



Versuchsplanung – DoE

Einführung in die Taguchi/
Shainin-Methodik

von

Prof. Dr.-Ing. Bernd Klein

3., korrigierte und erweiterte Auflage

Oldenbourg Verlag München

Prof. Dr.-Ing. Bernd Klein studierte an den Universitäten Wuppertal, Bochum und Hagen Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. Während und nach seinem Studium arbeitete er als Konstrukteur, Produktmanager und EuK-Leiter bei mehreren Unternehmen. 1984 wurde er an die Universität Kassel berufen, wo er das Fachgebiet Leichtbau-Konstruktion leitet. Von 1995 bis 2003 war er Obmann des VDI, AK-E&K, und bis 2010 nahm er auch den Vorsitz des VDI-BV/Nordhessen wahr.

„Jede hinreichend umfassende Theorie ist entweder widersprüchlich oder unvollständig.“

*nach Kurt Gödel
(deutscher Mathematiker, 1906–1978)*

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2011 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0
www.oldenbourg-verlag.de

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Martin Preuß
Herstellung: Constanze Müller
Einbandgestaltung: hauser lacour
Gesamtherstellung: Grafik + Druck, München

Dieses Papier ist alterungsbeständig nach DIN/ISO 9706.

ISBN 978-3-486-70684-0

Vorwort zur 1. Auflage

Die Anfänge gezielter Versuchsführung gehen auf Arbeiten der Mathematiker Fisher, Box, Wilson, Scheffe und Kiefer zurück, die im Zeitraum von 1920 bis 1960 die Grundlagen der klassischen *statistischen Versuchsmethodik* /BOX 78/ begründet haben. Die entwickelten Pläne sind zwar erfolgreich, aber oft unwirtschaftlich bezogen auf den erforderlichen Aufwand. Praktische Bedeutung haben hingegen die *Matrixexperimente* von G. Taguchi erlangt, die von einem möglichst minimalen Versuchsaufwand ausgehen und vielfach als industrielle Optimierungsstrategien herausgestellt werden.

Die Taguchi-Philosophie (Robust-Design-Ansatz) geht jedoch noch tiefer und hat die Produkt- und Prozessentwicklung in vielerlei Hinsicht revolutioniert. Als Entwicklungsmethode zielt sie darauf ab:

- Qualität messbar zu machen über die Definition einer Qualitätsverlustfunktion,
- das Qualitätsziel als erreichbares Extremalproblem zu formulieren,
- über ein Matrixexperiment für Produkte und Prozesse robuste Parameterkonstellationen unter der Wirkung äußerer Störgrößen zu suchen,
- für alle Parameter die Einstellungen zu optimieren sowie die Haupteinflüsse zu quantifizieren, bzw. insgesamt die Ingenieure sensibel zu machen,
- alle Arten von Qualitätsabweichungen und die Verschwendung an Zeit, Prototypen, Gewährleistung etc. zu vermeiden.

Die Botschaft dahinter ist: *Betreibe Prävention durch frühzeitige Simulation, denn eine kurative Qualitätssicherung führt letztlich nicht zu bleibendem Erfolg.*

Insgesamt ist eine Versuchsmethodik aber nur wirtschaftlich, wenn die Anzahl der Faktoren beherrschbar bleibt. Zur Reduzierung der Versuchsparameter eignen sich insbesondere die *Shainin-Techniken* (Homing-In), die insofern die Taguchi-Methodik sinnvoll ergänzen.

Das oberste Prinzip einer Versuchsmethodik muss es also sein, die Effizienz von Produkt- und Prozessentwicklungen zu verbessern, in dem die überwiegend noch praktizierte „Trial-and-Error-Vorgehensweise“ eliminiert wird, um durch mehr Systematik Marktchancen früher und zu günstigeren Bedingungen wahrnehmen zu können. Simulation des zu erwartenden Verhaltens ist somit eine Strategie, die anspruchsvoll ist und eine hohe Anwendungs-kompetenz voraussetzt. Die Techniken der Versuchsmethodik sind eigentlich so erfolgreich, dass jeder Entwickler auf diesem Gebiet Grundkenntnisse erwerben sollte.

Das vorliegende Manuskript und die Fallstudien sind in der Praxis entstanden und verfolgen die Leitregel Pragmatik vor Theorie. Es erhebt somit keinen Anspruch auf Wissenschaftlichkeit. Zielsetzung ist es, Entwicklern und Versuchsingenieuren Wege aufzuzeigen, wie sich Versuchsmethodik unterstützend im Entwicklungsprozess einsetzen lässt.

An der Erstellung des Manuskriptes waren Herr Dipl.-Ing. C. Gundlach und Frau M. Winter beteiligt. Ihnen sei dafür herzlich gedankt.

Calden

B. Klein

Vorwort zur 3. Auflage

Nachdem nunmehr auch die 2. Auflage meines Buches vergriffen ist, habe ich mich bei der Überarbeitung im Wesentlichen auf textliche Verbesserungen und eine bessere Abstimmung mit den Übungsaufgaben und Fallstudien konzentriert. Das Buch hat damit einen Stand erreicht, der aus meiner Sicht größere Eingriffe nicht mehr notwendig macht. Dies zeigen auch die Semesterkurse mit Ingenieurstudenten, die mithilfe des Buchs und der Software recht schnell an die Lösung von Versuchsproblemen herangeführt werden können. Mein Anspruch, dass Lehren letztlich zum selbstständigen Anwenden befähigen soll, ist damit erfüllt.

Calden bei Kassel

Bernd Klein

Produkt- und Prozessoptimierungs-Philosophie nach G. Taguchi

	Grundsätze	Die Folgen
1	„Prävention vor Kuration“	Qualität folgt nicht aus Kontrolle, sondern muss aus einem Qualitätsbewusstsein heraus erwachsen.
2	„Qualität wird gemessen als (geldwerter) Verlust, den die Gesellschaft durch ein Produkt erleidet, und zwar bewertet vom Zeitpunkt seiner Konzipierung an.“	Qualitätsmaßstab ist Geld. Qualität umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Produktes. Qualität betrifft die gesamte Volkswirtschaft.
3	„Jede Abweichung von funktional richtig festgelegten Zielwerten führt zu Qualitätsverlusten.“	Entwicklungs-, Planungs- und Produktionsziel ist „Streuungsminimierung“, nicht nur „Toleranzhaltigkeit“. Vor Produktionsbeginn durchgeführte System-, Funktions-, und Prozessanalysen gewinnen überragendes Gewicht. Prozesssteuerung und Qualitätsregelkarten (SPC) verlieren an Bedeutung.
4	„Produkt-Streuungen werden durch STEUERgrößen und StÖRgrößen hervorgerufen.“	Steuer- und Störgrößen müssen vor Produktionsbeginn analysiert werden. Enge Zusammenarbeit von Konstruktion, Planung und Produktion bei Entwicklungen.
5	„Ziel ist das Ermitteln ROBUSTER Steuergrößen (Einstellungen) um den Einfluss von Störgrößen zu minimieren.“	Durchführen statistisch geplanter und ausgewerteter Mehrfaktorenversuche mit Standard-Designs. Optimieren der Entwurfs- und Prozessparameter. Sicher beherrschte Funktionalität ohne besonderen Prüfaufwand bei geringsten Kosten.
6	Es gibt 3 Arten von Störgrößen: – äußere Störgrößen wie wechselnde Bearbeitungsbedingungen, menschlicher Fehler – innere Störgrößen wie Veränderungen, Verschleiß, Alterung – temporäre Störgrößen infolge Produktions-Unregelmäßigkeiten	Störgrößen werden nach ihrer Art unterschiedlich bekämpft: ÄUSSERE und INNERE Störgrößen können nur durch „OFF-LINE Quality Control“ (Maßnahmen außerhalb der Produktion) beeinflusst werden. Störgrößen IN der Produktion sind sowohl „ON-LINE“ (in der Produktion) wie auch „OFF-LINE“ beeinflussbar.

Inhalt

Vorwort

V

Teil 1: Die DoE-Methode

1

1	Robust-Design-Philosophie nach Taguchi und Shainin	1
2	Elemente des DoE	5
2.1	Robust Design	5
2.2	Der Qualitätsbegriff.....	6
2.3	Systemverhalten	7
2.4	Wirkungsfunktion.....	8
2.5	Qualitätsverlustfunktion	9
2.6	Simulation des Betriebsverhaltens	10
2.7	Statistische Auswertung	11
3	Grundzüge des Quality Engineerings	15
3.1	Der Qualitätsverlust.....	15
3.2	Die Qualitätsverlustfunktion	19
3.3	Formen der quadratischen Verlustfunktion	20
3.4	Ursachen für Qualitätsabweichungen.....	23
3.5	Prozessbezogener, durchschnittlicher Qualitätsverlust.....	25
3.6	Vorteil der Nichtlinearität.....	27
3.7	Parameter-Klassifikation	30
3.8	Probleme der Produkt- und Prozessentwicklung	31
3.8.1	Behauptung am Markt	31
3.8.2	Möglichkeiten der Qualitätssicherung.....	32

4	Matrixexperimente	35
4.1	Prinzipieller Ablauf eines Matrixexperiments.....	35
4.2	Analyse der Streuungen	40
4.3	Modellansatz für die Faktorwirkungen	46
4.4	Voraussage des S/N-Verhältnisses unter Optimalbedingungen	48
4.5	Modellkonsistenz	49
4.6	Wechselwirkungen zwischen den Faktoren	51
5	Ergänzende Elemente der Versuchsplanung	55
5.1	Problemstruktur.....	56
5.2	Problemaufbereitung	59
5.3	Regression	62
5.4	Versuchstechniken von Shainin	65
5.4.1	Multi-Vari-Bild	67
5.4.2	Komponenten-Bestimmung	70
5.4.3	Variables Search-Technik	72
5.4.4	Bedeutungsanalyse.....	76
5.4.5	B versus C-Test.....	79
6	Anwendung der Varianzanalyse	83
7	Analyse von Signal/Rausch-Funktionen	87
7.1	Mittelwert/Zielwert-Einstellung.....	87
7.2	Signal/Rausch-Verhältnis für statische Probleme	88
7.3	Signal/Rausch-Verhältnisse für dynamische Probleme.....	91
8	Konstruktion orthogonaler Versuchsanordnungen	95
8.1	Bestimmung des Versuchsumfangs	95
8.2	Standardisierte orthogonale Felder.....	96
8.3	Scheinstufen-Methode.....	99
8.4	Methode der mehrfachen Spaltennutzung	100
8.5	Analyse von Wechselwirkungen mittels linearer Graphen	100
8.5.1	Vermengung von Faktorwirkungen	101
8.5.2	Wechselwirkungstabelle	101
8.5.3	Lineare Graphen.....	102
8.5.4	Modifikation linearer Graphen.....	104
8.5.5	Spaltenzusammenlegung.....	107

8.5.6	Leerspaltendesign.....	108
8.5.7	Problemverzweigung.....	110
9	Robust-Design-Konzept zur Optimierung von Produkten	115
10	Robust-Design-Konzept zur Optimierung von Prozessen	123
10.1	Analyse eines Prozesses	123
10.2	Bedeutung der Steuergrößen	126
10.3	Matrixexperiment und Datenanalyse.....	127
10.4	Berücksichtigung von Störgrößen	137
11	Vergleich mit der klassischen Versuchsmethodik	139
11.1	Statistische Versuchspläne 1. Ordnung	141
11.2	Konstruierter 2^{n-p} -Teilfaktorenversuchsplan	144
11.3	Versuchspläne mit vermengten Blöcken	147
11.4	Plackett-Burman-Versuchspläne	148
11.5	Statistische Versuchspläne 2. Ordnung	150
11.5.1	Zentralpunktversuche	150
11.5.2	Vollständiger 3^n -Faktorenversuchsplan.....	151
11.5.3	Box-Behnken-Design	153
11.6	D-optimale Designs.....	154
11.7	Mixturepläne	159
12	Statistische Auswerteverfahren	165
12.1	Charakterisierung der Normalverteilung.....	165
12.2	Aussagesicherheit.....	168
12.3	Varianzzerlegung	172
12.4	Abschätzung eines Versuchsumfangs	176

Teil 2: DoE-Beispiele	179
------------------------------	------------

1.	Beispiel: „Versuch und Irrtum“ versus Systematik	181
2.	Beispiel: Klassisches vollfaktorielles Experiment	188
3.	Beispiel: Parameter- und Wechselwirkungsanalyse	194
4.	Beispiel: Anwendung der Regression	201

5.	Beispiel: Regression zur Plausibilitätsprüfung	208
6.	Beispiel: Quantifizierung des Qualitätsverlustes	211
7.	Beispiel: Problematik der Fertigungstoleranzen	216
8.	Beispiel: Shainin-Multi-Vari-Experiment	220
9.	Beispiel: Shainin-Komponenten-Bestimmungstechnik	223
10.	Beispiel: Vermengungsproblematik bei Taguchi	232
11.	Beispiel: Vollständige Taguchi-Analyse	235
12.	Beispiel: Taguchi-Optimierung eines Fertigungsprozesses	243
13.	Beispiel: Anwendung der inneren/ äußeren Felder bei Taguchi	249
	Musterlösung zu Beispiel 2: Vollfaktorielles Experiment	255
	Musterlösung zum Textbeispiel Kap. 4	261

Teil 3: Fallstudien	263
----------------------------	------------

Fallstudie 1: Reibschlussverbindung	264
Fallstudie 2: Pkw-Türscharnier	271
Fallstudie 3: Hammerwerk	280
Fallstudie 4: Fräsprozess	281
Fallstudie 5: Elektromotor	286

Teil 4: Versuchspläne	291
------------------------------	------------

Taguchi-Pläne	291
Vollständige und Teilfaktoren-Versuchspläne	304

Teil 5: Statistik-Tabellen	313
-----------------------------------	------------

F-Wert-Tabelle	314
----------------	-----

Inhalt	XIII
t-Wert-Tabelle	320
Gauß'sche Normalverteilung	321
Teil 6: Programmbeschreibung	333
DoE-Software	334
DoE-Taguchi	334
DoE-Shainin	336
DoE-Faktorielle Versuchspläne	337
Übersicht kommerzielle SVP-Programme	339
Literaturverzeichnis	343
Formelzeichen	349
DoE-Glossar	351
Index	355

Teil 1: Die DoE-Methode

1 Robust-Design-Philosophie nach Taguchi und Shainin

Bei der Entwicklung von neuen Produkten und/oder Prozessen müssen oftmals Bestätigungen für bestimmte Annahmen durch begleitende Experimente erbracht werden. Dem Vorteil des unmittelbaren Erkenntnisgewinns steht als Nachteil gegenüber, dass Experimente kostenaufwändig und langwierig sind. Schlecht geplante Experimente verzögern mitunter den vorausgeplanten Markteintritt und führen zu weiteren negativen Folgen. So hat die Unternehmensberatung McKinsey festgestellt, dass eine sechsmonatige Entwicklungsverzögerung zu letztlich 33 % Gewinneinbuße führt und somit dem Wettbewerb eine breite Angriffsfläche bietet. Viele Unternehmen haben daher neben einem FuE-Bereich einen manchmal nicht viel kleineren Versuchsbereich eingerichtet. Oft ist Größe aber nicht mit Effizienz gleichzusetzen. Versuche werden in der Praxis überwiegend zu unsystematisch geplant und wesentliche Zusammenhänge nicht erkannt.

Mit Beginn ihrer Qualitätsoffensive haben japanische Manager und Ingenieure diese Schwachstelle schon in den 60er Jahren erkannt. Eine Ikone dieser neuen Denkweise war der Elektroingenieur Genichi Taguchi, der in den Folgejahren als Wegbereiter neuartige Ansätze zur statistischen Qualitätsplanung /TAG 89/ bekannt geworden ist. Seine Methoden zielen darauf ab, Produkte höchster Qualität und Funktionalität zu niedrigsten Kosten und in kürzester Zeit zu entwickeln. Hiermit traf er den Zeitgeist, weshalb insbesondere führende Technologieunternehmen /GIM 91/ seine Ideen forcierten und adaptierten.

Taguchi war von 1949 bis 1961 im Labor der japanischen Telefon- und Telegrafengesellschaft beschäftigt. Zu seinen Aufgaben gehörte die Verbesserung der Produktivität aller Aktivitäten in Forschung und Entwicklung. Im Jahre 1960 erhielt er den *Deming Award*^{*)}, eine der höchsten Auszeichnungen in Japan, womit seine Bemühungen geehrt wurden, dem Qualitätsmanagement neue Horizonte zu eröffnen. Ab 1962 war er erfolgreich als selbstständiger QS-Berater in Japan, den Vereinigten Staaten, in Chile und in China tätig.

^{*)} Prof. Deming fand als QS-Statistiker mit seinen Ideen in den USA kein Gehör und ging nach dem 2. Weltkrieg nach Japan. Ihm zu Ehren wird von der JUSE jährlich der Demingpreis verliehen.

Taguchi^{*)} hat vorausgeahnt, dass mit der so genannten *online-QS* (Kuration) bald die Grenzen des wirtschaftlich Vertretbaren erreicht sein werden und hat sich darum frühzeitig um neuartige *offline-QM-Methoden* (Prävention) gekümmert. Motiviert war dies durch die Erkenntnis, dass bei der Herstellung von Elektronikkomponenten 70 % aller Qualitätsprobleme im Design und nur 30 % in der Herstellung lagen. Er kann demgemäß als einer der herausragenden Begründer der modernen Quality-Engineering-Methoden (QEM) benannt werden, die eine Vorverlagerung von QS-Arbeit in die Entwicklung und Konstruktion sowie Planung wirksamer ansahen.

In den USA wurden seine Ideen und Methoden erstmals 1980 bei AT & T Bell Laboratories, GM, FORD und der XEROX Corporation angewandt. Mittlerweile werden seine Methoden in vielen Unternehmen (z. B. BMW, Bosch, BASF, Siemens, Henkel, INA, VW etc.) mit Erfolg eingesetzt bzw. von spezialisierten Unternehmensberatern trainiert. Um die Verbreitung der Taguchi-Methoden breit zu fördern, wurde in den USA das American Supplier Institut^{**)} gegründet, welches sich insbesondere der Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren in der Automobilindustrie angenommen hat. In diesen Unternehmen ist mittlerweile DoE ein fester Bestandteil des Produkt-Entwicklungsprozesses (PEP^{***)}) geworden. Zum Umfeld der ganzheitlichen Taguchi-Methodik /HOL 95/ kann in etwa gezählt werden:

- die Theorie des „robust designs“,
 - die Parameteridentifikation,
 - das Prinzip der Nichtlinearität,
 - die Quantifizierung der Qualitätsverlustfunktion
- sowie
- die Matrixexperimente mit hochvermengten Feldern
- und
- die Prinzipien der statistischen Beweisführung (ANOM/ANOVA).

Diese sechs Ansätze sollen auch im Folgenden näher diskutiert und beispielhaft untermauert werden.

Neben Anerkennung haben die Taguchi-Methoden aber auch Kritik (s. /KUH 90/) erfahren, was hier nicht unerwähnt bleiben soll. Vereinzelt erfolgt eine Überinterpretation mit dem Ziel, die Ansätze ad absurdum zu führen. Dem stehen aber nach wie vor Erfolge entgegen, die nachweislich viele Experimentatoren bei vielen Projekten und richtiger Anwendung aufweisen können. Falsche Schlüsse kann man prinzipiell aus jeder Methode ziehen, wenn gegen elementare Voraussetzungen verstoßen wird und unsinnige Annahmen getroffen werden. Hiergegen ist weder DoE noch der Taguchi-Ansatz gefeit.

^{*)} Taguchi war Schüler von C. R. Rao (bedeutender Statistiker).

^{**)} Heute werden die Taguchi-Methoden unter anderem von seinem Sohn Shin Taguchi proklamiert, der mittlerweile das ASI, Derborn/USA, leitet.

^{***)} Festgeschriebener und systematisierter Weg, wie eine Idee umzusetzen ist.

Die Homing-in-Techniken (Minimierung der Einflussgrößen und Streuungsreduzierung /NOA 87/) des amerikanischen Unternehmensberaters *Dorian Shainin* ergänzen in gewisser Weise die Taguchi-Techniken. Sein Konzept besteht im Wesentlichen im Kleinhalten der Anzahl der Einflüsse und der Reduktion der Varianzen. Das Grundmuster seines Vorgehens ist in etwa:

- schrittweise Entfernung von Parametern,
- Konzentration auf nur wenige Hauptursachen (Pareto-Prinzip),
- grafische Darstellung der Entwicklung des QS-Merkmals und hierauf gestützt
- einfache statistische Auswertungen.

Die Shainin-Philosophie geht somit von klassischen Prinzipien der Versuchstechnik aus und versucht, diese anforderungsgerecht zu nutzen. Zu den bewährten Vorgehensweisen gehören:

- die Streuungsanalysekarten,
 - der Komponententausch,
 - der Gut-Schlecht-Vergleich,
 - der Variablenvergleich,
 - der so genannte vollständige Versuch,
 - der Abgleich *B* versus *C*
- und
- die Streuungsdiagramme.

Eine Voraussetzung der Shainin-Techniken ist, dass nur abgesicherte Schlüsse gezogen werden können, wenn eine hinreichend große *Anzahl von Probanden für Versuche* verfügbar war. Wegen ihrer Einfachheit finden diese Ansätze insbesondere bei Praktikern eine große Akzeptanz.

Zusammen mit den Taguchi-Techniken zeichnen sich somit neue Wege zu einer messbaren Qualitätsverbesserung im Sinne einer *optimierten Qualität zu günstigsten Kosten* ab. Mit Kosten ist dabei sowohl die Ersparnis an Entwicklungskosten, an Herstellkosten durch wirtschaftlichere Prozesse und an Gewährleistungskosten gemeint.

Es ist leider immer noch festzustellen, dass japanische und angloamerikanische Unternehmen DoE einen deutlich höheren Stellenwert beimessen als deutsche Unternehmen. Ein Indikator hierfür ist die folgende Aufwandsbilanz: Im Durchschnitt erhält ein japanischer Ingenieur ein DoE-Training zwischen 100-200 Stunden, etwa 15-20 % aller Ingenieure wenden DoE-Techniken ständig an, weitere 3-4 % werden ausschließlich als DoE-Experten eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund beruht ein erheblicher Teil des japanischen Erfolgs (VDI-Studie) hinsichtlich Kosten, Zeit und Qualität bei Produkt- und Prozessentwicklungen eben auf einen systematischeren und breiteren Einsatz von statistischen Verfahren. Deutsche Unternehmen haben hier noch einen Nachholbedarf.

2 Elemente des DoE

DoE kann man als praktischen Optimierungsansatz /KLE 03/ auf der Basis eines reduzierten Variablensatzes ansehen. Daten für diese Variablen können aus Simulationen an physikalischen Modellen (DACE) oder aus realen Experimenten stammen. Nachfolgend sollen zunächst die quantitativen Ansätze von Taguchi zusammengestellt und diese später im Kapitel 5 um die qualitativen Ansätze von Shainin ergänzt werden.

2.1 Robust Design

Robust Design ist eine Entwicklungsphilosophie zur Verbesserung der Produktleistung in der frühen Phase der Konzeption oder Realisierungsplanung, um Produkte mit hoher Qualität schnell und zu niedrigen Kosten entwickeln zu können. Sie kann auf fast alle Problemstellungen der Technik angewandt werden und benutzt selektivierende Elemente der statistischen Versuchsplanung. Im Mittelpunkt steht stets die Beantwortung der Fragen:

- Wie kann man Schwankungen der Produktleistung im Kundenumfeld wirtschaftlich vertretbar reduzieren?
- und
- Wie kann gewährleistet werden, dass die aus „Laborexperimenten“ resultierenden optimalen Entscheidungen auch im Herstellungs- und Gebrauchsumfeld Gültigkeit haben?

Mit ähnlichen Fragestellungen beschäftigte sich schon in den 30er Jahren R. Fisher im Agrarbereich, der somit als Wegbereiter einiger Lösungsansätze herauszustellen ist. Zum Lösungskonzept von Robust Design gehören als wesentliche Techniken:

- *Identifikation und Priorisierung der bestimmenden Parameter* und deren Klassifizierung in vom Entwickler bestmöglich einzustellende Parameter^{*)}, in beliebig einstellbare Parameter und in Störgrößen, auf die kein oder ein nur geringer Einfluss genommen werden kann.
- *Das Prinzip der Nichtlinearität*, was voraussetzt, dass die Wirkung eines Produktes/Prozesses funktional beschreibbar ist. Da alle einstellbaren Größen in der Praxis nur mit

^{*)} Anm.: Variable oder Parameter heißen in der Versuchstechnik auch Einflussgrößen oder Faktoren.

Toleranzen einhaltbar sein werden, ist der Unempfindlichkeitsbereich der Wirkleistungskurve anzusteuern.

- Die *Verlustfunktion*, die jede Abweichung vom Sollwert in Geld quantifiziert und im Weiteren dazu herangezogen werden kann, anwendungsgerechtere Parametertoleranzen festzulegen.

und

- Die *Matrixexperimente*, die dazu genutzt werden können, mit minimalem Versuchsaufwand günstigste Parametereinstellungen im Sinne einer Optimierung der Wirkung vornehmen zu können.

Die Robust-Design-Philosophie wird in Japan und in den USA auch als äußerst wirksame DACE-Simulationstechnik^{*)} benutzt, mit deren Hilfe einerseits optimale Verhältnisse während einer Entwicklung gefunden und andererseits eine zuverlässige Vorausschau der späteren Wirkung erreicht werden kann. Um die Methode fruchtbar nutzen zu können, muss man sich jedoch den mathematischen Hintergrund in groben Zügen erarbeiten, um danach zu erkennen, welche wirtschaftlichen Perspektiven sich in der Anwendung eröffnen.

2.2 Der Qualitätsbegriff

Im Mittelpunkt der Taguchi-Philosophie steht das Bestreben, eine akzeptierbare Produktqualität zu erzeugen, die den Kundenbedürfnissen entspricht. Die Qualität ist somit als minderwertig zu betrachten, wenn die tatsächliche Produktleistung von der Sollleistung weit abweicht. Die Leistung kann zwischen mehreren Produkteinheiten oder bei unterschiedlichen Umweltbedingungen variieren oder sie kann sich verschlechtern, bevor die Lebensdauer eines Produktes erschöpft ist. Jegliche Abweichungen von Leistungsvorgaben verursachen Verluste für den Nutzer eines Produktes, meist auch für den Hersteller und in einem erweiterten Sinne auch für die Gesellschaft, dem somit entgegenzuwirken ist.

Taguchi hat demgemäß folgende Definition der Qualität gegeben:

„Die Qualität eines Produktes sollte anhand des gesellschaftlichen Gesamtverlustes (Unqualität) auf Grund von Abweichungen in der Produktleistung und auf Grund gefährlicher Nebenwirkungen gemessen werden.“

Bei einer idealen Qualität^{**)} ist also der Qualitätsverlust gleich null. Je größer somit die messbaren Verluste sind, desto niedriger ist die Qualität. Mit einem Abfall der Qualität ent-

^{*)} Anm.: DACE (Design and Analysis of Computer Experiments)

^{**) Definition: Die ideale Qualität ist dann gegeben, wenn ein Produkt zu jedem Zeitpunkt seiner Verwendung die geplante Leistung erbringt, und zwar unter allen vorgesehenen Betriebsbedingungen und während der gesamten Lebensdauer, ohne Nebenwirkungen hervorzurufen. Das Medikament Contergan (Handelsbez. für Thalidomid) war sicherlich ein ausgezeichnetes Beruhigungsmittel, hat aber zu schrecklichen Verlusten infolge von Missbildungen geführt.}

stehen unnötige Kosten (Betriebskosten, Gewährleistungskosten, F&E-Kosten etc.), die eigentlich vermeidbar gewesen wären. Ein Verdienst von Taguchi ist es, Qualitätsabweichungen in *Geld* messbar gemacht zu haben und Methoden bereitzustellen, die der Optimierung der Qualität im umfassenden Sinne dienen.

2.3 Systemverhalten

Eine ganz triviale Feststellung ist es, dass man die Leistung eines Produktes/Prozesses natürlich nur dann gezielt beeinflussen kann, wenn man weiß, welche Parameter welche Wirkung hervorrufen. Am Anfang einer Robust-Design-Analyse sollte deshalb eine *Parameteridentifikation* und *Parametereingrenzung* [TOU 94] stehen. Die Leistung oder Wirkung kann dazu zurückgeführt werden auf drei Parameterarten, und zwar

Stellgrößen (M), *Steuergrößen* (z) und *Störgrößen* (x),

auf deren Verknüpfung dann die quantifizierte Wirkung eines Produktes/Prozesses ($y = f(M, x, z)$) beruht und als Ziel ($\eta_{min/max}$) zu optimieren ist.

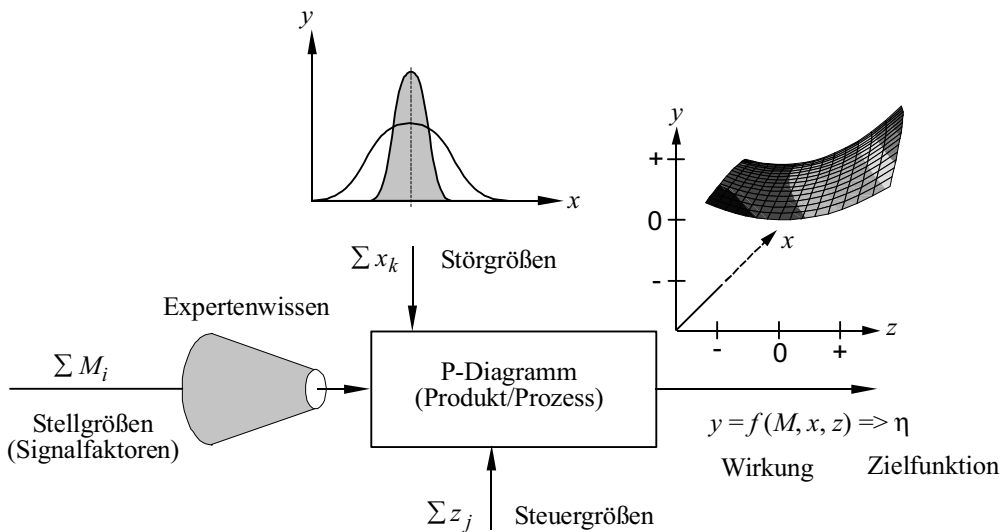


Bild 2.1: Zusammenhang zwischen Systemgrößen und Systemwirkung

Meist wird der damit erzeugte Wirkzusammenhang kompliziert und nicht einfach funktional angebbbar sein. Ein mathematisches Modell ist für ein gezieltes Optimieren jedoch notwendig, da man ansonsten nur rein zufällig (trial and error) zu günstigen Einstellungen kommen wird. Wichtig ist es daher zu wissen: *Was muss und kann unter Optimalitätsgesichtspunkten*

eingestellt werden? Was ist frei einstellbar, um bestimmte Wirkeffekte zu erhalten? und Auf welche Einflüsse kann kein oder nur ein geringer Einfluss genommen werden? Diese Modellierung erzieht insgesamt zu mehr Transparenz und Systematik, wovon der gesamte Entwicklungsprozess profitiert.

2.4 Wirkungsfunktion

Der funktionale Verlauf der Wirkung in Abhängigkeit von den Parametern (s. Bild 2.2) und deren Einstellungen gibt eine wichtige Information über die Güte eines Produktes oder Prozesses. Teilanalysen werden dabei belegen, dass einige Parameter eine lineare und andere Parameter eine nichtlineare Wirkung zur Folge haben.

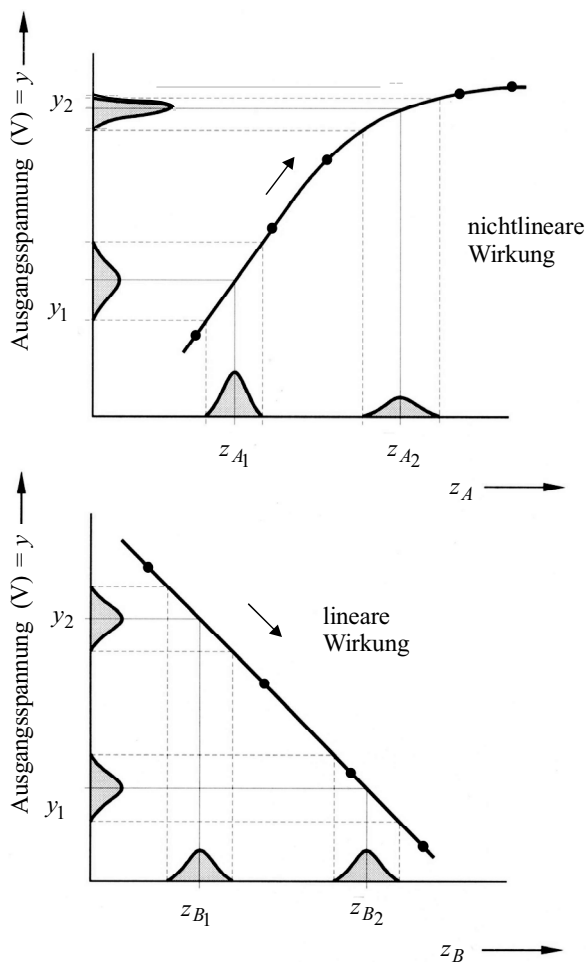


Bild 2.2: Zerlegung der Steuergrößenwirkung in lineare und nichtlineare Wirkanteile (Kompensationsprinzip)

Abweichungen bei linear verknüpften Parametern erzeugen unverstärkte Abweichungen der Wirkung. Dies ist völlig anders bei nichtlinear verknüpften Parametern. Je nachdem wie die Einstellung ist, können Parameterabweichungen sich entweder stark oder schwach auf die Wirkung hin verstärken. Das *Prinzip der Nichtlinearität* schlägt diesbezüglich vor, alle nicht-linear verbundenen Parameter mit ihrer Einstellung in dem nur schwach nichtlinearen Bereich zu optimieren, da dann große Streuungen bei der Parametereinstellung nur zu geringen Wirkungsabweichungen führen. Aus der gegenläufigen Kompensation ergibt sich sodann ein robustes Verhalten.

2.5 Qualitätsverlustfunktion

Oberstes Prinzip jeder Produktentwicklung ist, dass stabiles Verhalten mit bestimmten Soll-Einstellungen erreicht wird. Dem steht entgegen, dass jede reale Fertigung nur mit Abweichungen möglich ist, sodass letztlich Ist-Einstellungen vorliegen. Taguchi hat diesen Zusammenhang über die *Qualitätsverlustfunktion* (s. Bild 2.3) transparent gemacht.

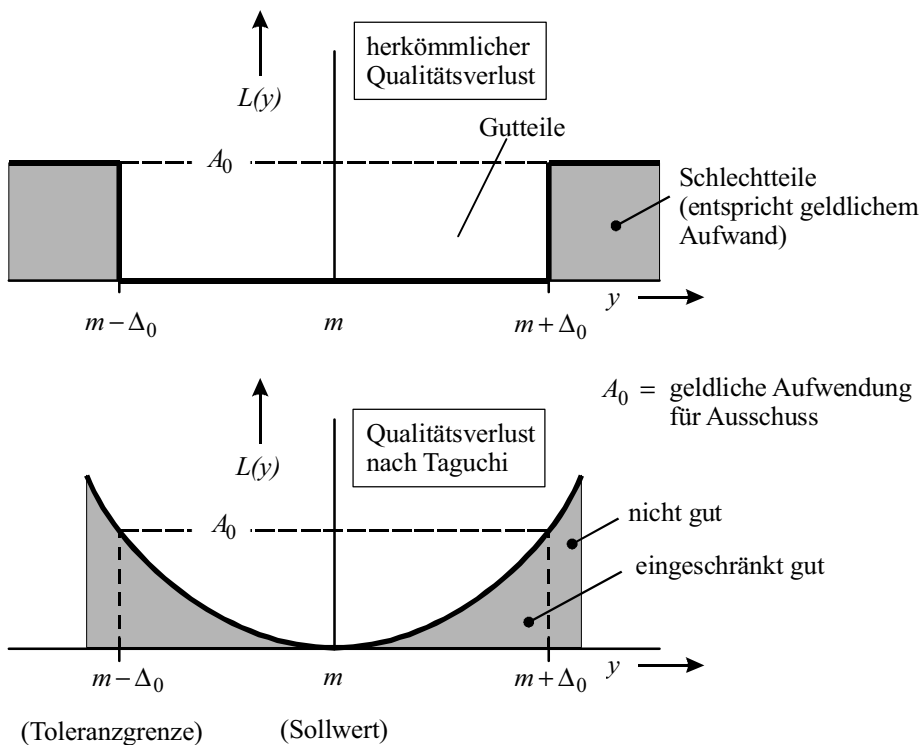


Bild 2.3: Gegenüberstellung des „Gut-Schlecht-Denkens“ zur Qualitätsverlustfunktion

Der Qualitätsverlust ist null, wenn tatsächlich Sollwerte gefertigt werden. Jede Abweichung (Toleranz) führt zu einem Qualitätsmangel, der in Geld bewertet seine Bedeutung ausweist. Zweckmäßig ist es dabei, die Fertigungstoleranzen unterhalb der Kundentoleranz zu fixieren, sodass Endkunden faktisch keinen Qualitätsverlust bemerken. Die Qualitätsverlustfunktion $L(y)$ entspricht insofern viel besser der Realität des Produktgebrauchs, in dem sie kontinuierlich bewertet. Das einfache „Gut-Schlecht-Denken“ gibt das Nutzerverhalten nicht richtig wieder, da ein Kunde nicht so extrem kategorisiert.

2.6 Simulation des Betriebsverhaltens

Um Produktleistungen mit einer gewissen Sicherheit vorhersagen und absichern zu können, bedarf es bei jeder Art von Entwicklung bestätigende Experimente. Aus Erfahrung weiß man, dass Experimente meist umfangreich, langwierig und teuer sind. Taguchi hat sich auch dieses Problems angenommen und ein abgewandeltes Konzept^{*)} für hochvermengte *Matrixexperimente* /NED 92/ unter Verwendung orthogonaler Felder (teilkfaktorielles Versuche) entwickelt. Ein Matrixexperiment stellt einen minimalen Umfang an erforderlichen Kombinationen dar und führt unter bestimmten Voraussetzungen zu einer optimalen Parameterkonstellation. Meist kann hierdurch der Versuchsaufwand mehr als halbiert werden, wodurch sich ein entscheidender Zeitvorteil bei einer Produktentwicklung ergibt. Dieser Vorteil kann durch Rechnereinsatz noch ausgebaut werden.

Exp. Nr.	Spalten-Nr. und zugeordneter Faktor				Beobachtungen			Zielfunktion $\eta(\text{dB})$
	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	y_1	...	y_4	
1	1	1	1	1	...	...	...	η_1
2	1	2	2	2	...	...	...	η_2
3	1	3	3	3	...	...	...	η_3
4	2	1	2	3	...	...	...	η_4
8	3	2	1	3	...	...	...	η_8
9	3	3	2	1	...	...	...	η_9

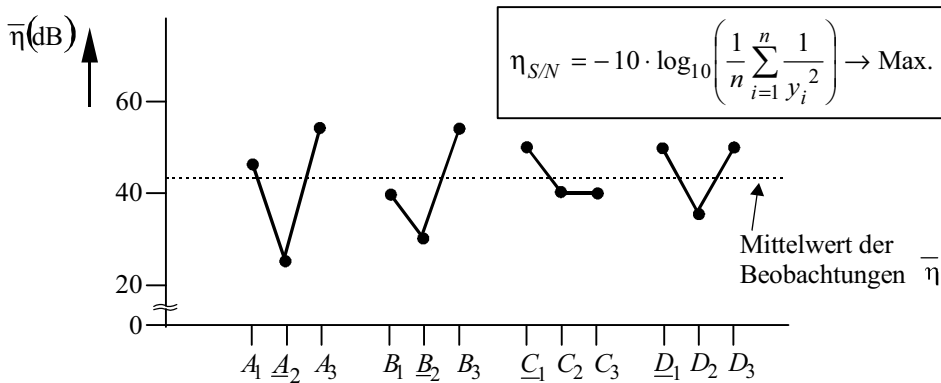
Bild 2.4: Standardisiertes, orthogonales Feld $L_9(3^4)$

^{*)} Anm.: *Matrixexperimente* haben ihren Ursprung in der Theorie der so genannten *Gewichtsbestimmungs-Pläne* (weighing designs). Dies sind hochvermengte teilkfaktorielles bzw. fraktioniert faktorielle Pläne, die in der Versuchsmethodik schon bekannt waren.

Für die Zielfunktion (Optimierungskriterium) wählte er bestimmte charakteristische Funktionen (beinhalten Mittelwert und Streuung) und interpretiert diese als Testfunktionen. Die Analogie dazu sah er in der Regeltechnik, wo ebenfalls Sprungfunktionen auf zu analysierende Systeme aufgebracht werden, um deren Antwort zu studieren. Details dazu findet man im Kapitel 9.

2.7 Statistische Auswertung

Eine besondere Stärke der Versuchsmethodik liegt in den Prinzipien zur statistischen Auswertung. Hier hat Taguchi zwei Verfahren (ANOM und ANOVA) übernommen und diese zweckgerecht angepasst. Das ANOM-Verfahren (**AN**alysis **Of** **M**eans) dient dazu, die Optimierungsrichtung für die einzelnen Steuergrößen festzulegen. Hierzu ist im Bild 2.5 eine prinzipielle Auswertung gezeigt (s. S. 37-41 und S. 93).



Faktoren, z. B.	Stufen		
	1	2	3
A. Temperatur (°C)	T_1	$\underline{T_2}$	T_3^*
B. Druck (mbar)	p_1	$\underline{p_2}$	p_3^*
C. Zeit (min)	$\underline{t_1}^*$	t_2	t_3
D. Vorbehandlung	<u>keine</u> *	Verf. 1	Verf. 2

Legende: — = Ausgangsstufe, * = ermittelte Optimalstufen,

Stufen: 1 $\equiv A_1, B_1, C_1, D_1$

2 $\equiv A_2, B_2, C_2, D_2$

3 $\equiv A_3, B_3, C_3, D_3$

$$\eta_{S/N_{opt}} = f(A_3, B_3, C_1, D_1)$$

Bild 2.5: Versuchsauswertung nach dem ANOM-Verfahren

Dargestellt werden die durchschnittlichen Faktorwirkungen mit ihren Einstellungen in Bezug auf die zu optimierende Zielfunktion $\eta_{S/N}$ (Signal-to-Noise = S/N -Ratio). Das Merkmal y_i steht in diesem Fall (Maximierungsproblem = the Larger the Better) im Nenner. Die Umwichtung einer Wirkung zu einer Zielfunktion wird später detailliert beschrieben.

Die optimale Faktoreinstellung ist dann gegeben, wenn die Wirkungs- oder Zielfunktion ein Extremum (Minimum bzw. Maximum je nach Formulierung) einnimmt. Dies ist dann gegeben, wenn der Faktorgraph den entsprechenden Wert einnimmt.

Aus der Auftragung kann auch ein Rückschluss auf die Bedeutung eines Faktors bezüglich seiner Wirkung gezogen werden: Eine weite Spannweite ist gleichbedeutend mit einer starken Wirkung und umgekehrt weist eine kleine Spannweite auf eine schwache Wirkung hin. In der Legende zur Auswertung ist dies herausgestellt: Markiert sind die Ausgangsstufen durch Unterstreichung. Das Ergebnis der ANOM-Analyse ist hingegen, dass die mit einem Stern versehene Einstellung besser ist.

Die Auswertung mit dieser „Optimalkonstellation von Faktoren“ ist mathematisch meist ein *lokales Optimum*, d. h., es ist möglich, dass daneben noch ein einziges *globales Optimum* existiert. Dies kann jedoch nur mit einer Vielzahl von Einstellungen oder einem evolutionären bzw. genären Ansatz (EVOP etc.) gefunden werden.

Das aussagefähigere Auswerteverfahren ist allerdings das ANOVA-Verfahren (**AN**alysis **O**f **V**ariance), welches eine detaillierte Faktoranalyse bis zur prozentualen Wirkung jedes Faktors auf die Zielfunktion gestattet. In der Darstellung gemäß dem umseitigen Bild 2.6 geht Taguchi davon aus, dass ein beliebiger Funktionsverlauf stets in die Wirkung eines Gleichstromsignals mit überlagerten Wechselstromsignalen zerlegt werden kann.

Demgemäß ist in der Auftragung zunächst der Mittelwert $\bar{\eta}$ abgespalten, der für das Gleichstromsignal steht. Die Verläufe der anderen Signale (Amplituden von A, B, C, D) stellen die sinnentsprechenden Wechselstromsignale dar. Die Überlagerung aller Signale bzw. deren äquivalenten Flächen sind in ihrer Summe gleich der Fläche unter der Zielfunktion. Hieraus kann wieder geschlossen werden, dass die Größe der einzelnen Amplituden gleichbedeutend zu der entsprechenden Faktorwirkung ist. Dies ist somit völlig anlog zur vorhergegangenen Spannweitenbetrachtung.

Die Auswertung über die Amplitudenflächen ist weiter noch hilfreich als Entscheidungskriterium für das Poolen von Faktoren, um die Fehlervarianz in einem Experiment abzuschätzen, bei dem keine Wiederholungseinstellungen gefahren worden sind. Für das Poolen werden stets die Faktoren mit der kleineren Gewichtung (hier: C und D) auf die Zielfunktion genommen.

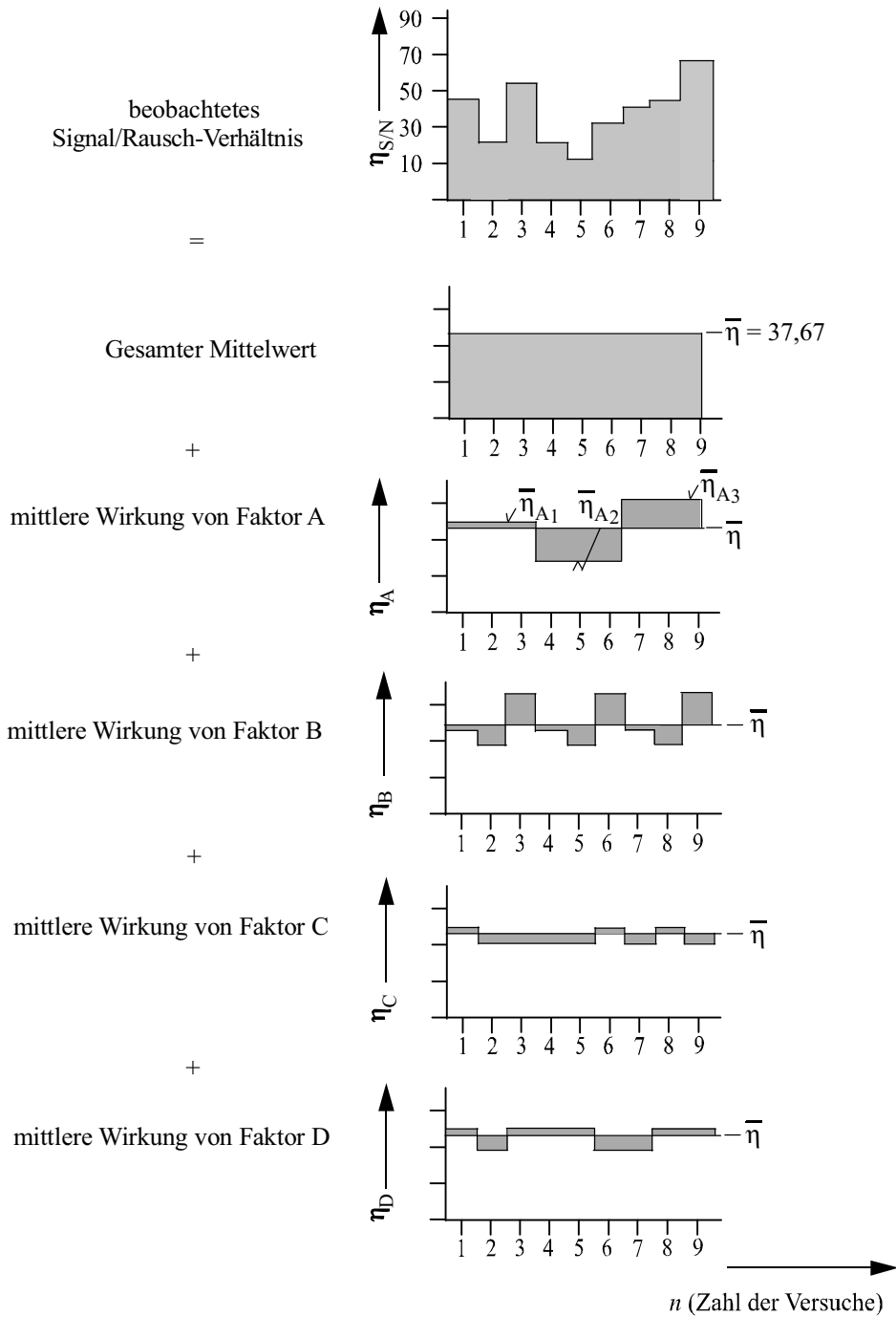


Bild 2.6: Signalzerlegung in Gleichstrom- und Wechselstromsignale

Der Kern des ANOVA-Verfahrens besteht jedoch in der Varianzzerlegung (s. Kap. 12.3), die einen quantifizierten Rückschluss über die tatsächliche Bedeutung eines Faktors zulässt. Gewöhnlich wird eine derartige Analyse mit Standardsoftware durchgeführt. Im Bild 2.7 ist nur eine prinzipielle Auswertung angedeutet.

Faktor	FHG	SQ	V	F	SQ'	$p[\%]$
A	f_A	SQ_A	V_A	F_A	SQ'_A	p_A
B	f_B	SQ_B	V_B	F_B	SQ'_B	p_B
C	f_C	SQ_C	V_C	F_C	SQ'_C	p_C
D	f_D	SQ_D	V_D	F_D	SQ'_D	p_D
Fehler e	f_e	SQ_e	V_e			100

Legende: f = Freiheitsgrad F = Fisher-Wert
 SQ = Abweichungsquadratsumme vom Mittelwert SQ' = korrigierte Abweichungsquadratsumme
 V = Schätzwert für Faktorvarianz p = Prozent-Bedeutung

Bild 2.7: Mehrfaktorielle ANOVA-Tabelle der Faktoreinflüsse auf die Systemwirkung

Wesentliche Kenngrößen sind hierin der F -Wert (Maß für die Faktorsignifikanz) und der p -Wert (prozentuale Bedeutung eines Faktors auf die Wirkung), die insofern die „Stellhebel“ zur Optimierung darstellen.

3 Grundzüge des Quality Engineerings

Quality Engineering umfasst eine Methodensammlung, die darauf zielt, die Herstellkosten und die Qualitätsverlustkosten zu senken. Diese wirken der gängigen Auffassung entgegen, dass eine höhere Qualität nur durch verschärfte Restriktionen, hochgenaue Herstellverfahren und eine sorgfältige Qualitätskontrolle gewährleistet werden kann. Völlig diametral sollen die QE-Methoden /KAC 85/ wirken. Ihre Zielsetzung ist es, eine „befriedigende“ Qualität selbst mit ungünstigen Konstellationen, wie weiteste Toleranzen, gröbste Oberflächen, Werkstoffe niedrigster Spezifikation, einfachste Fertigungsoperationen etc., erreichen zu wollen.

Nach Taguchi unterscheidet man QM-Werkzeuge mit einer *offline-* oder *online-Wirkung*. Unter offline ist demgemäß die Vorbeugung im Stadium der Produkt- und Prozessentwicklung zu verstehen, während online direkt die Herstellung betrifft. In einem weiteren Sinne können auch Maßnahmen abgegrenzt werden, die die Gebrauchsphase betreffen, also die Kundenbedingungen und die Einhaltung von Gewährleistungsverpflichtungen beeinflussen.

So umfassend definiert und beschreibt auch die DIN EN ISO 9000:2005 ff. die Qualität und führt die dazu erforderlichen Elemente auf. Einige QE-Ansätze werden auch hierbei benutzt.

3.1 Der Qualitätsverlust

Zuvor wurde Qualität mit Hilfe des Verlustes eingeführt, der aufgrund nicht erbrachter Sollleistungen und unerwünschter Nebeneffekte vorliegt. In der Praxis ist die Erfassung des Verlustes immer schwierig, weil ein Produkt für recht unterschiedliche Zwecke sowie abweichende Betriebs- und Funktionsbedingungen eingesetzt werden kann. Gerade dies spricht aber für eine Verlustquantifizierung, um insbesondere die Auswirkungen alternativer Entwicklungen oder verbesserter Herstellverfahren auf das Nutzungsspektrum analysieren und im Weiteren dafür die richtigen Entscheidungen treffen zu können.

Im Allgemeinen ist es üblich, den Ausschussanteil oder den Nacharbeitungsumfang einer Produktion als Qualitätsmaßstab heranzuziehen. Dieser Maßstab ist aber unvollständig und irreführend. Er unterstellt, dass alle Produkte innerhalb der Toleranzen der Spezifikationen gleich gut sind, während alle Produkte außerhalb der Toleranzgrenzen als unbrauchbar ein-

gestuft werden. Dies ist jedoch ein Trugschluss, denn ein Kunde wird eine derartige scharfe Abgrenzung nicht machen können. Für ihn werden alle Produkte, die gerade noch innerhalb oder außerhalb der Toleranzgrenzen liegen, entweder gleich gut oder gleich schlecht sein. Wahrscheinlich wird er nur die akzeptieren, die nahe beim Sollwert liegen, da nur diese die beste Leistung vorweisen.

Die Qualität eines Produktes wird also erfahrungsgemäß umso schlechter werden, je weiter die Istwerte von den Sollwerten abweichen. Für diesen Sachverhalt kann das folgende einleuchtende Praxisbeispiel herangezogen werden:

- Etwa 1980 stand die Firma Sony /WAL 94/ vor dem Problem, dass die amerikanischen Kunden die in Lizenz für Sony in USA gefertigten Fernsehgeräte für qualitativ schlechter hielten, als die von Sony-Japan importierten Geräte. Dies war insofern nicht sofort zu erklären, als dass der technische Aufbau völlig identisch war und einige Komponenten aus Japan zugeliefert wurden.

Als Qualitätsmaßstab nahmen die Kunden die so genannte Farbsättigung des Bildes an, welches man eigentlich in einer Vorfelduntersuchung (z. B. durch QFD^{*)}) hätte feststellen können. Stellt man, wie im Bild 3.1 gezeigt, dieses sensible Merkmal beider Produktphilosophien gegenüber, so ergeben sich recht unterschiedliche Merkmalverteilungen.

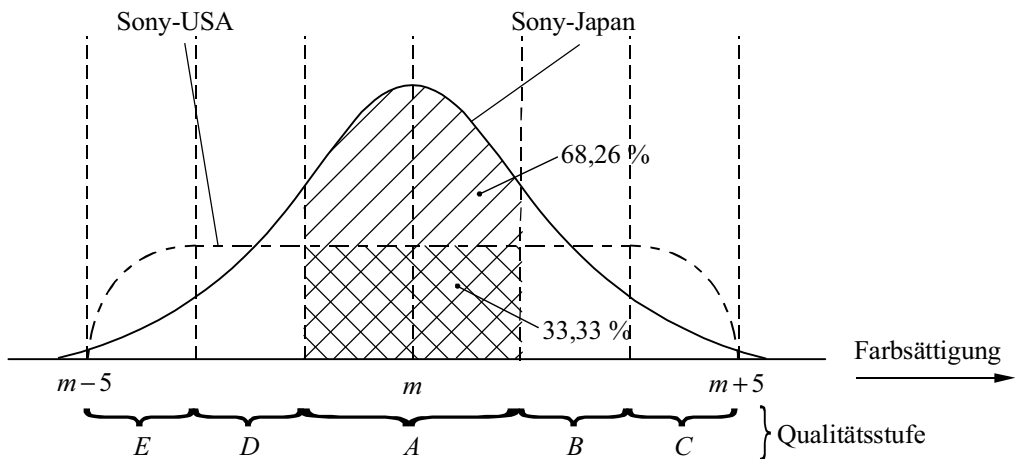


Bild 3.1: Verteilungen der Farbsättigung von Fernsehgeräten aus unterschiedlichen Losen

Der Sollwert m für absolute Farbechtheit war dabei mit den symmetrischen Toleranzgrenzen $m \pm 5$ vorgegeben. Die Auswertung ergab, dass fünf Sättigungseinheiten gerade

^{*)} Anm.: QFD (= Quality Function Deployment) ist eine Methode, Kundenwünsche gezielt zu erfassen und in Entwicklungsziele umzusetzen. Vision ist, Produkte genau für die Kunden Maß zu schneiden.

einer Streuung von 3σ entsprechen. Bei den von Sony-Japan produzierten Geräten zeigte sich insgesamt eine Normalverteilung, d. h. 99,73 % aller Geräte lagen innerhalb und nur 0,27 % lagen außerhalb der Toleranz.

Bei den von Sony-USA hergestellten Geräten zeigte sich eine relative Konstanz des Merkmals, wobei fast alle Geräte (etwa 100 %) gleichmäßig innerhalb der Toleranz lagen.

Der Qualitätsunterschied wird erst deutlich, wenn man die beiden Kurvenverläufe analysiert. Sony-Japan ist in der Produktion auf Sollwerte (Null-Fehler-Strategie) fixiert und stellt größtenteils Geräte der Qualitätsstufe *A* mit einer sehr guten Farbsättigung her. Wegen der Streuung des Prozesses fallen aber auch in viel geringerem Umfang Geräte der Klassen *B*, *C* und *D*, *E* an.

Sony-USA ist in der Produktion ausschließlich bemüht, innerhalb der Toleranz (AQL)^{*)} zu bleiben, d. h., es fallen eigentlich nur zufällig Geräte der Klasse *A* an und mit gleicher Häufigkeit Geräte der Klasse *B* und *C*. Insofern ist die Anzahl an Spitzengeräten eigentlich klein und es überwiegen Geräte mit einer mäßigen Qualität.

Was ist aus diesem Beispiel zu lernen? *Erstens* treten bei jeder Art von Herstellung Abweichungen der maßgeblichen Merkmale auf, die die empfundene oder messbare Qualität eines Produktes beeinflussen. *Zweitens* sollten Toleranzgrenzen nur unter Einbezug der Kundenerwartungen festgelegt werden, da letztlich nur dieser Maßstab zählt. *Drittens* führt jede Abweichung vom Sollwert zu einem quantifizierbaren Qualitätsverlust, der Umsatzeinbuße und Gewährleistung bedeuten kann. Ziel muss es sein, mit möglichst großen Merkmalstoleranzen zu operieren, die infolge ihrer „Entsprechung mit den Erwartungen“ jedoch nur einen kleinen Qualitätsverlust beim Kunden hervorrufen. In der Fertigung muss dies laufend überwacht werden, welches ja auch die Aufgabe von SPC ist.

Um diese Zusammenhänge transparent zu machen, hat Taguchi die Verlustfunktion kreiert und damit eine Erkenntnis von Deming /DEM 82/ aufgegriffen. Zunächst stellt er fest, dass es eine falsche Vorstellung von Produktqualität ist, solche innerhalb der Toleranzgrenzen als gut und solche außerhalb der Toleranzgrenzen als schlecht einzustufen, da für eine derartige Bewertung nur die Kundenakzeptanz maßgebend sein kann. Die oft ingenieurmäßig festgesetzten Toleranzen berücksichtigen nur funktionale und technologische Erfordernisse.

Im umseitigen Bild 3.2 ist die noch herrschende westliche und die moderne japanische Qualitätsauffassung in Form der Verlustfunktion $L(y)$ ausgedrückt. Hierin wird auch das Bestreben zur absoluten Perfektion der Japaner sichtbar. Oberstes Ziel ist es hiernach, die bestmögliche Produktion zu realisieren, die alle Abweichungen vom Sollwert vermeidet, dies laufend überwacht und gegebenenfalls korrigiert.

^{*)} Anm.: AQL = Acceptable Quality Level

Die westliche Auffassung von Qualität, insbesondere in Deutschland, war viele Jahre schlichter, da der Zwang zur Spitzenleistung nicht gegeben war. Aus der Nachkriegssituation folgend hatte Quantität meist Vorrang vor Qualität.

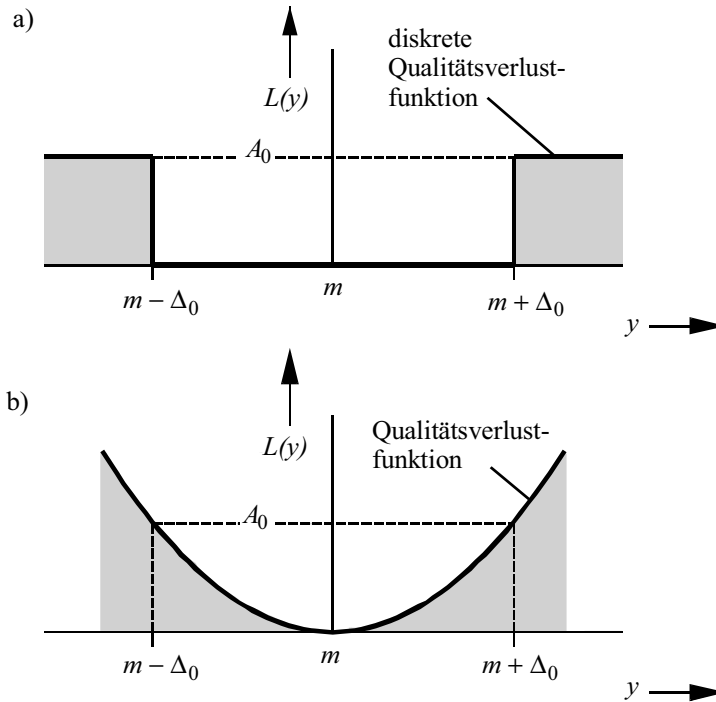


Bild 3.2: Definitionsbereiche und Verlauf der Qualitätsverlustfunktion
 a) Treppenfunktion (Gut-Schlecht-Denken)
 b) quadratischer Verlauf (kontinuierliche Bewertung)

Nach „deutschem“ Verständnis führen also Produkte, die innerhalb der Leistungstoleranz liegen, zu keinen Verlusten, während an den Toleranzgrenzen sprunghaft ein Verlust (Nacharbeit, Verschrotten = A_0 etc.) messbar ist. Dies lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$L(y) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } |y - m| \leq \Delta_0 \\ A_0 & \end{cases}$$

In der Abbildung zeigt dies die Sprungfunktion mit dem angedeuteten *Gut-* und *Schlechtbereich* beim Merkmal y . Wie das Beispiel Sony allerdings schon zeigte, trifft dies nicht das Käuferverhalten, da jede Abweichung vom Sollwert meist als ein tatsächlicher Verlust wahrzunehmen ist.

3.2 Die Qualitätsverlustfunktion

In den meisten Fällen lässt sich der Qualitätsverlust sinnvoll durch eine quadratische Verlustfunktion annähern. Qualitativ ist dies genau das Verhalten, welches man von einer Straffunktion /GIM 91/ erwartet.

Ist y das Qualitätsmerkmal *eines einzelnen Produktes* und m gleich der Sollwert für y , so kann die quadratische Verlustfunktion angesetzt werden als

$$L(y) = k(y - m)^2. \quad (3.1)$$

Hierin wird die Konstante k als *Verlustkoeffizient* bezeichnet, wodurch die Abweichungsquadrate noch einmal verstärkt werden.

Der Verlauf der Kurve ist im vorstehenden Bild 3.2 schon dargestellt worden. Im Punkt $y = m$ (Istwert ist gleich dem Sollwert) ist der Verlust und somit auch die Kurvensteigung gleich null. Der Verlust $L(y)$ wächst demgemäß langsam in der Nähe von m an; je größer der Abstand von m wird, umso schneller wächst der Verlust.

Der vorstehende Zusammenhang bedeutet aber keineswegs, dass alle Kunden, die ein Produkt mit einem bestimmten Qualitätsmerkmal y erhalten, auch einen entsprechenden Qualitätsverlust in Höhe von $L(y)$ als negativ empfinden. $L(y)$ kann stattdessen als ein Qualitätsmaßstab interpretiert werden, der hilft, Vergleiche herzustellen oder Bewertungen durchzuführen.

Die Konstante k sollte deshalb aus den Leistungsgrenzen für y ermittelt werden. Per Definition ist die Leistungsgrenze derjenige Wert des Merkmals, bei dem das Produkt in den meisten Fällen aller Anwendungen keine Akzeptanz mehr findet. Seien nun $m \pm \Delta_o$ die besagten Leistungsgrenzen und A_o der Verlust^{*)} bei $y = m \pm \Delta_o$, so ergibt sich aus

$$L(y) = k(y - m)^2, \text{ mit } L(y) = A_o$$

an der Stelle $y = m + \Delta_o$

$$A_o = k(m + \Delta_o - m)^2$$

oder

^{*)} Anm: A_o stellt die Kosten für Reparatur, Ersatz bzw. Ausschuss dar; hierin enthalten sollten auch alle Verluste aufgrund von Ausfallzeiten und Transport sein sowie weiter anfallende Folgekosten.

$$k = \frac{A_o}{\Delta_o^2} . \quad (3.2)$$

Für die Verlustfunktion kann so

$$L(y) = \frac{A_o}{\Delta_o^2} (y - m)^2 \quad (3.3)$$

angesetzt werden. Über den Vorfaktor k wird also die Empfindlichkeit des Produktes auf Toleranzabweichungen gesteuert.

- Bei dem zuvor diskutierten Beispiel der Farbsättigung von Fernsehgeräten ist die Toleranzgrenze für nicht mehr ausreichende Farbsättigung technisch mit $m \pm 5$ angesetzt worden. Etwa die Mehrzahl der Kunden glaubt, dass bei dieser Farbsättigung das Gerät defekt sei. Für Reparaturkosten müssen dann 200 \$ gegenüber einem Neupreis des Gerätes von 600 \$ aufgewandt werden.

Als Verlustfunktion ergibt sich somit

$$L(y) = \frac{200}{25} (y - m)^2 = 8(y - m)^2 .$$

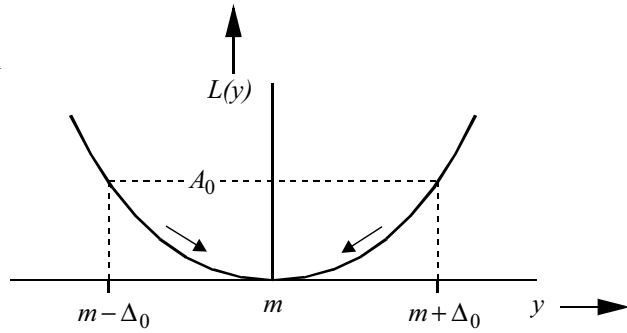
Geräte, die mit beispielsweise einer Farbsättigung von $m \pm 4$ den Kunden erreichen, sind somit mit einem „fiktiven“ Qualitätsverlust von $L(m \pm 4) = 128$ \$ zu bewerten (im Sinne von weniger wert oder anfälliger bezogen auf das, was eigentlich möglich ist). Insofern verlangt die Null-Fehler-Strategie streng $L(y) = 0$ bzw. $L(m \pm \Delta_o) \approx 0$, wobei in der Praxis kleine Unempfindlichkeitstoleranzen zugelassen werden müssen, da diese prozessbedingt sind und kostenbeeinflussend wirken.

3.3 Formen der quadratischen Verlustfunktion

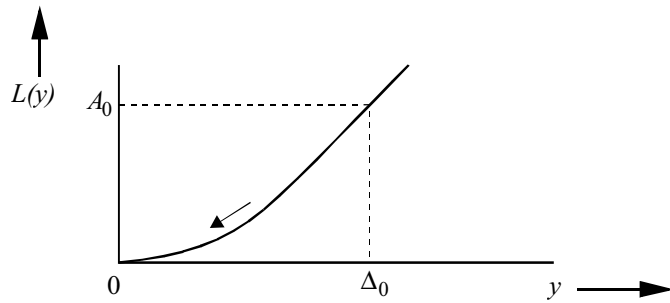
Die vorstehend eingeführte Verlustfunktion ist immer dann maßgebend, wenn das Qualitätsmerkmal y einen endlichen Sollwert ($\neq 0$) besitzt und wenn der Qualitätsverlust symmetrisch ist. Derartige Qualitätsmerkmale werden nach Taguchi als *Zielwert-Qualitätsmerkmale* (nominal the best type characteristic) bezeichnet, entsprechend spricht man auch von der *Zielwert-Qualitätsverlustfunktion* /FOW 95/, dessen Verlauf im nachfolgenden Bild 3.3 noch einmal dargestellt ist.

Alle anderen Verläufe müssen näher spezifiziert werden, siehe hierzu auch Kapitel 9.

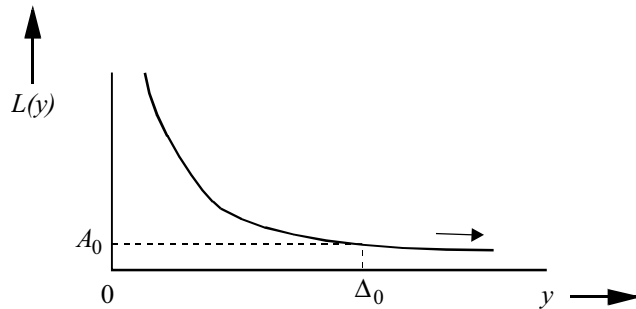
a) Zielwert-Qualitätsmerkmal



b) Minimierungsmerkmal



c) Maximierungsmerkmal



d) Asymmetrische Verlustfunktion

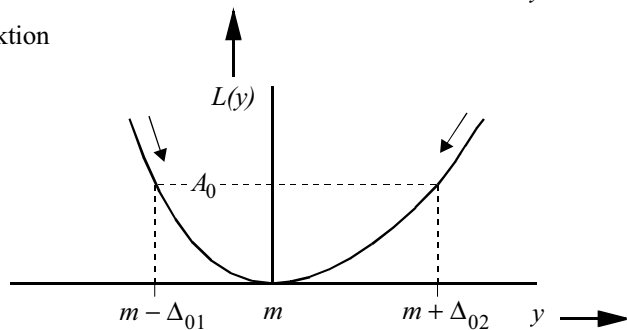


Bild 3.3: Verschiedene Formen der Verlustfunktion

In der Praxis können noch die im Bild 3.3 skizzierten anderen Fälle^{*)} vorkommen, womit dann aber ein breites Anwendungsfeld abgedeckt ist:

- *Minimierungscharakteristik* (smaller the better type characteristic)

Einige Qualitätsmerkmale können nie negative Werte annehmen; demgemäß beträgt ihr Idealwert null. Nimmt das Merkmal zu, so verschlechtert sich die Leistung des Produktes. Derartige Merkmale nennt man somit Minimierungsmerkmale.

Beispiel: Austrittsstrahlung von Bildschirmgeräten, Antwortzeit eines Computers, Luftverschmutzung durch Autoabgase etc.

Berücksichtigt man also, dass idealerweise $m = 0$ ist, so folgt für die Verlustfunktion

$$L(y) = k \cdot y^2 = \frac{A_o}{\Delta_o^2} \cdot y^2 . \quad (3.4)$$

Dies ist eine einseitige Verlustfunktion mit ansteigendem Verlauf, da y keine negativen Werte annehmen kann.

- *Maximierungscharakteristik* (larger the better type characteristic)

Gewisse Qualitätsmerkmale können ebenfalls keine negativen Werte annehmen; hier ist aber null der schlechteste Wert. Mit zunehmendem Wert verbessert sich jedoch die Produktleistung, d. h., der Qualitätsverlust wird kleiner. Der Optimalwert des Qualitätsmerkmals ist unendlich, welches einem Verlust von null entspricht. Derartige Merkmale nennt man Maximierungsmerkmale.

Beispiel: Haftkraft eines Klebers, Lichtausbeute einer Glühlampe

Die Verlustfunktion ist somit anzusetzen als

$$L(y) = k \cdot \frac{1}{y^2} \quad (3.5)$$

bzw. die Verlustkonstante mit

$$k = A_o \cdot \Delta_o^2 .$$

^{*)} Anm.: In den meisten Softwareprodukten (z. B. Win Robust) sind diese Charakteristiken voreingestellt. Die Software greift dann auch auf die richtige Optimierungsfunktion (S/N-Ratio) zu.

- Asymmetrische Verlustfunktion

Manchmal kann die Abweichung eines Qualitätsmerkmals in eine Richtung viel schädlicher sein, als die Abweichung in die andere Richtung. In derartigen Fällen kann für jede Richtung ein anderer Verlustkoeffizient vorgegeben werden. Dies ist der Normalfall bei „Ausschuss-Nacharbeits-Problemen“.

Eine asymmetrische Verlustfunktion ist demnach anzusetzen als

$$L(y) = \begin{cases} k_1(y - m)^2, & \text{für } y > m \\ k_2(y - m)^2, & \text{für } y \leq m \end{cases}.$$

Die durch die Verlustfunktion geschaffene Möglichkeit der Quantifizierung der Produktqualität kann nicht nur für die Außenbeziehung (Unternehmen/Kunde), sondern auch für die Innenbeziehung (jeder ist zugleich Kunde/Lieferant) angewandt werden. So durchläuft im Regelfall eine Produktherstellung mehrere Produktionsstufen, wobei jede die Qualität der Folgestufen beeinflusst. Über die Verlustfunktion besteht somit die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit jeder Stufe in Bezug auf das Gesamtergebnis zu bewerten. Bei sehr teuren Veredelungsverfahren lässt sich somit die Wertgestehung bzw. deren Nichterfüllung transparent festmachen.

3.4 Ursachen für Qualitätsabweichungen

Die Streuung der Produktleistung ist eine Folge der Veränderungen der Qualitätsmerkmale. In der Praxis ist dies meist auf eine Vielzahl von Ursachen zurückzuführen, die insgesamt als Störgrößen bzw. Störeinflüsse bezeichnet werden.

Die *produktbezogenen Ursachen* können wie folgt eingegrenzt werden:

1. *Externe Variationen*: Die hauptsächlichsten externen Streuungseffekte (Störgrößen) für Abweichungen in der Produktleistung sind das Gebrauchsumfeld und die Belastungen, denen ein Produkt ausgesetzt ist.

Beispiele: unterbrechende Schmierung, Staubeinwirkung, wechselnde Temperaturen, Korrosion, stoßartige Belastungen, Bedienungsfehler

2. *Qualitätsschwankungen bei der Herstellung*: Die in einem Herstellungsprozess unvermeidlichen Streuungen führen bei den Produkten zu Schwankungen der Produktparameter.

Beispiel: Nennwerte oder Leistungsdaten können nur mit Toleranzen gewährleistet werden.