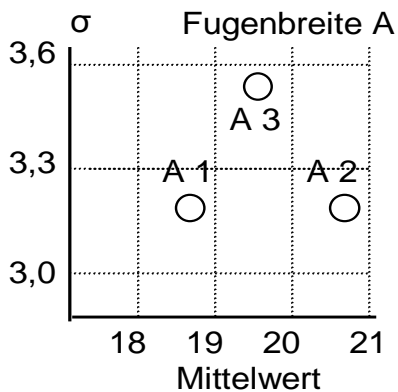
Die geringste Streuung, d. h. die geringste Empfindlichkeit des Prozesses gegenüber den Einflüssen der Schwankungen der drei Störgrößen, erreicht man, wenn die Steuergrößen auf denjenigen Stufen stehen, die jeweils die kleinste Standardabweichung bewirken:

Steuergröße	Stufe	Steuergröße	Stufe
Fugenbreite A	1/2	Einschubtiefe C	3
Wanddicke B	1	Klebstoffmenge D	2/3

Man erkennt, dass alle Größen einen deutlichen Einfluss auf die Streuung haben; man sollte hier insbesondere die Stufen A3, B2/3, C1 und D1 meiden, damit der Prozess nicht zu unbeständig ist. Andererseits würde die Stufe D1 zu der erwünschten Vergrößerung des Produktmerkmals einen beträchtlichen Beitrag leisten: hier muss ein Kompromiss gefunden werden!

Beide Einflüsse lassen sich in "Mittelwert-Streuungs-Diagrammen" gemeinsam darstellen. Hier wird der **Zielkonflikt** noch deutlicher:

### Mittelwert-Streuungs-Diagramme



Ergänzen Sie die fehlenden Werte! Einheiten der beiden Achsen: lbs

Bei der Fugenbreite A ist die Entscheidung klar: die Stufe 2 hat den höchsten Mittelwert und gleichzeitig eine geringe Streuung. Größe C verhält sich schlichtweg ideal: C3 hat gleichzeitig den höchsten Mittelwert und die kleinste Streuung. Probleme ergeben sich bei den Steuergrößen B und D: der erwünschte hohe Mittelwert (B2 bzw. D1) ist mit einer großen Streuung verbunden, also mit einer großen Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Störgrößen. Bei diesen Steuergrößen muss ein Kompromiss gefunden werden.

## Auswertung der Wirkungen auf das Signal/Rausch-Verhältnis

Dieser Kompromiss wird über das Signal/Rausch-Verhältnis gefunden, das den Verlust unter dem Einfluss der Schwankungen der Störgrößen minimiert. Hier geht es darum, ein Produktmerkmal zu maximieren, also wählen wir:

$$\frac{S}{N} \text{ dB} = -10 \cdot \log \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{y_i^2} \right] \quad [6-1]$$

Die Werte  $y_i$  sind dabei die 8 Werte der Haltekraft für die einzelnen Kombinationen der Störgrößen des äußeren Feldes. Zu jeder der 9 Versuchsserien (Zeilen) des orthogonalen Feldes der Steuergrößen gehört ein Signal/Rausch-Verhältnis.

Für unser  $L_9$ -Feld erhalten wir also neun Signal/Rausch-Verhältnisse:

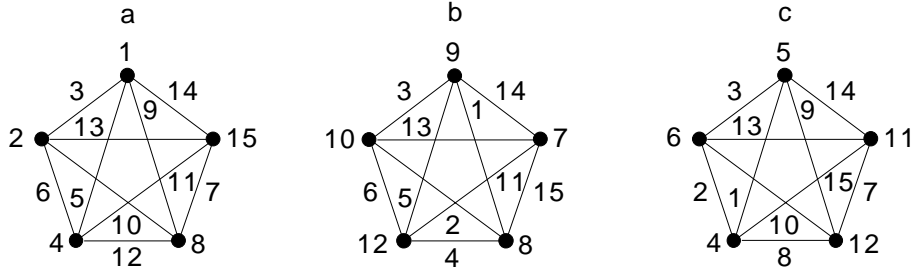
		1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'		
1	1 1 1 1	15,6	9,5	16,9	19,9	19,6	19,6	20,0	19,1	24,025	
2	1 2 2 2	15,0	16,2	19,4	19,6	19,7	19,8	24,2	21,9	25,522	
3	1 3 3 3	16,3	16,7	19,1	15,6	22,6	18,2	23,3	20,4	25,335	
4	2 1 2 3	18,3	17,4	18,9	18,6	21,0	18,9	23,2	24,7	25,904	
5	2 2 3 1	19,7	18,6	19,4	25,1	25,6	21,4	27,5	25,3	26,908	
6	2 3 1 2	16,2	16,3	20,0	19,8	14,7	19,6	22,5	24,7	25,326	
7	3 1 3 2	16,4	19,1	18,4	23,6	16,8	18,6	24,3	21,6	25,711	
8	3 2 1 3	14,2	15,6	15,1	16,8	17,8	19,6	23,2	24,4	24,832	
9	3 3 2 1	16,1	19,9	19,3	17,3	23,1	22,7	22,6	28,6	26,152	
Nr	A B C D									$\frac{\eta}{\text{dB}}$	
	Steuergröße										

Die durchschnittlichen Signal/Rausch-Verhältnisse für jede Stufe der vier Steuergrößen werden genauso wie die Mittelwerte berechnet und graphisch dargestellt.

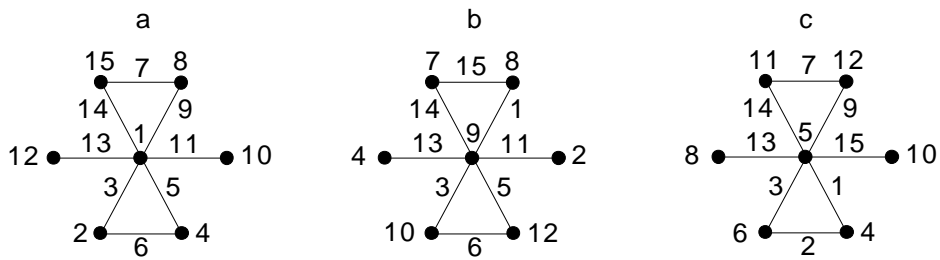
L<sub>16</sub> (2<sup>15</sup>) (Fortsetzung)

Lineare Graphen:

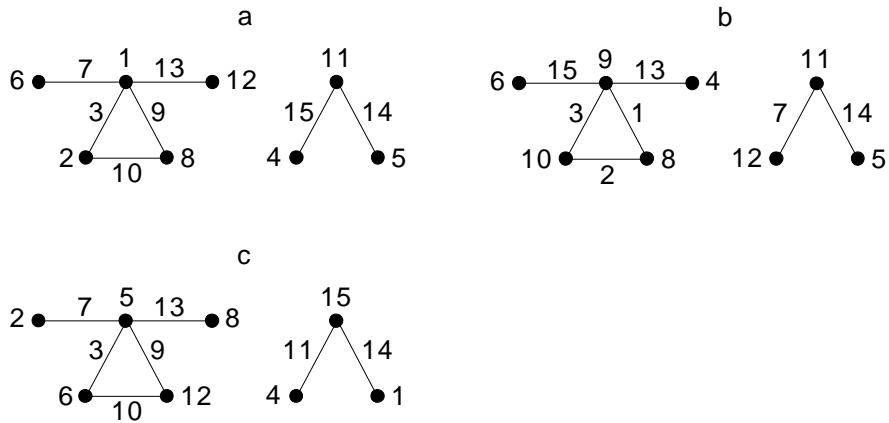
(1)



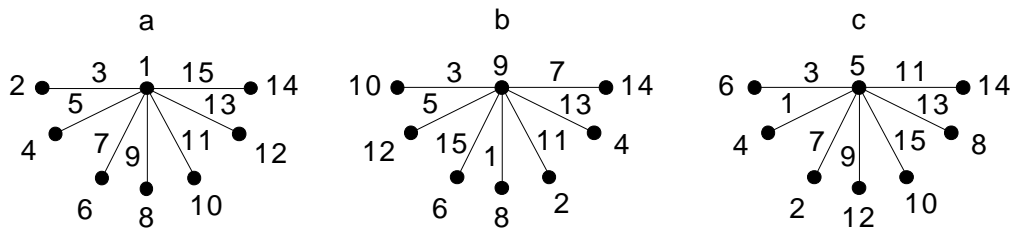
(2)



(3)

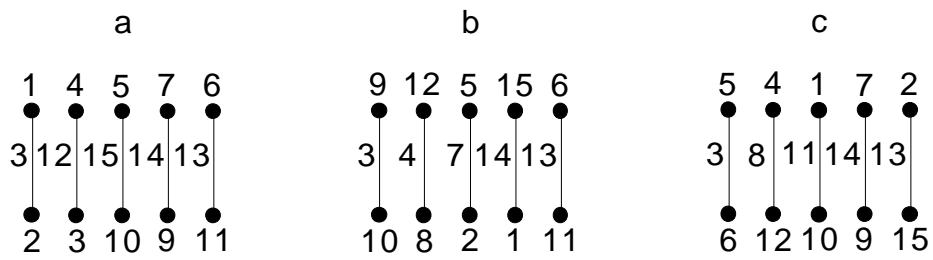


(4)

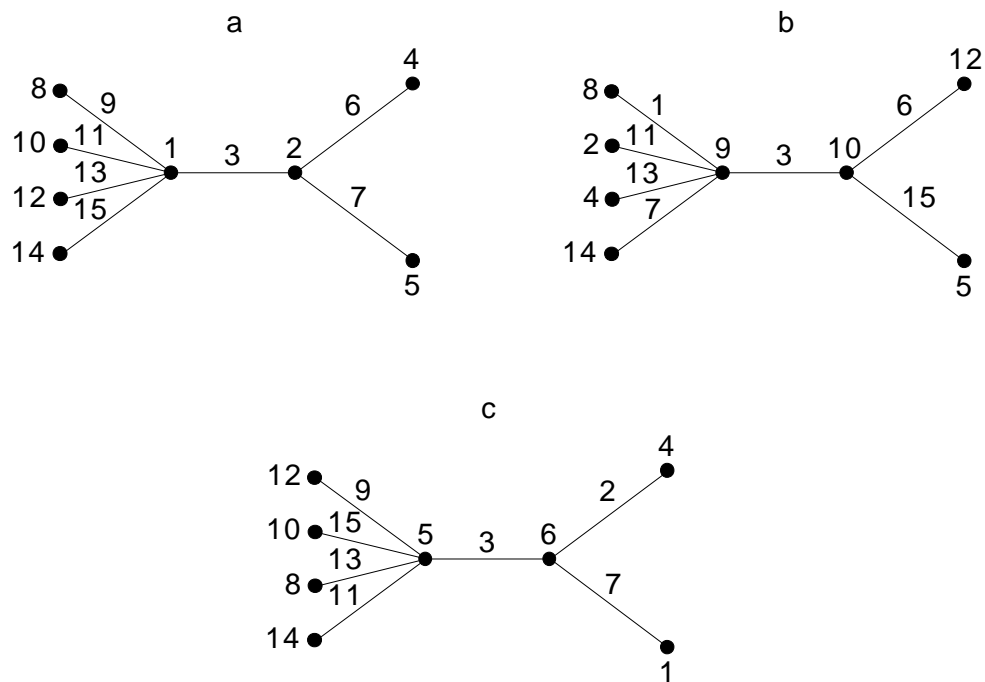


L<sub>16</sub> (2<sup>15</sup>) (Fortsetzung)

(5)



(6)



Die Typen a bis c sind jeweils gleichwertig, führen aber zu einer anderen Spaltenzuweisung der Steuergrößen. Dadurch können unter Umständen ungünstige Stufenkombinationen der Steuergrößen vermieden werden.

## Taguchi-Lexikon

accumulation analysis	Akkumulationsanalyse
adjustment factor (= scaling factor) (= signal factor)	Stellgröße; bei dynamischen Problemen: Steigungs-Stellgröße
aliases	vermengte Wirkungen
analysis of variance	Varianzanalyse
array	Feld
attribute classified	klassifiziertes Qualitätsmerkmal
average effect	mittlere Wirkung
between product noise	fertigungsbedingte Abweichungen von Produkt zu Produkt
block	In Gruppen zusammengefasste Versuche
block factors	Einflussgrößen mit blockweise eingestellten Stufen
column merging (= multilevel design)	vieltufige Spalten
cell	Zelle (Stufenkombination)
combination design	Spalten-Mehrfachnutzung (= compound factor method)
compound noise (factors)	zusammengefasste Störgrößen
compound factor method	Spalten-Mehrfachnutzung (= combination design)
confirmation experiment	Bestätigungsexperiment (= verification experiment)
confounding	Vermengung
constrained optimization	Optimierung mit Randbedingungen
constraint	Randbedingung
contrast	Kontrast (Wirkungsdifferenz)
control(lable) factor [control factor] <sup>*)</sup>	Steuergröße Stabilisierungsgröße (bei Auslegung zum Erreichen eines bestimmten Zielwerts)
control orthogonal array (=inner array)	inneres Feld (Feld der Steuergrößen)
cumulative frequency	kumulierte Häufigkeit
design	Versuchsplan
design of experiments/ dummy level	statistische Versuchsplanung experimental design Scheinstufe
duplication	Verdoppelung (von Stufen)
dynamic characteristic	dynamischer Zielwert
dynamic problem/system	Auslegung mit dynamischem Zielwert
effect (= response)	Wirkung
experiment space (experimental) error	Werteraum des Versuchs Unsicherheit des Versuchsergebnisses, Rest



factor	Einflussgröße
factor array	Faktorensatz (für orthogonale Polynome)
fractional factorial design	unvollständiger faktorieller Versuchsplan
functional characteristic	(funktionales) Produktmerkmal
idle column	Blindspalte
inner array (= control orthogonal array)	inneres Feld (Feld der Steuergrößen)
inner noise	interne Störgrößen
interaction	Wechselwirkung
interaction graph	Wechselwirkungsdiagramm
interaction table	Wechselwirkungstabelle
larger the better	Maximierung des Produktmerkmals
layout	Versuchsplan
level	Stufe
linear form	Linearform
linear graph	linearer Graph
loss function	Verlustfunktion
main effect	Hauptwirkung
matrix experiment	Versuchsplan
multilevel design (= column merging)	vieltufige Spalten
nested	verschachtelt, voneinander abhängig
nested factors	Einflussgrößen mit gleitenden Stufen
nominal the best	Zielgröße auf Sollwert einstellen
noise factor	Störgröße
noise orthogonal array (= outer array)	äußeres Feld (Feld der Störgrößen)
nuisance factors	unberücksichtigte Einflußgrößen
parameter design	Festlegung der Werte der Steuergrößen
objective function (= target function)	Zielgröße
orthogonal array, orthogonal design	orthogonales Feld, Versuchsplan
outer array	äußeres Feld (Feld der Störgrößen) (= noise orthogonal array)
outer noise	externe Störgrößen
process branching	Prozessverzweigung
parameter design	Festlegung der Werte der Steuergrößen
process capability	Prozessfähigkeit
process design	Prozessauslegung
process factor	Prozessgröße

quality characteristic	Qualitätsmerkmal
quality engineering	Qualitätsentwicklung
(quality) loss function	(Qualitäts-) Verlustfunktion
randomization	zufallsverteilter Versuchsplan
replication	Stufenwiederholung (einer Einflussgröße in einem Versuchsplan)
replication number	Stufenwiederholungszahl (Häufigkeit des Vorkommens einer bestimmten Stufe einer Einflussgröße in einem Versuchsplan)
repetition	Versuchswiederholung (innerhalb einer Zelle)
response	Wirkung
response graph	Wirkungsdiagramm
response table	Wirkungstabelle
response surface	Wirkungsfläche
robust design	Robustheit durch Versuchsplanung
scaling factor	Stellgröße; bei dynamischen Problemen
(= adjustment factor)	Steigungs-Stellgröße (= signal factor)
sensitivity analysis	Anpassungs-Analyse (dynamische Probleme)
signal factor	Stellgröße; bei dynamischen Problemen: (= adjustment factor) Steigungs-Stellgröße (= scaling factor)
signal-to-noise-ratio, S/N	Signal/Rausch-Verhältnis, Rauschabstand
signed target	vorzeichenbehafteter Zielwert
sliding levels	gleitende Stufen (= nested factors)
smaller the better	Minimierung des Produktmerkmals
S <sub>m</sub> -value	Anpassungsgüte (S/N-Verhältnis bei dynamischen Problemen)
system design	systematische Entwicklung
target value	Zielwert
tolerance design	Festlegung von Eingangstoleranzen
tracking relationship	Leitbeziehung
treatment	Zelle (Stufenkombination)
unconstrained optimization	Optimierung ohne Randbedingungen
vector quality characteristic	vektorielles Qualitätsmerkmal
verification experiment	Bestätigungsexperiment (= confirmation experiment)

\*) Kein einheitlicher Sprachgebrauch im Englischen! Mit "Stabilisierungsgröße" ist im Fall "Zielgröße auf Sollwert einstellen" eine Steuergröße gemeint, die vorwiegend das Signal/Rausch-Verhältnis beeinflusst, den Mittelwert der Zielgröße aber nur unwesentlich.