

OPTIMIERUNG VON EINSTELLGRÖSSEN WÄHREND DER FERTIGUNG

# Mehrdimensional suchen

Alexander Katzung, Klaus Vettters und  
Thomas Herzog, Dresden

Die Methoden der Versuchsplanung sind effiziente Werkzeuge zur Optimierung von Prozesseinstellungen. Allerdings konnten sie bisher nur in der Phase der Fertigungsvorbereitung eingesetzt werden, da unakzeptable Störungen der Fertigung nicht zu verhindern waren. Das Kumulative Subraumverfahren wurde speziell zur Prozessoptimierung während der Fertigung entwickelt.

Unter Fertigungsbedingungen kann am einfachsten über die Einstellgrößen auf die Güte eines Prozesses eingewirkt werden. Bei der Suche nach den optimalen Einstellwerten können folgende Probleme auftreten:

- Die analytischen Zusammenhänge zwischen den Einstellgrößen und den Zielgrößen sind nicht bekannt,
- die Anzahl an Einstellgrößen ist sehr

groß oder

- die Einstellgrößen stehen untereinander in Wechselwirkung.

In der laufenden Fertigung können nur Optimierungsmethoden eingesetzt werden, die den Fertigungsablauf nicht oder nur geringfügig stören. Diese Bedingung erfüllen z. B. die üblichen statistischen Versuchsplanmethoden nicht, da hierbei Versuche mit schlechter Güte unver-

meidbar sind [1]. Deshalb wird die Suche nach optimalen Einstellwerten in der Praxis meist von Fachkräften durchgeführt, die über ein großes Wissen vom Fertigungsverfahren verfügen. Diese tasten sich auf der Grundlage ihres Erfahrungsschatzes und ständiger Beobachtung sukzessive an das Optimum heran. Diese Methode stößt dann auf ihre Grenzen, wenn viele (d. h. drei oder mehr) Einstellgrößen

**Autor**

**Dipl.-Ing. Alexander Katzung**, geb. 1968, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektronik-Technologie der TU Dresden. Er bearbeitet Projekte im Bereich der Optimierung von technologischen Verfahren der Elektronikfertigung.  
**Dr. rer. nat. Klaus Vettters**, geb. 1939, arbeitete bis 2004 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Numerische Mathematik der TU Dresden. Sein Fachgebiet war die Numerik der Optimierung.  
**Dr.-Ing. Thomas Herzog**, geb. 1966, arbeitet am Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT) in Dresden.

**Kontakt**

Thomas Herzog  
T 03 51/46 33 20 86  
herzog@avt.et.tu-dresden.de

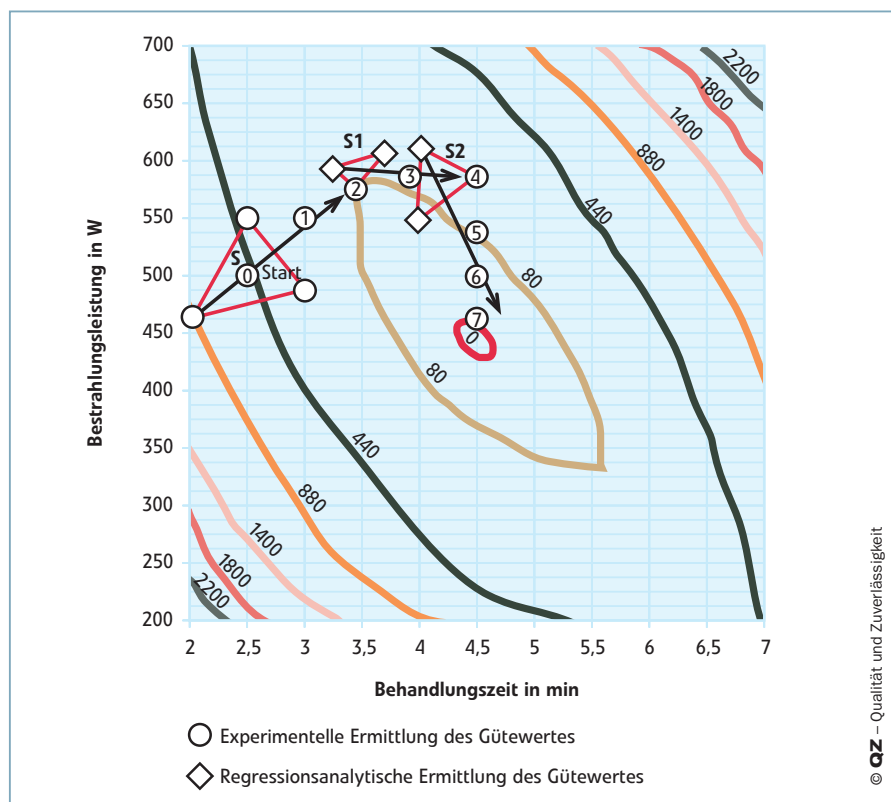


Bild 1. Demonstration des Kumulativen Subraumverfahrens an einer bekannten Gütefunktion

© qz – Qualität und Zuverlässigkeit

Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

© 2005 Carl Hanser Verlag, München www.qm-infocenter.de/QZ-Archiv

mit nichtlinearem Einfluss auf die Güte wirken. Aus diesem Grunde wurde an der TU Dresden ein speziell auf die Bedürfnisse der Einstellgrößenoptimierung unter Fertigungsbedingungen zugeschnittenes Suchverfahren entwickelt [2]. Das Kumulative Subraumverfahren (KSV) ist ein mathematisches Optimierungsverfahren vom Simplex-Typ [3, 4]. Es sucht nach der Extremstelle einer analytisch unbekannt Funktion mit  $n$  Variablen (die Einstellgrößen):

$$G(X) = G(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min \text{ oder } \max$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Funktion  $G(X)$  eine in ihrem Wertebereich  $u \leq X \leq o$  stetige Funktion ist.

### Optimieren mit System

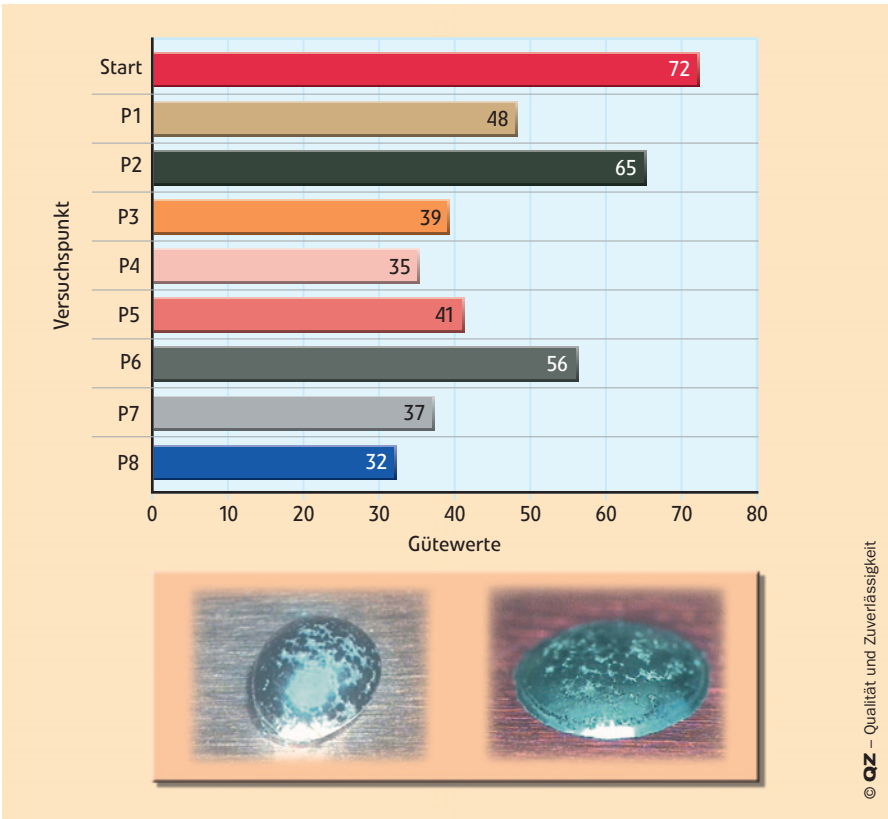
Ziele und Randbedingungen müssen bereits in der Aufgabenstellung für ein Optimierungsproblem Beachtung finden, um daraus die mathematische Formulierung ableiten zu können. Diese entsteht dann durch einen deterministischen Prozess. Diese so genannte Initialisierung muss in einer vorgegebenen Schrittfolge abgearbeitet werden. Dabei ist der erste Schritt die detaillierte Beschreibung der Zielgrößen. Darauf aufbauend werden die Einstellgrößen ermittelt, die während der Optimierung verändert werden sollen. Die Optimierung selbst startet mit der Untersuchung des  $n$ -dimensionalen Suchraums in Startpunktnähe. Dazu werden mindestens  $n+1$  Punkte benötigt. Diese sollen im Suchraum gleichmäßig verteilt sein. Dies wird durch die Konstruktion eines  $n$ -dimensionalen Simplex optimal erreicht. Die Eckpunkte des Simplex bilden die gesuchte Punktanzahl.

Das Kumulative Subraumverfahren (KSV) beruht auf der Idee, den  $n$ -dimensionalen Suchraum nur entlang Erfolg versprechender Richtungen zu untersuchen. Diese Richtungen stellen eindimensionale Subräume (Geraden) des Suchraumes dar. In den Subräumen werden an bestimmten Punk-

ten die Gütewerte experimentell ermittelt. So werden Informationen kumuliert, mit denen sich ein Modell der Subraumfunktion approximieren lässt. Mit Hilfe des Modells wird ermittelt, an welchen Punkten des Suchraums Güteverbesserungen zu erwarten sind. Für diese Punkte werden die Gütewerte experimentell bestimmt. Mit den neu gewonnenen Informationen wird das Modell verbessert. Das Subraumfunktional wird als quadratische Funktion über dem eindimensionalen Suchraum modelliert. Die Koeffizienten der Modellfunktion werden durch parameterlineare Regression (lineare diskrete Quadratmittelapproximation) bestimmt.

Anschließend erfolgt die Ermittlung der Extremstelle. Durch sukzessive Anwendung dieses Verfahrens wird in mehreren Schritten die Extremstelle des Subraumfunktionals ermittelt. Die Schrittweite der Testpunkte im Subraum wird so gewählt, dass für den aktuellen Testpunkt, in Bezug auf seinen Vorgänger, eine signifikante Verbesserung des Gütewertes eintritt (Bild 1).

Ein praktischer Test des Suchverfahrens KSV erfolgte an dem technologischen Verfahren Plasmavorbehandlung von Löt- und Verdrahtungsflächen. Eine Plasmavorbehandlung vor dem Löten kann die Reduktion von Metalloxi-  $\triangleright$



**Bild 2. Optimierungsverlauf zur Plasmavorbehandlung. (unten) Benetzungsfläche vorher (li.) und nachher, (oben) Gütwerte des Optimierungsverlaufs**

den ermöglichen. Es wurde eine spezielle Plasmabehandlung zur Reinigung und Aktivierung von Kontaktflächen entwickelt, wie sie in konventionellen Lötprozessen durch die Flussmittel erfolgt [5]. Die Güte setzt sich hier aus dem jeweiligen Erwartungswert  $\mu_\alpha$  und der Streuung  $\sum_\alpha$  der gemessenen Benetzungswinkel zusammen. Die Bewertungsformel lautet:

$$G = \mu_\alpha + \sum_\alpha \rightarrow \min$$

Bei der Optimierung wurden fünf Einstellgrößen variiert (Bild 2).

**Praxistext bestanden**

Die Wirtschaftlichkeit der Methode lässt sich am besten durch einen Vergleich mit

der Statistischen Versuchsplanung darstellen. Im gewählten Beispiel mit fünf Einstellgrößen wurde mit beiden Methoden das Optimum gefunden. Als Kenngröße für die Wirtschaftlichkeit der Optimierungsverfahren ist der notwendige Aufwand an Versuchen anzusehen, um Einstellgrößen zu ermitteln, mit denen der Fertigungsprozess gestartet werden kann. Beim Kumulativen Subraumverfahren ergibt die Analyse des Verfahrens den ungefähren Aufwand:

$$\text{Versuchszahl} \approx 4n$$

Im Beispiel wurden 18 Versuche durchgeführt.

Bei der statistischen Versuchsplanung wird das n-dimensionale Gütefunktional des Suchraums modelliert. Die Optimie-

**Projekt**

Die Optimierung von Fertigungsverfahren der Elektronik-Technologie durch evolutionstheoretische Methoden wurde am Institut für Aufbau und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT) der TU Dresden getestet und weiterentwickelt. Die Arbeiten wurden von der Stiftung Industrieforschung gefördert und vom Institut für Numerische Mathematik der TU Dresden wissenschaftlich unterstützt.

**Literatur**

- 1 Krottmaier, J.: Versuchsplanung – Der Weg zur Qualität 2000. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1991
- 2 Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie '94. Frommann-Holzboog, Stuttgart 1994
- 3 Nelder, J. A.; Mead, R.: A simplex method for function minimization. Computer Journal (1965) 7, S. 308–313
- 4 Alt, W.: Nichtlineare Optimierung. In: Aufbaukurs Mathematik. Vieweg, Braunschweig 2002
- 5 Herzog, T.: Beiträge zur Entwicklung eines plasmagestützten flussmittel-freien Reflowlötverfahrens, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin 2002

rung wird dann an der Modellgleichung der Gütefunktion durchgeführt. Somit mussten im Beispiel insgesamt 420 Versuche durchgeführt werden. Für einen Versuch fielen Kosten von ca. 4,50 Euro an. Damit hat die Optimierung der Plasmavorbehandlung mit der statistischen Versuchsplanung 1845 Euro gekostet, dem gegenüber stehen 81 Euro mit dem Kumulativen Subraumverfahren. □