Mit Jahresinhaltsverzeichnis 1990 / Mit Sonderteil: CAD/CAM/CIM

B 5724

QZ Qualität und Zuverlässigkeit

Zeitschrift für industrielle Qualitätssicherung

Organ der Deutschen Gesellschaft für Qualität · Herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. Walter Masing

Carl Hanser Verlag München
35. Jahrgang · Dezember 1990
ISSN 0720-1214

12/90

© Carl Hanser Verlag, München 1990

Peter Schick, Köln

Systemoptimierung – Grenzen der Versuchsmethoden ergebnisorientiert überschreiten

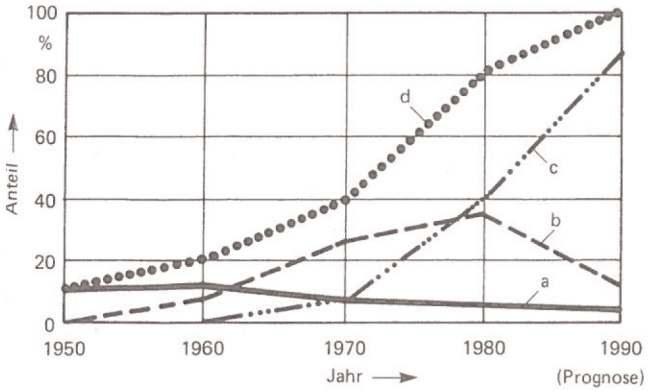
In den letzten Jahren wurden in dem hier beschriebenen Beispiel breiter als bisher Versuchsmethoden in der Fertigung wie auch in der Entwicklung eingesetzt. Dazu gehören traditionell bekannte Methoden wie das Gauß-Seidel-Verfahren, die z. Z. verstärkt propagierten Taguchi- oder Shainin-Methoden und exotischere wie die evolutionäre Methode nach Rechenberg. Theoretische Eignungsüberlegungen und die praktische Realisierung, zunächst in Pilotprojekten, dann breit angewandt, zeigten den Nutzen und die Grenzen der einzelnen Versuchsmethoden auf. Es zeigte sich, daß die Wahl der optimalen Versuchsmethode unter anderem von der Aufgabenstellung abhängt. Die eigentliche Schwierigkeit einer Problemlösung liegt jedoch oft genug nicht in der Versuchsplanung, sondern in vorbereitenden Maßnahmen, z. B. in der genauen Aufgabenstellung oder in einer brauchbaren und schnellen Systemanalyse. Damit war es naheliegend, Aufgabenstellung, Systemanalyse, Versuchsmethoden und die zugehörige Auswertung der Versuchsergebnisse (Datenanalyse) systematisch miteinander zu verknüpfen, womit das Werkzeug „Systemoptimierung" entstand. Als systematische Methode reiht es sich in andere wie Wertanalyse und FMEA ein. Ein kurzer Überblick zeigt typische Vorgehensweisen der Systemoptimierung und ihre Problemlösungsfähigkeit.

System optimization - crossing boundaries of DOE orientated to result. *In the deseribed case during the last years the usage of design of experiment (DOE) methods have been spreaded in the production plants and in product design. Existing methods refer to Gauß-Seidel, Taguchi, Shainin, Rechenberg and others. Theoretical thinking and practical realization (first in pilot projects, then wide spreaded) showed up the usefulness and the limits of each method. The choice of an optimal method depends on the task. Often the critical point to find a solution for a problem is not the DOE method, but a preparing step, e. g. the formulation of the task or a useful and fast system analysis. Therefore it was obvious to combine task, system analysis, DOE method, and subsequent data analysis systematically. The tool 'Systemoptimierung' (system optimization) was born. As a systematic tool it is comparable to others like value analysis or FMEA. A short view gives a look to the main ways of Systemoptimierung and to the ability to solve problems.*

Versuchsmethoden – Übersicht, Nutzen, Grenzen

Die Methodenanwendung nimmt in der Praxis des industriellen Qualitätswesens einen immer breiteren Raum ein. *Bhote* [1] zeigt dies am Beispiel der Industrien Japans und der USA (Bild 1). Traditionelle Kontroll- und Sortiertechniken, im Bild als „Prüfen" gekennzeichnet, werden immer seltener angewandt. Dennoch verschwinden sie nicht ganz, da genügend Prozesse weiterhin eine Fehlerrate von mehr als 1% haben werden oder aus anderen Gründen eine Vollsortierung notwendig machen. Überraschend ist, daß SPC-Anwendungen weiter abnehmen (SPC: statistical process control, Statistische Prozeßregelung). In der Automobilindustrie wird sie zur Zeit (noch?) mit hohem Aufwand eingeführt. Wie kommt diese Entwicklung zustande?

SPC besteht aus zwei Elementen, der Analyse und der Prozeßregelung. Der Analyse dienen unter anderem die Werkzeuge MFU und PFU (Maschinen- und Prozeßfähigkeitsuntersuchung), die zusätzlich noch Funktionen haben wie den Fähigkeitsnachweis. Für die Regelung werden Qualitätsregelkarten (QRK) verwendet, die oft selbst als SPC (im engeren Sinn) bezeichnet werden.



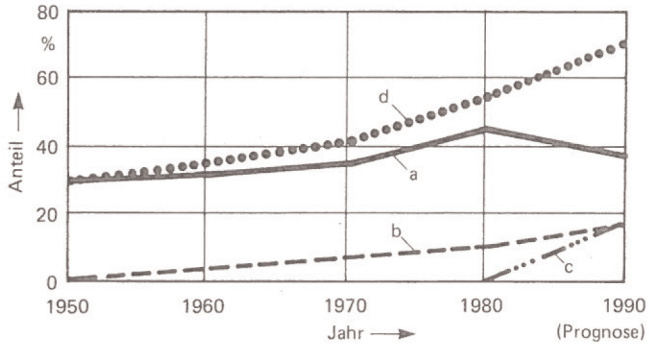


Bild 1. Vergleich der Anwendung von Methoden in Japan (links) und in den USA (rechts) [1] *a: Prüfen, b: SPC, c: DOE, d: Summe*

1. Aufgabe:

Parametereinstellung für starke positive Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit

2. Systemanalyse:

Parameter	Stufe 1	Stufe 2
A: Wasserstoff vorhanden	nein	ja
B: Sauerstoff vorhanden	nein	ja
C: Streichholzflamme vorhanden	nein	ja

Zielgröße: Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit

von	starker Abnahme	−2
über	keine	0
bis	starker Zunahme	+2

3. Versuch mit Orthogonaler Anordnung L_4:

Versuch	A	B	C	Ergebnis
1	1	1	1	0
2	1	2	2	1
3	2	1	2	−1
4	2	2	1	0

4. Auswertung:

Parameter	Mittelwerte Stufen 1	Mittelwerte Stufen 2	gewählte Einstellung
Wasserstoff	+0,5	−0,5	kein Wasserstoff
Sauerstoff	−0,5	+0,5	mit Sauerstoff
Streichholzflamme	0,0	0,0	kein Einfluß

5. Ergebnis:

Unsinn, da (unbekannte) Wechselwirkungen nicht beachtet

Konsequenz: Andere Versuchsmethode wählen

Bild 2. Versuchsplanung nach Taguchi am Beispiel „Knallgasreaktion" (Erklärungen im Text)

Auf die Prozeßregelung kann verzichtet werden, wenn der Prozeß störungssicher ist. Das heißt in der Sprache der Qualitätsingenieure: der Prozeß ist fähig und beherrscht. Man weiß u.a. aus dokumentierten Versuchen, warum und wie keine Fehler auftreten und regelt die Prozeßparameter dementsprechend. QRK brauchen somit auf Qualitätsmerkmale nicht mehr angewandt zu werden.

Als Werkzeuge für Versuche sind Maschinen- und Prozeßfähigkeitsuntersuchungen nur bedingt geeignet, da z. B. Wechselwirkungen nicht aufgedeckt werden können. Das aber können Versuchsmethoden. Die Anwendung der Versuchsmethoden ist somit Voraussetzung, um bei besserer Qualität auf die Anwendung von SPC zumindest teilweise verzichten zu können, weil die Fertigungsprozesse über die Fertigungsparameter beherrscht werden. Das hat die japanische Industrie bereits vor etwa zwei Jahrzehnten erkannt und mittlerweile erkennbar realisiert. Die US-Industrie folgt mit deutlichem zeitlichen Abstand.

Trotz unseres im internationalen Vergleich hohen Ingenieurwissens über Produkte und Prozesse können auch wir aus den Versuchsmethoden noch zusätzlichen, besonders wirtschaftlichen, Nutzen ziehen. Aber wir dürfen nicht naiv annehmen, daß irgendeine Versuchsmethode das Allheilmittel für komplexe Aufgaben sei. Daß u. a. falsche Annahmen zu falschen Ergebnissen führen, zeigt das folgende konstruierte Beispiel einer Knallgasreaktion (Bild 2):

Gesetzt den Fall, die Knallgasreaktion sei unbekannt. Es solle versucht werden, eine möglichst starke positive Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit eines Prozesses zu ermitteln. Die Prozeßparameter sind Wasserstoff (A), Sauerstoff (B) und eine offene Streichholzflamme (C). Zielgröße ist die Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit mit den Werten von −2 (starke Abnahme) bis +2 (starke Zunahme); Wechselwirkungen werden nicht erwartet.

Somit kann ein Versuch z. B. mittels der Orthogonalen Anordnung L_4 nach *Taguchi* geplant werden. Die Versuche werden durchgeführt, die Ergebnisse zu dem entsprechenden Versuch eingetragen. Keiner der Versuche führt zu einer starken positiven Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit. Aber das ist auch nicht nötig, da die optimale Einstellung der Parameter nach *Taguchi* über die besten Mittelwerte für jede Parameterstufe gefunden wird.

Demnach sollte kein Wasserstoff verwendet werden, um das angestrebte Ziel zu erreichen, da der Mittelwert für die Stufe 1 mit +0,5 größer ist als der für die Stufe 2 (−0,5). Empfohlen wird die Verwendung von Sauerstoff; die Streichholzflamme hat keinen Einfluß.

Dieses Ergebnis ist aber schlicht Unsinn, da die größte erzielbare positive Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit eine Explosion ist. Sie entsteht, wenn Wasserstoff, Sauerstoff und offene Streichholzflamme zusammenkommen, wenn alle drei Parameter zusammen auf Stufe 2 sind. Das ist somit eine dreiparametrige Wechselwirkung. Wechselwirkungen, auch solche, kommen in der industriellen Praxis nicht selten vor. Sie in der Versuchsplanung zu vernachlässigen, wenn sie aus Vorkenntnissen heraus einen hohen Einfluß haben oder aber unbekannt sind, ist falsch. Andere Versuchsmethoden sind dann zweckmäßiger. Genauso haben aber auch sie ihre Grenzen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über eine große Breite von Versuchs- und zugehörigen Auswertemethoden. Wegen dieser Breite und der damit schwierigen Auswahl der richtigen Methode war das Gebiet der Versuchsplanung bislang Spezialisten vorbehalten. Literatur war bis vor kurzem (und ist zum Teil noch) nur in Englisch vorhanden. Da die Begriffe im Deutschen noch nicht verbreitet sind, sind die englischen Begriffe zusätzlich genannt. Eine ganze Reihe von Urhebern und Verbreitern hat sich mit Versuchsmethoden beschäftigt.

Tabelle 1. Versuchs- und Auswertemethoden

Begriff	in Englisch	Personen
EVOP	evolutionary operation	*Box, Draper*
Evolutionäre Versuchsmethoden		*Rechenberg*
Faktorenanalyse	factorial analysis	*Shainin*
Komponentensuche	components search	*Ott, Shainin*
Korrelationsdiagramm	scatter plots	*Shainin*
Multivariationskarte	multi-vari chart	*Seder, Shainin*
Orthogonale Anordnung	orthogonal array fractional factorial	*Hunter, Hadamard, Plackett, Burmann, Taguchi,* u. v. a. m.
Paarweise Vergleiche	paired comparisons	*Shainin*
Parametersuche	variables search	*Shainin*
Schrittweise deterministische Methoden		*Gauß, Seidel* u. v. a. m.
Test „Alt gegen Neu"	B vs. C test	*Tukey, Shainin*
Varianzanalyse	analysis of variance (ANOVA)	
Vollständige Versuchsanordnung	full factorial	*Yates* u. v. a. m.

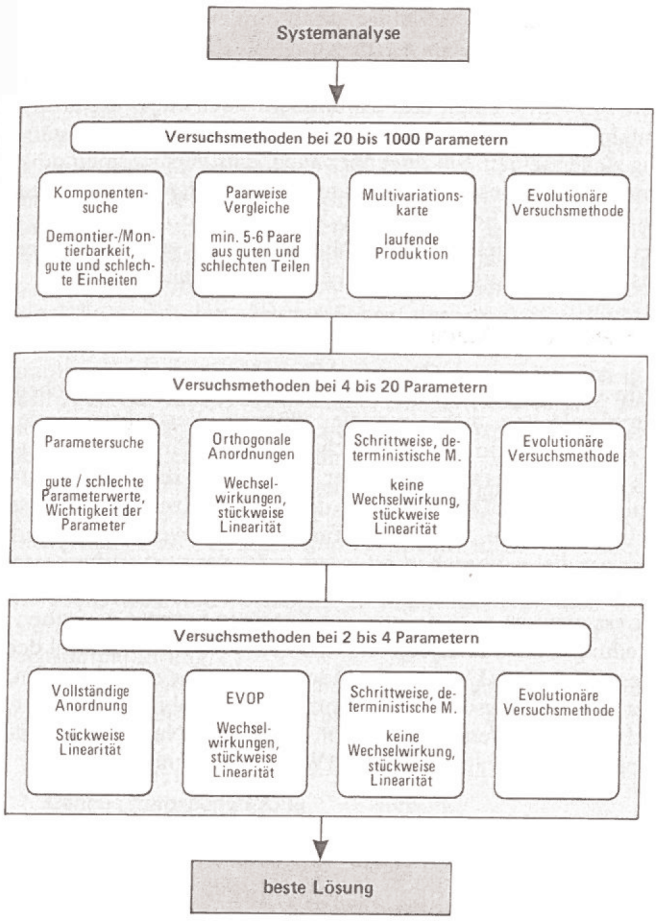


Bild 3. Empfehlungen und Voraussetzungen für das Anwenden von Versuchsmethoden

Taguchi [2] und *Shainin* [3] sind diejenigen, die den meisten bekannt sein dürften.

Die Versuchsmethoden lassen sich wegen der besseren Übersicht nach verschiedenen Kriterien ordnen (Bild 3). Hauptordnungskriterum ist, wieviele Parameter bei begrenztem Versuchs- und Versuchsteileumfang analysierbar sind. Es lassen sich drei Gruppen bilden: 2 bis 4 Parameter, 4 bis 20 und 20 bis 1000 (praktisch unbegrenzt), dargestellt als große Flächen. Die Versuchsmethoden (kleine Flächen) sind in diese Gruppen eingeordnet, ohne daß dies hier näher begründet werden kann.

Weitere Ordnungskriterien sind die Voraussetzungen, unter denen die jeweiligen Methoden anwendbar sind. Am Beispiel der Orthogonalen Anordnung wurde deutlich, daß die ungefähre Kenntnis der Wechselwirkungen a priori wichtig ist, um falsche Ergebnisse zu vermeiden. Dafür gibt es aber Orthogonale Anordnungen für drei- und mehrstufige Parameter, wie sie nicht selten in der Entwicklung benötigt werden. Bei der Parametersuche sind dagegen nur zweistufige Parameter zugelassen; unbekannte Wechselwirkungen können aber aufgedeckt werden.

Allein an diesem kleinen Vergleich läßt sich schon erkennen, daß es die optimale Versuchsmethode nicht gibt. Vielmehr ist eine Vielzahl nötig, um die praktischen Versuchsaufgaben zu erfüllen. Besonders günstig erscheint zunächst die evolutionäre Versuchsmethode (nach *Rechenberg*), da sie bei beliebiger Parameterzahl und praktisch ohne sonstige technisch-methodische Voraussetzungen angewandt werden kann. Der Verbreitung steht jedoch ihre rein stochastische, d. h. „würfelgesteuerte", Vorgehensweise im Weg. Damit wird eine psychologische Barriere errichtet, über die Versuchs-Verantwortliche sehr selten hinwegkommen.

Fallbeispiel: Zahnriemengeräusch

An folgendem Beispiel soll die typische Vorgehensweise der parametrischen Optimierung eines Systems über geplante Versuche dargestellt werden. Der erste Schritt bestand darin, eine unbefriedigende und einigermaßen unklare Situation so zu beschreiben, daß eine klare Aufgabe entsteht. Konkret: an einem Motor gab es auf den ersten Kilometern ein Zahnriemengeräusch, verursacht durch Schwingungen zwischen Kurbelwelle und Zwischenwelle. Dadurch ergab sich ein Nacharbeitsaufwand von über 10% der gebauten Motoren in einem Werk [4], den es zu verringern galt (Bild 4).

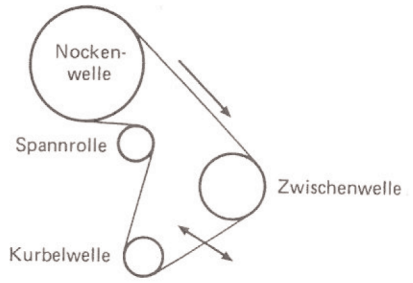
Auf die Aufgabenstellung folgt immer eine Systemanalyse. Aus welchen Schritten eine Systemanalyse besteht, wird im folgenden Abschnitt kurz erklärt. Das Ergebnis der Systemanalyse ist hier als Skizze, Parameterliste und Zielgröße dargestellt. In diesem Fall hatte die Systemanalyse rd. zwei Stunden gedauert. Dabei waren verschiedene Spezialisten in einem gemeinsamen Gespräch beteiligt.

Da die Problemlösung nicht durch schnelle theoretische Analyse herbeigeführt werden konnte (was immer vorzuziehen ist), mußte ein Versuch geplant werden. Als Methode kam eine einfache Kombination aus Komponenten- und Parametersuche in Betracht, hier Parametersuche genannt. Unbekannte Wechselwirkungen sollten nämlich bei einer Parameterzahl von sechs aufgedeckt werden. Gute (R_G) und schlechte (R_S) Motoren standen aus laufender Serienproduktion zur Verfügung. Tabelle 2 gibt die Versuchsanordnung und -ergebnisse wieder, die jeweils aus den Wertungen der drei Prüfer gemittelt sind.

Zunächst wurden zwei Motoren, die praktisch gute und schlechte Grenzlage darstellen, einzeln beurteilt (Ausgangsversuch). Deutlich ist die unterschiedliche Bewertung zu erkennen (0,33 zu 4,5 bei einem Beurteilungsbereich von 0 bis 5, wobei halbe Stufen der Einzelbewertung zugelassen sind).

Aufgabe:
- Zahnriemengeräusch durch Schwingungen zwischen Kurbelwelle und Zwischenwelle verursacht Nacharbeit von über 10%
- Nacharbeit vermindern

Skizze:



Parameter (sortiert nach vermutetem Einfluß):

A: Laufrichtung Zahnriemen
B: Zahnriemen
C: Zwischenwelle
D: Antriebsrad Kurbelwelle
E: Zahnriemenspannung
F: Spannrolle

Zielgröße:

Geräuschbeurteilung durch drei Prüfer in sechs Notenstufen

Bild 4. Systembeschreibung am Beispiel „Zahnriemengeräusch"

Tabelle 2. Parametersuche am Beispiel „Zahnriemengeräusch"

Versuch	1. Einheit (G)	Ergebnis	2. Einheit (S)	Ergebnis
Ausgang	R_G	0,33	R_S	4,5
Demontage Montage	R_G	0,5	R_S	4,67
1	A R_G	0	A R_S	2,8
2	B_S R_G	0,5	B_G R_S	1,0
3	C_S R_G	1,16	C_G R_S	2,16
4	D_S R_G	1,33	D_G R_S	2,16
5	E_S R_G	0,66	E_G R_S	1,0
6	F_S R_G	0,83	F_G R_S	3,16
Bestätigung	$(BCDE)_S$ R_G	3,83	$A(BCDE)_G$ R_S	1,16

Dann wurde untersucht, ob die Montage einen Einfluß auf das Ergebnis hat. Dazu wurden alle Komponenten, die Parameter sind, demontiert und wieder genauso montiert. Die anschließende Beurteilung zeigte, daß der Unterschied nicht durch die Montage begründet ist (Demontage-/Montageversuch).

Daran schloß sich die Folge des gezielten Austauschs an. Zunächst wurde der Zahnriemen an beiden Motoren abgenommen und in umgekehrter Laufrichtung wieder auf den gleichen Motor aufgelegt (Parameter A). Der gute Motor hatte sich nicht signifikant verändert, der schlechte deutlich verbessert. Die Laufrichtung des Zahnriemens hat somit einen deutlichen Einfluß, erklärt aber nur eine Seite, nämlich eine Verbesserung, und die auch nur teilweise. Die einseitige Änderung ist der Hinweis auf eine noch unbekannte Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Parameter; d. h., nur wenn diese Parameter zusammen variiert werden, ist auch ein guter Motor verschlechterbar und damit eine eigentliche Geräuschursache bekannt. Zusätzlich mußte noch ermittelt werden, welche weiteren Parameter oder Wechselwirkungen Änderungen herbeiführen.

Dazu wurde der Zahnriemen wieder in die ursprüngliche Laufrichtung gebracht und zwischen den Motoren getauscht (Parameter B). Wieder war die Änderung nur einseitig: der schlechte Motor wurde besser, der gute nicht schlechter. Zu vermuten war eine Wechselwirkung zwischen Laufrichtung und Spannung, die aber das Geräusch nicht vollständig erklärt. Deshalb wurden nacheinander die anderen Komponenten (Parameter) getauscht. Dabei gab es unterschiedliche Ergebnisse: teilweise Einflüsse (C, D, F) und Einfluß mit Wechselwirkung (E). Der Bestätigungsversuch zeigte, daß sich mit dem Tausch aller Komponenten mit Einfluß die Wirkung umdrehte, jedoch nicht vollständig (da es noch zeitliche Einflüsse gab). In Bild 5 läßt sich deutlich der einseitige bzw. teilweise Einfluß der Parameter erkennen.

Mit diesen Erkenntnissen konnte der Aufwand für die Nacharbeit unmittelbar auf die Hälfte reduziert werden, indem bereits in der Montage die Zahnriemenspannung wie beim guten Motor eingestellt wurde. Die folgende, vertiefte technische Analyse der Komponenten zeigte, daß die Teilungen von Zahnriemen und Zahnrädern noch enger als bisher aufeinander abzustimmen waren, um das Geräusch vollständig zu vermeiden. Sie zeigt aber auch, daß Versuchsmethodik und tiefes technisches Verständnis zusammengehören, um zu wirklich guten Ergebnissen zu kommen. Die Amortisationszeit für das Projekt war wesentlich kleiner als ein Jahr, da der bisherige Nacharbeitsaufwand gänzlich entfiel.

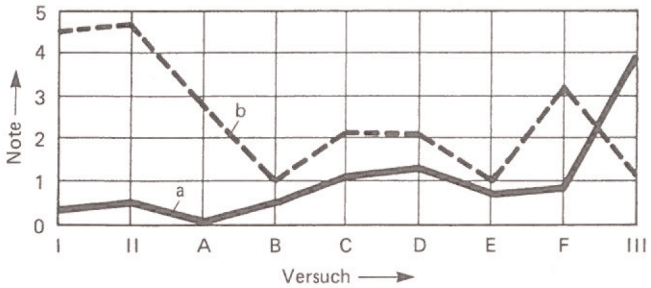


Bild 5. Parametersuche am Beispiel „Zahnriemengeräusch"
a: guter Motor, b: schlechter Motor, I: Ausgangszustand, II: Prüfen nach Demontage und erneuter Montage, III: Bestätigungsversuch, A bis F: Prüfen nach Ändern der entsprechenden Parameter (vgl. auch Bild 4)

Von den Versuchsmethoden zur Systemoptimierung

Wie am Fallbeispiel zu sehen ist, gehören zu einer wirklichen Problemlösung nicht nur die adäquate Versuchsmethode, sondern auch ein vertieftes technisches Verständnis zur Analyse des Systems und später der Daten sowie die genaue Aufgabenstellung. Daneben soll die Problemlösung möglichst schnell erfolgen, was eine definierte Verantwortlichkeit und ein paralleles Vorgehen erfordert (statt des weit verbreiteten schrittweisen Vorgehens über Versuch und Irrtum). Logisch konsequent ist es dann nur, die einzelnen Schritte Aufgabenstellung, Systemanalyse, Versuchsmethoden und Auswahl der besten Lösung (Datenanalyse) so miteinander zu verknüpfen, daß ein weit einsetzbares Instrument der Problemlösung mittels geplanter Versuche entsteht. Unter dem Namen „Systemoptimierung" wurde es bei BMW entwickelt und genutzt [5].

Typische Vorgehensweisen

Die Systemoptimierung gliedert sich in zwei Haupt-Vorgehensweisen:

- Laufende Fertigung sowie
- Entwicklung und Planung.

Beim Vorgehen „Entwicklung und Planung" werden zunächst systematisch die wichtigsten Parameter auf Grund von Vorkenntnissen ausgewählt. Dann wird ein optimiertes Teil hergestellt oder eine Optimierung an der Maschine vorgenommen, indem gleichzeitig mehrere Parameter variiert werden. Somit ist zu erkennen, ob das Versuchsziel überhaupt mit vorgegebenen Mitteln erreichbar ist. Wenn nötig, wird anschließend untersucht, welche Parametervariationen verzichtbar sind, um z. B. Kosten zu sparen.

Beim Vorgehen „Laufende Fertigung" wird, wie von *Shainin* vorgeschlagen, streng aus den gefertigten Teilen „gelesen". Die Systemanalyse dient dem Erfassen aller denkbaren Parameter, in der Regel bis in die zweite Strukturebene. Bildlich kann man von der „Sippe" der Parameter sprechen. Mit Versuchen, die die Fertigung möglichst wenig beeinflussen, wird die Zahl der in Frage kommenden Parameter immer weiter eingeschränkt (von der „Sippe" über die „Familie" bis zur „Person"). Dadurch kann auch das Wirken zunächst noch unbekannter Parameter erkannt werden.

Die Bilder 6 und 7 zeigen die beiden typischen Vorgehensweisen der Systemoptimierung. Sie sind praktisch gleich in der Phase der Systemanalyse, unterscheiden sich dann aber in den Versuchsaufgaben und damit dann auch in der Auswahl der besten Lösung.

Den Schwerpunkt bilden aber nicht allein die verschiedenen Versuchsmethoden, sondern auch die Schritte der Systemanalyse, die in beiden Vorgehensweisen gleich sind. Zunächst ist ein Verantwortlicher zu benennen, der für das Ergebnis gerade steht. Das macht bereits 50% des Erfolgs aus. In der Praxis wird ihm die Aufgabe nur vage gestellt, z. B. „mit dieser Sache stimmt etwas nicht, schauen Sie mal

nach". Hier gilt es zunächst, die Situation zu beschreiben und das Ziel klar zu formulieren (wie im Fallbeispiel). Das hilft, bei der Aufgabe zu bleiben und nicht Zeit mit Unnötigem zu verschwenden.

Wissensträger und spätere Realisierer müssen integriert werden; erst die Beteiligung einer Vielfalt von Spezialisten macht komplexe Probleme wirklich durchschaubar. Dabei hat *jeder* seine spezifischen Scheuklappen! Deshalb muß das Problem zunächst für alle gleichermaßen strukturiert werden, z. B. mit einer Skizze, Zeichnung oder einem Funktionen-Blockdiagramm. Im nächsten Schritt werden potentielle Ursachen gesammelt (Hilfsmittel sind z. B. Fischgrätendiagramm, Vernetzungspläne, Tabellen). Diese beiden Schritte führen oft zu Aha!-Erlebnissen bei einzelnen Beteiligten und nicht selten schon zur wirklichen Problemlösung. Sie bedarf dann nur noch eines Bestätigungsversuchs.

Nach diesen beiden Schritten werden bisherige Ergebnisse integriert, um die Analyse weiter zu konzentrieren, alle Verantwortlichen zu beteiligen und Doppelarbeit zu vermeiden. Abschließend wird das Ergebnis der Systemanalyse in Form der Zielgrößen und Parameter zusammengefaßt. Nach diesem Schritt erfolgt die eigentliche Versuchsplanung und Versuchsdurchführung.

Mit der „Systemoptimierung" wurde 1988 ein systemisches Problemlösungswerkzeug geschaffen. Es steht neben anderen systemischen Werkzeugen wie der Wertanalyse oder der FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflußanalyse), die für andere Aufgaben ähnliche Abläufe zeigen. Als Werkzeug ist die Systemoptimierung z. B. in Qualitätsplanungen und -verbesserungen eingegliedert. Bild 8 zeigt als Beispiel die Schritte einer Vorgehensweise. Aber zunächst war die Problemlösungsfähigkeit nur theoretisch nachgewiesen. Im nächsten Schritt wurde sie in Pilotprojekten getestet, bevor die Anwendung zielorientiert verbreitert wurde und weiter verbreitet wird.

Bild 9 zeigt eine Übersicht über die Problemlösungsfähigkeit auf der Basis von 30 zufällig und repräsentativ ausge-

1. Genaue Aufgabenstellung

2. Systemanalyse

- Projektleiter (Verantwortung)
- Team (Wissensträger als *mögliche* Teilnehmer, kein Arbeitskreis, spätere Realisierer beteiligen)
- Funktionen-Blockdiagramm (Strukturierung)
- Fischgrätendiagramm (kreatives Sammeln und Ordnen potentieller Ursachen, *paralleles* Bearbeiten aller möglichen Fehlerursachen)
- Bisherige Ergebnisse (Beteiligung der Verantwortlichen, Doppelarbeit wird vermieden)
- Ergebnisse der Systemanalyse:
  - Zielgrößen (meßbar, mindestens skalierbar)
  - Parameter: geordnet nach vermutetem Einfluß; möglichst je zwei Werte; gruppiert nach Kosten, Veränderbarkeit sowie Zeitaufwand für Änderungen und zu Komponenten

  (Parameter möglichst als Komponenten identifizieren, da dadurch die Versuchsteile auf zwei sich unterscheidende Zusammenbauten reduziert werden)

3. Versuchsmethoden

Günstige Versuchsmethoden sind

- Paarweise Vergleiche
- Komponenten- bzw. Parametersuche
- Orthogonale Anordnungen (bei mehr als zwei Werten pro Parameter und Vorkenntnis über Wechselwirkungen)

Zwei Anmerkungen:

- Gleichgebaute Versuchsteile müssen systematisch auf unterschiedliche Ergebnisse untersucht werden (Auffinden von Ursachen für spätere Serienstreuungen)
- Die Ursache *jedes* Fehlers muß beseitigt werden, da die Zahl der Versuchsteile klein ist

4. Auswahl der besten Lösung

abhängig von der Versuchsmethode

5. Multiversuchsplanung

Periodische Verteilung und Integration der vier oben angegebenen Elemente, um mit minimaler Versuchsteilezahl und Zeit die Versuchsaufgaben zu erfüllen (dabei Lieferanten integrieren)

Bild 6. Systemoptimierung in den Bereichen Entwicklung und Planung

1. Genaue Aufgabenstellung

Wichtigste Parameter für Serienstreuungen und deren beste Werte bestimmen

2. Systemanalyse

- Projektleiter (Verantwortung)
- Team (Wissensträger als *mögliche* Teilnehmer, kein Arbeitskreis, spätere Realisierer beteiligen)
- Funktionen-Blockdiagramm (Strukturierung)
- Fischgrätendiagramm (kreatives Sammeln und Ordnen potentieller Ursachen, *paralleles* Bearbeiten aller möglichen Fehlerursachen)
- Bisherige Ergebnisse (Beteiligung der Verantwortlichen, Doppelarbeit wird vermieden)
- Ergebnisse der Systemanalyse:
  - Zielgrößen (meßbar, mindestens skalierbar)
  - Parameter: geordnet nach vermutetem Einfluß; möglichst je zwei Werte; gruppiert nach Kosten, Veränderbarkeit sowie Zeitaufwand für Änderungen und zu Komponenten

  (Parameter möglichst als Komponenten identifizieren, da dadurch die Versuchsteile auf zwei sich unterscheidende Zusammenbauten reduziert werden)

3. Versuchsmethoden

Günstige Versuchsmethoden sind

- Multivariationskarte
- Paarweise Vergleiche
- Komponenten- bzw. Parametersuche
- EVOP

4. Auswahl der besten Lösung

abhängig von der Versuchsmethode

5. Ständige schnelle Qualitätsverbesserung

- Bilden von Gruppen (z.B. Qualitätstechnik), die ständig komplexe Qualitäts- und Produktivitätsprobleme lösen (Lieferanten beteiligen)
- Kenntnis der o.a. Versuchsmethoden bis hinunter zur Facharbeiterebene
- Grundsätzliches Zulassen von kleinen Änderungen der Fertigungsparameter bei laufender Fertigung, um die wichtigsten zu finden und zu optimieren
- Planungs- und Auftragswesen für Verbesserungsprojekte
- Regeln der Fertigung mittels Precontrol

Bild 7. Systemoptimierung in der laufenden Fertigung

1. Hohe Ziele setzen, die neues Denken erfordern
2. Viele Projekte definieren
3. Prozeßparameter festschreiben
4. Qualitätsmerkmale meßbar oder skalierbar machen
5. Produkte und Prozesse mittels Systemoptimierung verbessern
6. Prozesse mittels Precontrol regeln
7. Durch Erfolg motivieren
8. Mitarbeiter an Projekten trainieren

Bild 8. Schritte zur Qualitätsplanung und -verbesserung

Untersuchte Systemoptimierungs-Projekte (Stichprobe):	30
Ergebnisse	
• Projekte Fertigung/Projekte Entwicklung:	2:1
• Breite der Anwendbarkeit	
- Fahrzeugtechnologien:	28
- Informationsverarbeitung:	1
- technisch-organisatorische Effizienzsteigerung:	1
• Projekte mit quantifiziertem Lösungsansatz:	100%
• Lösung nach Systemanalyse (nur Bestätigungsversuch):	20%
• Versuchsanordnungen (42) zu Rest-Projekten (24):	1,75
• Verteilung der Versuchsmethoden:	
- Shainin:	62%
- Taguchi:	26%
- andere:	12%
• Untersuchte Parameter:	2 bis 180 $\bar{x} = 30$
• Wichtige Parameter:	1 bis 15 $\bar{x} = 2$
• Projekte mit unbekannten wichtigen Wechselwirkungen:	13%

Bild 9. Problemlösungsfähigkeit am Beispiel von 30 Projekten

wählten Projekten. Die Systemoptimierung ist breit anwendbar, ihre Problemlösungsfähigkeit ist nicht nur auf technische Probleme beschränkt. In allen Projekten wurde ein quantifizierter Lösungsansatz gefunden: es kann also mit hoher Wahrscheinlichkeit damit gerechnet werden, eine Lösung zu finden. In jedem fünften Fall war allein die Systemanalyse schon zielführend; es bedurfte also keiner Versuchsplanung. Wenn Versuche geplant wurden, wurden vorwiegend Methoden nach *Shainin* und *Taguchi* ausgewählt. Beide Ansätze sind somit in der Praxis notwendig, wobei „Shainins" rein zahlenmäßig dominieren.

Die Zahl der Parameter spielt für die Problemlösung keine Rolle. In der Hälfte aller durchgeführten Projekte war sie größer als 30, der Maximalwert betrug 180. Letztlich wichtig war in einem Drittel aller Fälle nur ein Parameter, der zur Optimierung variiert werden mußte, in der Hälfte aller Fälle zwei Parameter. Hier zeigt sich sehr deutlich das Pareto-Prinzip: Der Einfluß aller Parameter läßt sich der Größe nach ordnen, nur wenige müssen beeinflußt werden. Somit ist es sinnvoll, zunächst in der Systemanalyse und dann in Versuchen die Zahl der Parameter immer weiter einzugrenzen.

Besonders sollte beachtet werden, daß in 13% aller Projekte zunächst unbekannte Wechselwirkungen den größten Einfluß auf eine Optimierungsaufgabe hatten. Sie können nur durch eine Kombination aus Systemanalyse, Versuchen mit filternder Wirkung und einer möglichst kleinen Zahl von unbelegten Annahmen gefunden werden. Versuchsplanung alleine ist unzureichend, eine Vorgehensweise wie bei der Systemoptimierung notwendig. Erst dadurch lassen sich die Grenzen überschreiten, die jeder der einzelnen Versuchsmethoden innewohnen.

Literatur

1 *Bhote, K. R.:* World Class Quality. AMA Management Briefing, AMA Membership Publications Division, American Management Association, New York 1988

2 *Taguchi, G.:* System of Experimental Design. American Supplier Institute, Dearborn 1987

3 *Shainin, D.:* Seminarunterlagen 1989 (nicht veröffentlicht)

4 *Wald, E.; Kuttler, W.:* Abschlußbericht zur Untersuchung Zahnriemengeräusch. BMW Werk Steyr 1989 (nicht veröffentlicht)

5 *Schick, P.:* Systemoptimierung - Parametrische Systemauslegung durch geplante Versuche. BMW AG Qualitätssicherung, 3. Auflage, München 1990

Der Autor dieses Beitrags

Dr.-Ing. *Peter Schick*, geb. 1955, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München, an der er später auch promovierte. Das Studium wurde durch ein Wirtschafts-Aufbaustudium ergänzt. Er war als Technischer Offizier der Luftwaffe in verschiedenen Funktionen der Instandhaltung, Qualitätssicherung und technischen Einsatzbereitschaft von Flugzeugen tätig. Anschließend arbeitete er in der Qualitätssicherungszentrale der BMW AG, München, als interner Berater. Heute ist er Unternehmensberater bei A. T. Kearney, Düsseldorf. 14154