

Hilti Aktiengesellschaft, FL-9494 Schaan
Fürstentum Liechtenstein
Telefon (075) 6 21 11 / Telex 88 99 00 00
Telefax (075) 6 29 65

HILTI

MEMO PROTOKOLL BERICHT TELEFAX

Teilnehmer:

Nummer: 51/88
Ausgeber/Tel.Nr.: IFg-2321
Datum: 15.9.88

Zur Bearbeitung:

Zur Information: KQ, IL, BL, DL, XL, IF, IR, IK, BER, IFd, IFs

Chancen bei der Innovation von Produkten erkennen

Zusammenfassung

Nach einer Anregung von Herrn Imelmann (KQ) (siehe Memo 189/88) wird eine Arbeit von Thomas B. Barker [1] zur Erkennung von Technologievorteilen nachvollzogen und auf ein Hilti-internes Beispiel angewendet. Das vorliegende Verfahren zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

1. Durch eine effiziente Auswertung der umfangreichen Versuchs- und Marktdaten wird die Erarbeitung von Richtlinien für die **Produktoptimierung** erleichtert. Wie das zweite Beispiel zeigt, sind diese Richtlinien von komplexer Natur und erfordern somit Simulationen zur gezielten Umsetzung.
2. Die gezielte Auswertung der vielparametrischen Marktdaten erleichtert den quantitativen Vergleich von Technologien, die Erkennung von **Trends** und die Förderung der **Produktinnovation**.



IFg - W. Gerber

1. Einleitung

Bei der Auslegung eines Gerätes muss der Konstrukteur bestimmte optimale Eigenschaften erreichen. Es stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die er für jede Baugruppe verwenden kann. Zusätzlich sind die optimalen Auslegungsparameter für jede Baugruppe unbekannt. Ein Weg dieses Problem zu "lindern" wird im Artikel von Thomas B. Barker [1] dargestellt. Ausgehend von bekannten Geräten aus eigener und fremder Produktion, können die verschiedenen charakteristischen Grössen (angewandte Technologien und Auslegungsparameter) mit den erzielten Eigenschaften korreliert werden. Aus dem berechneten Zusammenhang kann die optimale Technologie ausgewählt und die Auslegungsparameter optimiert werden.

2. Der Algorithmus

Ein gegebenes Produkt wird durch M Produktparameter x_i ($i=1,2,\dots,M$) und eine "Qualitätsfunktion" y beschrieben. Im allgemeinen hängt die Qualitätsfunktion von den verschiedenen Produktparametern x_j , d.h.

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_M) \quad (1)$$

ab. Mit einer Reihenentwicklung um ein "mittleres Produkt" mit den Produktparametern z_j ist in erster Näherung der Zusammenhang zwischen Qualitätsfunktion und Produktparametern

$$y(x_1, x_2, \dots, x_N) = y(z_1, z_2, \dots, z_N) + \sum_{i=1}^M \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{x_i = z_i} (x_i - z_i) \quad (2)$$

geben. Mit anderen Worten kann in erster Näherung ein linearer Zusammenhang der Form

$$y = A_1 + \sum_{i=1}^M A_{i+1} x_i \quad (3)$$

angenommen werden. Die Parameter A_j können durch einfache Regression bestimmt werden. Sind die Produktparameter und die Qualitätsfunktion eines Produktes j gleich $x_i(j)$ und $y(j)$, dann gilt es die A_i 's zu finden, so dass

$$\sum_{j=1}^N \left(y(j) - A_1 - \sum_{i=1}^M A_{i+1} x_i(j) \right)^2 \quad (4)$$

minimiert wird. Durch Ableiten nach den verschiedenen Parametern A_i ergibt sich die Gleichung

$$NA_1 + \sum_i A_{i+1} \left(\sum_j x_i(j) \right) = \sum_j y(j) \quad (5)$$

und die M Gleichungen ($k=1,2,\dots,M$)

$$A_1 \left(\sum_j x_k(j) \right) + \sum_i A_{i+1} \left(\sum_j x_k(j) x_i(j) \right) = \sum_j x_k(j) y(j) . \quad (6)$$

Führt man die Notation

$$M_{ki} = \begin{cases} N & \text{für } k=1 \text{ und } i=1 \\ \sum_j x_k(j) & \text{für } k=1 \text{ und } i>1 \\ \sum_j x_i(j) & \text{für } k>1 \text{ und } i=1 \\ \sum_j x_k(j) x_i(j) & \text{für } k>1 \text{ und } i>1 \end{cases} \quad (7)$$

und

$$z_k = \begin{cases} \sum_j y(j) & \text{falls } k=1 \\ \sum_j x_k(j) y(j) & \text{falls } k>1 \end{cases} \quad (8)$$

ein, so reduziert sich das Gleichungssystem zu

$$\sum_i M_{ki} A_i = z_k . \quad (9)$$

Ist M_{ki}^{-1} die inverse der Matrix M_{ki} , dann sind die gesuchten Koeffizienten

$$A_i = \sum_{ki} M_{ki}^{-1} z_k . \quad (10)$$

Mit den verschiedenen Koeffizienten A_i können die verschiedenen Produktparameter variiert werden, um einen optimalen Wert für die Qualitätsfunktion zu erreichen.

Als einfaches Beispiel soll hier die Auswertung von Daten verschiedener Fotokopierer aus [1] betrachtet werden.

In diesem Fall sind die folgenden Daten von neun Kopierern bekannt:

Gerät	Entwicklung	Fotoleiter	Geschw.	Körnung
NP-80	Flüssig	CdS	32	13.4
NP-200	1-Komp.	CdS	20	10.0
EP-310	2-Komp.	CdS	12	3.7
REC-115	2-Komp.	Se	15	8.9
755	Flüssig	Se	14	15.7
780	Flüssig	Se	20	14.8
SF-730	1-Komp.	ZnO	13	14.5
SF-810	2-Komp.	CdS	22	6.6
SF-820	2-Komp.	CdS	22	7.8

Tabelle 1: Daten der Geräte

Bei der Herstellung von Fotokopierern werden verschiedene Entwicklungs-Techniken angewendet. Bekannt sind die "Flüssigen" (FL), "Einzel-Komponenten" (1K) und "Zwei-Komponenten" (2K) Verfahren. Diese drei sich gegenseitig ausschliessende Produktparameter, können durch zwei Parameter (FL) und (1K) dargestellt werden. Ist nämlich die angewendete Technologie die "Flüssige", dann ist (FL = 1, 1K = 0), für die "Einzel-Komponenten" dagegen (FL = 0, 1K = 1) und für die "Zwei-Komponenten" (FL = 0, 1K = 0). Bei der "Fotoleitung" werden drei verschiedene Materialien eingesetzt: CdS, Se und ZnO. Analog dem Entwicklungsverfahren können alle drei Technologien durch zwei Parameter ((CdS) und (Se)) dargestellt werden. Als weiterer Produktparameter ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit (SP) gegeben. Die Qualitätsfunktion ist durch die "Körnung" (Graininess) (GR) gegeben. Unter dieser neuen Definition ist Tabelle 1 :

Gerät	FL	1K	CdS	Se	SP	GR
NP-80	1	0	1	0	32	13.4
NP-200	0	1	1	0	20	10.0
EP-310	0	0	1	0	12	3.7
REC-115	0	0	0	1	15	8.9
755	1	0	0	1	14	15.7
780	1	0	0	1	20	14.8
SF-730	0	1	0	0	13	14.5
SF-810	0	0	1	0	22	6.6
SF-820	0	0	1	0	22	7.8

Tabelle 2: Umgeschriebene Daten der Geräte

Führt man die Regression durch, dann folgt die Qualitätsfunktion

$$GR = 8.18 + 5.37 (FL) + 3.85 (IK) - 5.83 (CdS) - 1.73 (Se) + 0.19 (SP) . \quad (11)$$

Die mittlere Abweichung der verschiedenen Produktparameter von der errechneten Qualitätsfunktion beträgt 0.74, d.h. die durch (11) errechneten Werte haben eine mittlere Unsicherheit von 0.74 .

Aus (11) wird ersichtlich, dass, um GR zu minimieren, für die Entwicklung die "Zwei-Komponenten" Methode und für den Fotoleiter "CdS" verwendet werden sollte. Das Gerät "EP-310" hat gerade diese Konfiguration. Seine Geschwindigkeit ist 10, d.h. man erreicht auch mit einer grösseren Geschwindigkeit (erwünscht) von 15 noch immerhin ein GR von 5.2 . Bei diesem Verhältnis GR zu Geschwindigkeit wäre das Gerät sehr konkurrenzfähig. In dieser Form kann mit den Parametern "gespielt" werden, um eine optimale Auslegung zu erhalten. Eine zusätzliche Möglichkeit besteht darin, noch nie dagewesene "Technologiekombinationen" noch vor jeglicher Entwicklungsarbeit auf ihre Effizienz zu testen. Insofern stellt es ein Handwerkzeug dar, um Chancen bei der Innovation zu erkennen.

3. Ein Beispiel mit "Hilti-Technologie"

Im folgenden Beispiel wird der Algorithmus auf eine Entwicklung der Qualitätsfunktion bis zur zweiten Ordnung ausgedehnt, so dass

$$y(x) = y(z) + \sum_{i=1}^M \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{x=z} (x_i - z_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} \right|_{x=z} (x_i - z_i)^2 \quad (12)$$

ist, was in Analogie zu (3) als

$$y = A_1 + \sum_{i=1}^M A_{i+1} x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=i}^M A_{iM + \frac{(1-i)i}{2} + 1 + j} x_i x_j \quad (13)$$

geschrieben werden kann. Durch eine analoge Minimierung kann die Matrix M berechnet werden, um dann durch die Inversion auf die A_i 's zu schliessen.

Als Beispiel werden die Daten

- SL : Schlagleistung [W]
- MF : Masse Flugkolben [g]
- SF : Schlagfrequenz [Hz]
- WD : Werkzeugdurchmesser [mm]

von verschiedenen Maschinen-Werkzeug Kombinationen betrachtet. Die Bohrleistungen (BL) in [cm³/min] wird als Qualitätsfunktion angenommen. Die entsprechenden Messwerte für die Bohrleistung sind:

Bohrer	Maschine						
	TE700	TEA/B	TE12	TE22	TE10	TE17	UBH2/20
6.0	13.2	14.1	12.0	14.1	15.8	11.0	16.6
8.0	24.2	23.3	18.7	17.0	23.6	14.4	23.0
10.0	32.9	32.0	26.0	32.0	27.1	18.0	26.5
12.0	41.7	39.5	32.3	31.1	35.5	22.4	33.5
16.0	49.0	47.3	38.1	36.2	34.8	25.0	34.0
20.0	54.6	38.5	28.4	42.3	24.7	27.6	34.2
22.0	-	30.8	-	-	-	-	-
25.0	56.8	21.7	8.0	46.0	-	23.2	28.0
28.0	42.0	-	-	-	-	-	-
32.0	30.0	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3: Bohrleistung verschiedener Maschinen-Werkzeug Kombinationen

und die Maschinenparameter:

	TE12	UBH2/20	TEAB	TE22	TE10	TE17	TE700
Schlagleistung (W)	90.	125.	142.	130.	105.	110.	190.
Masse Flugkolben (g)	62.	51.	75.	88.	62.	88.	90.
Schlagfrequenz (Hz)	60.	65.	62.	53.	70.	49.	56.

Tabelle 4: Maschinenparameter

Aus der Regression ergibt sich die Formel

$$\begin{aligned}
 BL = & - 359.8 + 2.452 (SL) - 0.059 (MF) + 6.39 (SF) + 9.39 (WD) \\
 & - 0.003 (SL)^2 - 0.006 (MF)^2 - 0.021 (SF)^2 - 0.194 (WD)^2 + \\
 & + 0.003 (SL)(MF) - 0.033 (SL)(SF) + 0.020 (SL)(WD) \\
 & + 0.008 (MF)(SF) - 0.01 (MF)(WD) - 0.076 (SF)(WD)
 \end{aligned} \quad (13)$$

wobei die Bohrleistung in cm^3/min und die entsprechenden Grössen in Watt, Gramm, Hz und mm einzusetzen sind. Die mittlere Abweichung der gemessenen von der gefitteten Bohrleistung beträgt $3.75 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Aus (13) folgt, dass für jede Maschine (gegebene Masse des Flugkolbens MF) und Werkzeug (gegebener Werkzeughdurchmesser WD) eine optimale Schlagleistung SL und Schlagfrequenz (SF) zur optimalen Bohrleistung BL gefunden werden kann. Um diese Werte zu optimieren führt man die "Referenzbohrleistung"

$$\begin{aligned}
 BL_0(MF, WD) = & - 39.3 + 0.74 (MF) + 8.10 (WD) \\
 & - 0.006 (MF)^2 - 0.285 (WD)^2 - 0.011 (MF)(WD) ,
 \end{aligned} \quad (14)$$

die "Referenzschlagleistung"

$$SL_0(MF, WD) = 129.0 + 0.17 (MF) - 4.00 (WD) \quad (15)$$

und die "Referenzschlagfrequenz"

$$SF_0(MF, WD) = 50.9 + 0.06 (MF) + 1.33 (WD) \quad (16)$$

ein. Mit den relativen Grössen

$$\xi = SL - SL_0(MF, WD) \quad (17)$$

und

$$\eta = SF - SF_0(MF, WD) \quad (18)$$

lautet (13)

$$BL = BL_0(MF, WD) - 0.003 \xi^2 - 0.021 \eta^2 - 0.033 \xi\eta . \quad (19)$$

Aus (19) folgt, dass bei $\xi = 0$ und $\eta = 0$ die Bohrleistungsfunktion einen Sattelpunkt hat. Der "Kamm" der Bohrleistungsfunktion verläuft entlang der Geraden

$$\eta = - 0.79 \xi \quad (20)$$

was mit (17) und (18) die Gerade

$$(SF - SF_0(MF, WD)) = - 0.79 (SL - SL_0(MF, WD)) \quad (21)$$

ergibt. Für eine optimale Einstellung der Schlagleistung und Schlagfrequenz sollten folglich Schlagleistungen und Schlagfrequenzen eingestellt werden die (21) erfüllen, aber so weit wie möglich die Referenzwerte meiden. So paradox es auch klingen mag, zeigen die Daten, dass die Kombination hoher Schlagleistungen und Schlagfrequenzen ungünstig sind. Aus der Korrelation der Daten geht aber nicht hervor warum dies so ist.

Als konkretes Beispiel kann die TE22 betrachtet werden. Für ein Werkzeugdurchmesser von 6 mm stellt die Schlagfrequenz von 53 Hz für die Schlagleistung von 130 W eine optimale Wahl dar. Bei einem Werkzeugdurchmesser von 20 mm könnte allerdings eine Frequenz von nur 30 Hz bei einer Schlagleistung von 130 W eine Bohrleistung von 55 cm³/min ergeben. Dies wäre eine 25% höhere Bohrleistung! Allerdings ist dies eine Extrapolation in einem Bereich, in dem keine Daten für Maschine und Werkzeuge bestehen.

Aus dieser Darstellung folgt, dass ein besserer Wirkungsgrad (höhere Bohrleistung oder kleineres Gewicht der Maschine) durch eine "intelligente" Wahl der Schlagleistung und

Schlagfrequenz erzielt werden kann. Hierfür würde es reichen, dass die Maschine den Werkzeugdurchmesser "liest" und sich selbständig einstellt. Die Berechnung der optimalen Parameter kann durch das hier dargestellte Verfahren durchgeführt werden. Ein weiterer Schritt in der Entwicklung einer "intelligenten Maschine" stellt das permanente Messen der Bohrleistung und selbständigen Regelung der Schlagleistung und Schlagfrequenz dar.

4. Literatur

- [1] Thomas B. Barker
Competitive Technology Benchmarking
1988-ASQC Quality Congress Transactions-Dallas