

## Voraussetzung und verwandte Themen

Für diese Beschreibungen sind keine besonderen Vorkenntnisse erforderlich. Weiterführende Themen sind u.a.:

[www.versuchsmethoden.de/Systemanalyse\\_14.pdf](http://www.versuchsmethoden.de/Systemanalyse_14.pdf)

[www.versuchsmethoden.de/Versuchsplanung.pdf](http://www.versuchsmethoden.de/Versuchsplanung.pdf)

## Einführung

In der Statistik wird mit Sigma  $\sigma$  die Standardabweichung (Streuung) eines Prozessmesswertes bezeichnet. Six Sigma steht für einen Prozess dessen Streuung einen Überschreitungsanteil von max. 3,4 ppm aufweist. Wichtiger als die statistische Bedeutung von Six Sigma ist jedoch die Philosophie, die sich hinter diesem Begriff verbirgt.

Die Grundgedanken zu Six Sigma entstanden in den USA und Europa in den 80er Jahren, als acht renommierte Unternehmen sich zusammenschlossen, um gemeinsam auf die bemerkenswerte Qualität von japanischen Erzeugnissen zu reagieren. Motorola, als eines dieser Unternehmen, hat Six Sigma zu einer strukturierten Methodik hin entwickelt, insbesondere um statistische Einflüsse und die Komplexität von Prozessen im Bereich der Chip-Fertigung besser zu beherrschen. Six Sigma wurde berühmt, als General Electric (GE) beschloss, ab 1996 diese Vorgehensweise über alle Geschäftsfelder auszurollen. GE wies ab 1999 jährlich über \$1,5 Mrd. Kosteneinsparungen durch diese Methodik aus. Six Sigma wird heute weltweit von zahlreichen Großunternehmen umgesetzt – nicht nur in der Industrie, sondern zunehmend auch im Banken- und Versicherungssektor.

Die Methoden von Six Sigma sind bereits bekannte statistische Verfahren, wie z.B. Prozessfähigkeit, Hypothesentests, Design of Experiment (DoE), Varianzanalyse, Multiple Regression, Ursachen-Wirkungsanalysen, usw.

## Die SixSigma Zyklen

Der wichtigste Six Sigma-Zyklus für den Problemlösungsprozess ist der DMAIC:

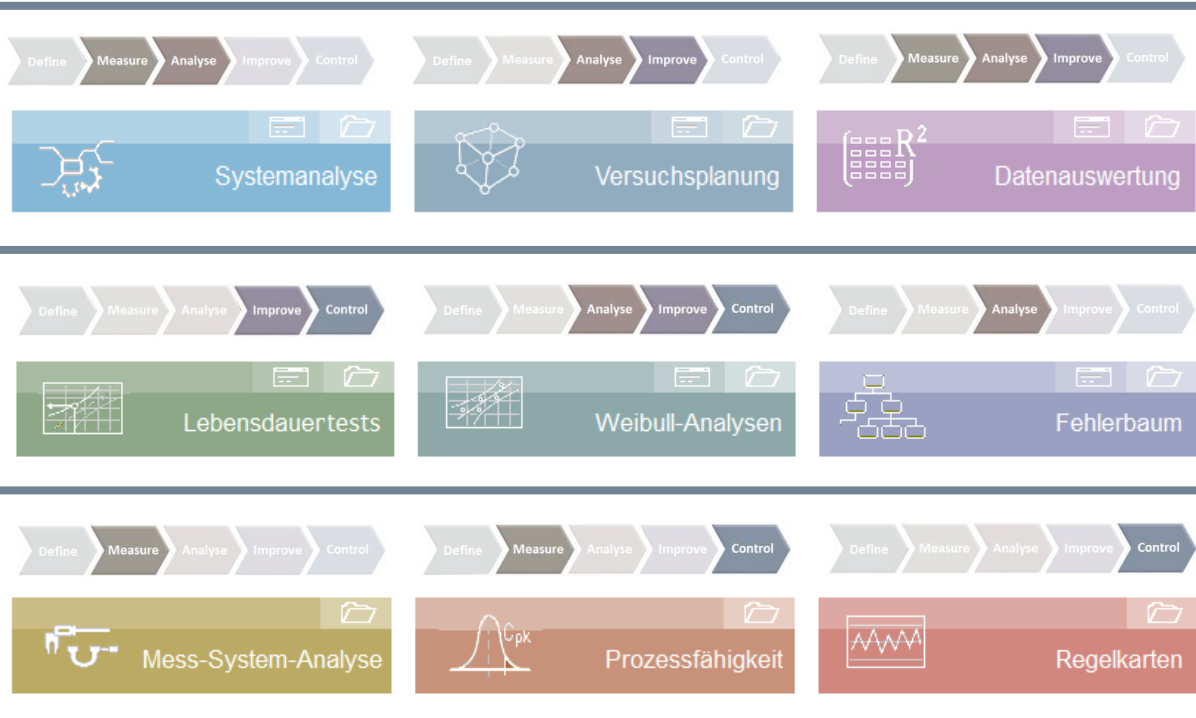


<b>Define</b>	Beschreibung des Problems – Projekt aufsetzen – Ziel festlegen
<b>Measure</b>	Messen der Auswirkungen – Ist-Situation beschreiben
<b>Analyse</b>	Ermittlung der Ursachen
<b>Improve</b>	Beseitigung des Problems – Lösungen finden
<b>Control</b>	Stabilität und Nachhaltigkeit sicherstellen

## Methodenauswahl für den DMAIC-Zyklus

	<b>Methode</b>
<b>DEFINE</b>	<p><b>Beschreibung des Problems – Projekt aufsetzen – Ziel festlegen</b></p> <p>Aufgabenblatt, Project Charter            Stakeholderanalyse            Kick-Off Meeting            Systemanalyse Ursachen-Wirkungsdiagramm            Quality Function Deployment (CTQ &amp; VoC)</p>
<b>MEASURE</b>	<p><b>Messen der Auswirkungen – Ist-Situation beschreiben</b></p> <p>Design-Scorecard (Parameter, Wertebereiche, Einheiten....)            Operationale Definition (was wird wann, wie und wo gemessen)            Messsystemanalyse (MSA)            Stichprobenstrategie und -größe            Stat. Kennwerte: Mittelwert, Standardabweichung, ...            Statistische Verteilungen und deren Kennwerte            Aktuelle Prozessfähigkeit bestimmen</p>
<b>ANALYSE</b>	<p><b>Ermittlung der Ursachen</b></p> <p>Grafische Darstellungen (Pareto, Ausgleichsgerade, Multi-Vari, Box-Plot, ...)            Ursachen-Wirkdiagramm Erweiterungen/Ergänzungen            FMEA &amp; Fehlerbaum            Hypothesentests            Einfache und multiple Regression historischer Daten            Design of Experiment (DoE) Einführung            Datenauswertung aus DoE            Lebensdauerversuche, Weibull mit bisherigem Stand</p>
<b>IMPROVE</b>	<p><b>Beseitigung des Problems – Lösungen finden</b></p> <p>Lösungen finden, optimale Varianten bestimmen            Design of Experiment (DoE), 2. Durchlauf., Bestätigung            Optimizer (Suche nach Bestpunkten aus Regressionsmodell)            Quality Function Deployment (Berücksichtigung der Fertigung)            Lebensdauerversuche, Weibull mit optimiertem Stand</p>
<b>CONTROL</b>	<p><b>Stabilität und Nachhaltigkeit sicherstellen</b></p> <p>Maschinen- und Prozessfähigkeit            Prozessüberwachung, Regelkarten bzw. SPC            Stichprobenüberwachung            Datenauswertung Prozessdaten (z.B. Regressionen, etc.)            Prozessdokumentation und Projektabschluss</p>

## Methodenauswahl und Zuordnung DMAIC-Zyklus



## Design for SixSigma

Neben der reaktiven Vorgehensweise gibt es einen präventiven Ansatz, um Fehlern im Produktentstehungsprozess vorzubeugen. Dieser ist bekannt unter dem Namen Design for Six Sigma, kurz DFSS. Die bekanntesten Zyklen sind hier:

- DMADV** Define, Measure, Analyze, Design, Verify Meist für Weiterentwicklg.
- IDOV** Identify, Design, Optimize, Validate Meist für Neuentwicklung

**DFSS** erweitert die Six Sigma Philosophie um den Aspekt der Prävention. DFSS unterstützt die Entwicklungsarbeit durch einen zielgerichteten Einsatz von Methoden und Werkzeugen in Teilphasen oder während des gesamten Produktentstehungsprozesses. Für DMADV und IDOV kommen zu den Methoden des DMAIC insbesondere Werkzeuge hinzu, die Ideen und Kreativität für neue Entwicklungen fördern. Unter anderem sind das:

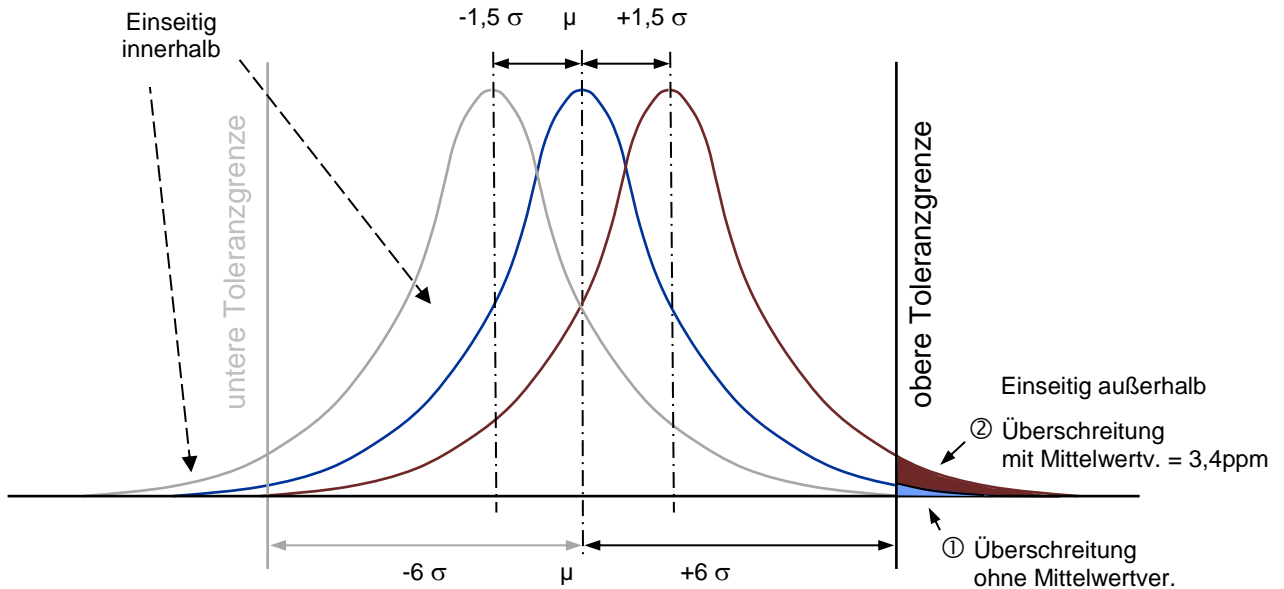
- Brainstorming
- Morphologischer Kasten und Pugh-Matrix
- Mind-Mapping
- Scamper (Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put, Eliminate, Reverse)
- 6-3-5 Methode (6 Teilnehmer, 3 Ideen, 5 Durchläufe)
- Lösen von technischen Widersprüchen mit TRIZ

Weiterhin wird bei DFSS angewendet:

- Stärken-/Schwächen-Analyse
- Intensive Nutzung der QFD über alle 4 Häuser
- Intensive Nutzung von Systemanalysen, FMEA's und Fehlerbäume
- Fehlervermeidung, z.B. nach Poka Yoke
- Rechner-Simulationen, z.B. Monte-Carlo-Simulation

## Statistische Betrachtung von SixSigma

Wie Eingangs beschrieben, ist  $\sigma$  das Maß der Streuung eines Produktes oder eines Prozesses. Bei der Bestimmung von  $\sigma$  aus einer Stichprobe ergibt sich die mittlere Gaußkurve bei  $\mu$ . Beobachtet man einen Prozess über einen längeren Zeitraum, so schwankt der Mittelwert. Man geht hier pauschal von  $\pm 1,5 \sigma$  aus. Die maximale Überschreitung auf der rechten Seite kann somit 3,4 ppm betragen ②. Hinweis: Der Anteil der Überschreitung wird in der Grafik nur bei der oberen Toleranzgrenze dargestellt. Die darunter gezeigte Tabelle ist entsprechend die einseitige Betrachtung



Sigma-Wert mit Mittelwertversch.  $\text{Sigma} = \sigma + 1,5$  →

reguläres  $\sigma$  ohne Mittelwertverschiebung ↙

$\sigma$ ①	innerh. %	außerh. %	Cp *	ppm ①
1	84,13	15,87	0,33	158655
1,5	93,32	6,68	0,50	66807
2	97,72	2,28	0,67	22750
2,5	99,38	0,621	0,83	6210
3	99,87	0,135	1,0	1350
3,5	99,98	2,33E-02	1,17	233
4	99,9968	3,17E-03	1,33	32
4,5	99,9997	3,40E-04	1,50	3,4
5	99,99997	2,87E-05	1,67	0,287
5,5	99,999998	1,90E-06	1,83	0,019
6	99,9999999	9,87E-08	2,00	0,001

Sigma ②	Cpk *	ppm ②
1,5	0	500000
2	0,17	308538
2,5	0,33	158655
3	0,50	66807
3,5	0,67	22750
4	0,83	6210
4,5	1,0	1350
5	1,17	233
5,5	1,33	32
6	1,50	3,4

Wert in der rechten Tabelle sind in der SigSigma Literatur zu finden.

\* Bedeutung von Cp/Cpk siehe Kapitel Fähigkeitskennzahlen

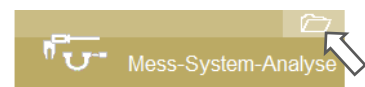
Werte in dieser Tabelle sind in allgemeinen Statistik-Büchern zu finden

## Beispiel für die wichtigsten Methodenbausteine

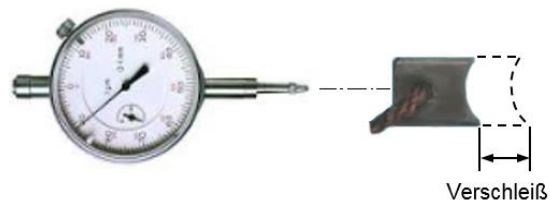
Anhand eines einfachen Beispiels des Bürstenverschleißes eines E-Motors sollen die wichtigsten Methoden für eine Problemlösung aufgezeigt werden. Die entsprechenden Beispieldateien befinden sich unter \Beispieldaten\SixSigma



Im Rahmen der Define-Phase wird festgelegt, dass der Bürstenverschleiß bei einem Standardtestprogramm über 500h zu bewerten ist und max. 2 mm betragen darf (Lastenheftanforderung).



Zur Messung des Bürstenverschleißes wird eine Messuhr verwendet. Hierfür soll ein Mess-Systemanalyse durchgeführt werden. Hier soll eine ANOVA-Methode nach VDA Band 5 angewendet werden. Es werden durch 2 Prüfer 10 verschiedene E-Motoren gemessen. Für bestehende Untersuchungen und eine spätere DoE ist ein Verschleiß zwischen 0,5 und 2,5mm als Bezugsbereich (Toleranz) anzusetzen. Zusammen mit dem Normal ergibt sich:



### ANOVA ohne Wechselwirkungen

	DF	SS	MS	F	p-value
Teil	9	2,953E+00	3,281E-01	57,3083	0,000
Prüfer	2	9,100E-02	4,550E-02	7,9466	0,001
Wiederholbarkeit	48	2,748E-01	5,726E-03		
Total	59	3,319E+00			

### VDA 5 / ISO 22514-7

Auflösung der Anzeige  
 Wiederholbarkeit Normal  
 Standardunsicherheit (Bias)  
 Wiederholbarkeit Prüfobjekt  
 Wiederholbarkeit Prüfer  
 Wechselwirkung

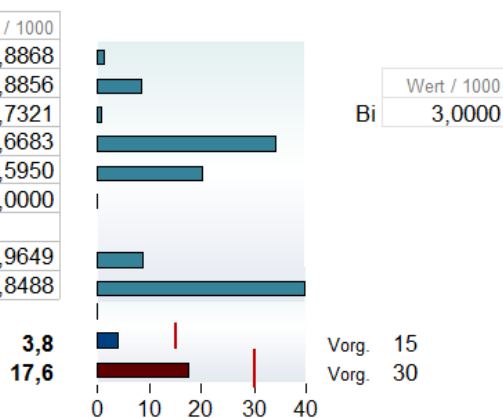
$u = \sqrt{MS}$

	U	MS	Bi
RE	2,8868		
EVR	18,8856		
BI	1,7321		
EVO	75,6683		
AV	44,5950		
IA	0,0000		
MS	18,9649		
MP	87,8488		

Messunsicherheit  
 Messprozess

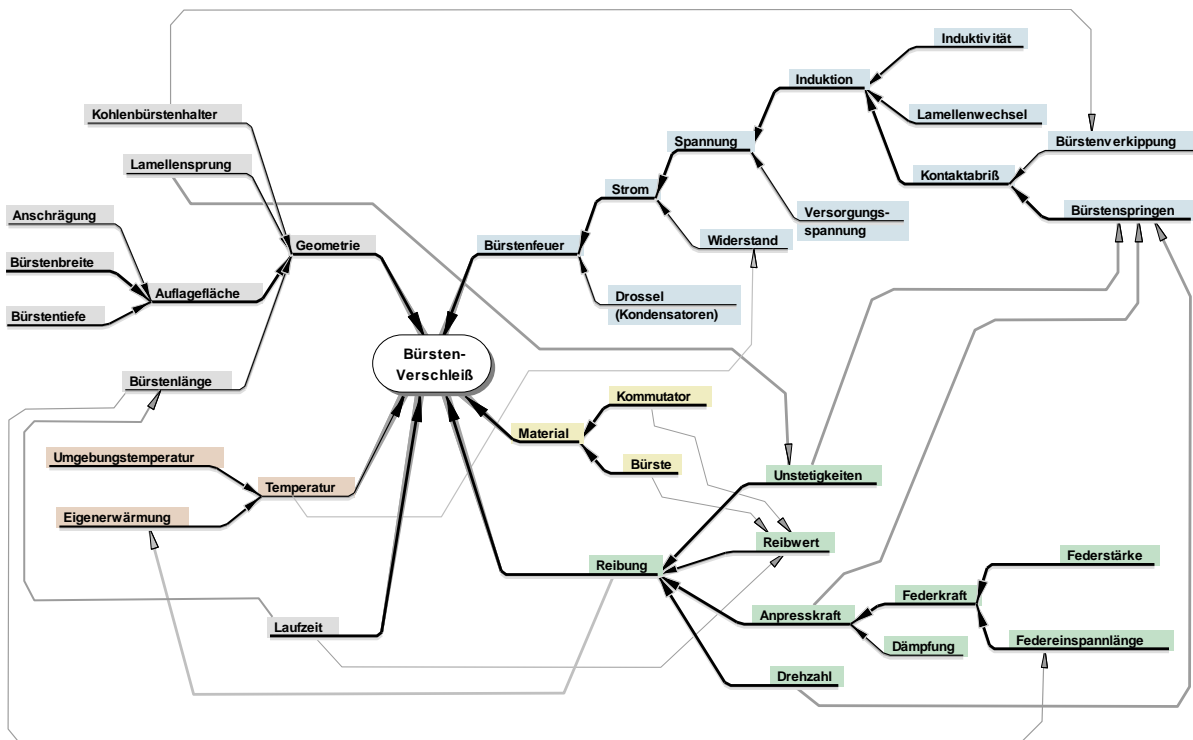
Messsystem  
 Messprozess

%Q MS (95,45%)  
 %Q MP (95,45%)

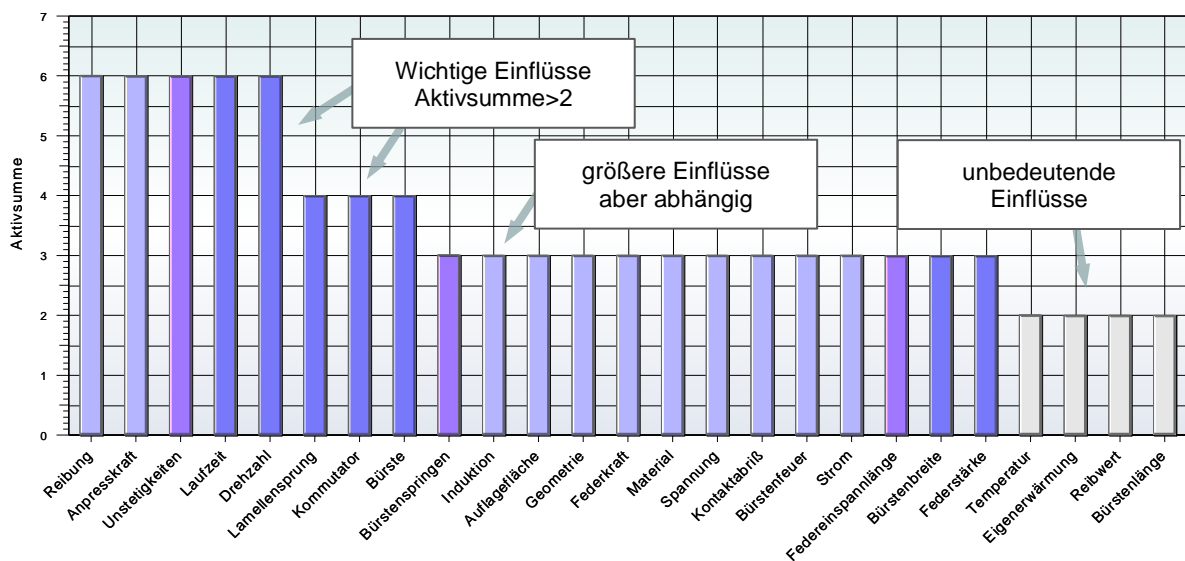


Ergebnis: Das Messsystem ist mit einer Messunsicherheit von  $Q_{MP} < 20\%$  geeignet.

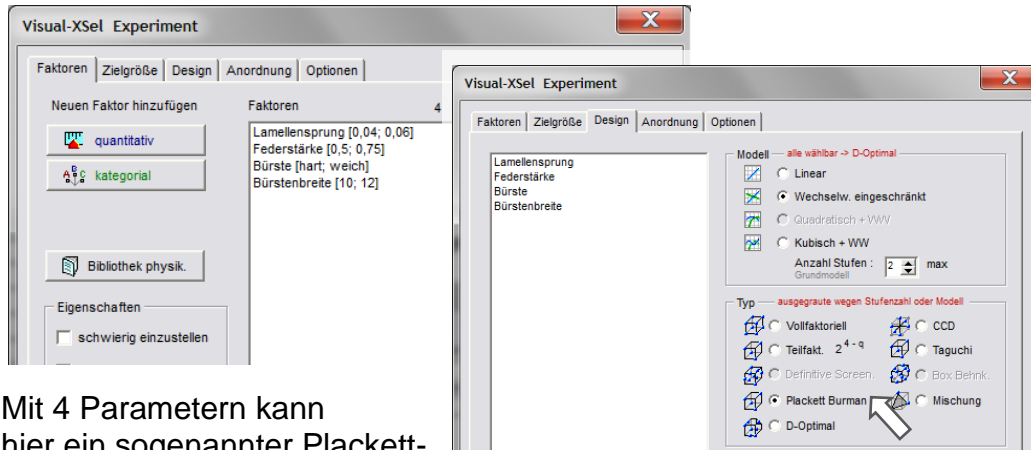
Phasen Analyse und Improve aufgezeigt werden. Zunächst wird ein Ursachen-Wirkungsdiagramm für den Bürstenverschleiß erstellt (ausführliche Beschreibung unter [www.versuchsmethoden.de/Systemanalyse\\_14.pdf](http://www.versuchsmethoden.de/Systemanalyse_14.pdf))



Die Querverbindungen stellen Abhängigkeiten zwischen den Parametern dar, die für eine spätere DoE problematisch sein können. Die Wirkungen wurden hier in den Stufen 1..5 bewertet. Hieraus lässt sich ein Pareto-Verteilung erstellen, um die wichtigsten Parameter aus der Vielzahl von Einflüssen zu reduzieren.



Aus dieser Auswahl wurden 4 Parameter ausgewählt (alle anderen müssen überwacht und möglichst konstant gehalten werden)



Mit 4 Parametern kann hier ein sogenannter Plackett-Burman-Versuchsplan verwendet werden:

	A	B	C	D	E	F
1	Nr	Lamellensprung	Federstärke	Bürste	Bürstenbreite	Verschleiß
2	1	0,06	0,5	weich	10	
3	2	0,06	0,75	hart	12	
4	3	0,04	0,75	weich	10	
5	4	0,06	0,5	weich	12	
6	5	0,06	0,75	hart	12	
7	6	0,06	0,75	weich	10	
8	7	0,04	0,75	weich	12	
9	8	0,04	0,5	weich	12	
10	9	0,04	0,5	hart	12	
11	10	0,06	0,5	hart	10	
12	11	0,04	0,75	hart	10	
13	12	0,04	0,5	hart	10	

Für die Zielgrößenspalte sind nun Versuchsergebnisse durchzuführen und die Ergebnisse einzutragen.

In der folgenden Auswertedatei `\\Beispieldaten\6s_ANALYSE_DoE_Auswertung.vgx` befinden sich bereits fertige Grafiken. Um die nächsten Schritte nachvollziehen zu können, empfiehlt sich den Menüpunkt „Statistik/Datenauswertung/Modell zurücksetzen“ aufzurufen.



	A	B	C	D	E	F
1	Nr	Lamellensprung	Federstärke	Bürste	Bürstenbreite	Verschleiß
2	1	0,06	0,5 weich		10	1,14
3	2	0,06	0,75 hart		12	1,19
4	3	0,04				
5	4	0,06				
6	5	0,06				
7	6	0,06				
8	7	0,04				
9	8	0,04				
10	9	0,04				
11	10	0,06				
12	11	0,04				
13	12	0,04				

**Leitfaden zur Datenanalyse**

Zielgröße

- Quantitativ - metrisch  
Stetige Daten mit genügend hoher Auflösung
- Diskrete zählbare Merkmale  
2 oder mehr Merkmale

Stetige Daten

- Ein Parameter  
einfache Diagramm-Regression
- Mehrere Parameter  
Multiple Regression oder PLS
- Zählbare Ereignisse  
Transformation mit ArcSin
- Lebensdauer  
Transformation mit ln(y)

Wiederholungen als Mittelwert und Standardabweichung

Buttons: Weiter, Exit, Hilfe

In der Datenauswahl ist als Zielgröße Verschleiß und der Rest als unabhängige Parameter auszuwählen:

**Multiple Regression**

Tabellensite: T1

Datenspalten (Doppelklick): 6  
Nr

Zielgröße: Verschleiß

Unabhängige Parameter: 4  
Lamellenspru  
Federstärke  
Bürste  
Bürstenbreit

Buttons: Daten, Modell, Korrel., Regress., ANOVA, Box Cox, Optima, Anordn., Grafiken, Einstellg.

Auf der Seite Modell kann für Plackett-Burman ein Wechselwirkungsmodell versucht werden.

**Multiple Regression - Modell**

- Linear
- Wechselwirkungen
- Quadratisch mit WW
- Quadratisch ohne WW
- Kubisch mit WW
- Kubisch ohne WW
- x<sup>4</sup>

**Multiple Regression**

Terme	11/6	MR	PLS	Koeffizient	p-val	VIF
Constant				1,058333		
Lamellenspru				0,123333	0,021	1,0
Federstärke				0,275	0,000	1,0
Bürste [hart]				-0,10952	0,041	1,1
Bürstenbreit				-0,12619	0,024	1,1
Lamellenspru*Federstärke				-0,12143	0,035	1,3
Lamellenspru*Bürste [hart]				0,077083	0,083	1,3
Lamellenspru*Bürstenbreit				-0,03958	0,432	1,3
Federstärke*Bürste [hart]				-0,06875	0,137	1,3
Federstärke*Bürstenbreit				0,033333	0,512	1,3
Bürste [hart]*Bürstenbreit				-0,0325	0,562	1,6

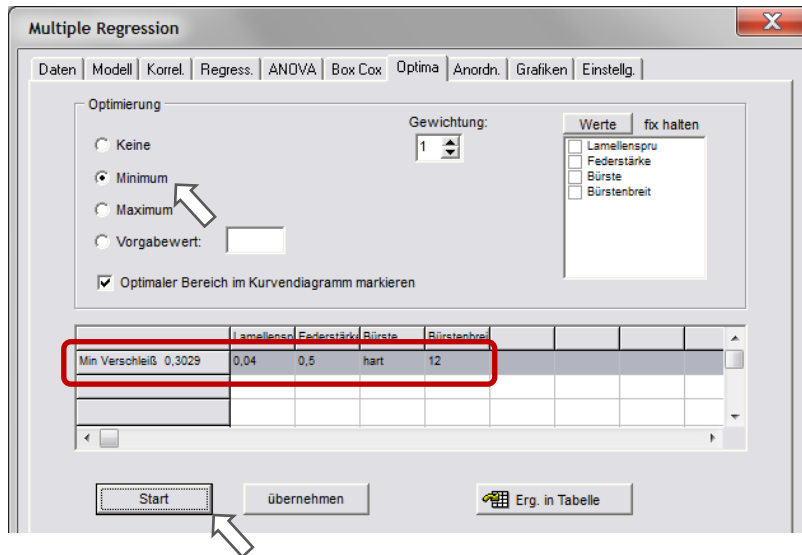
R<sup>2</sup> = 0,942    DF = 6    RMS = 0,1369  
R<sup>2</sup><sub>adj</sub> = 0,894    RMS/ym = 0,13

Buttons: OK, Schließen, Zurück, Weiter, Hilfe

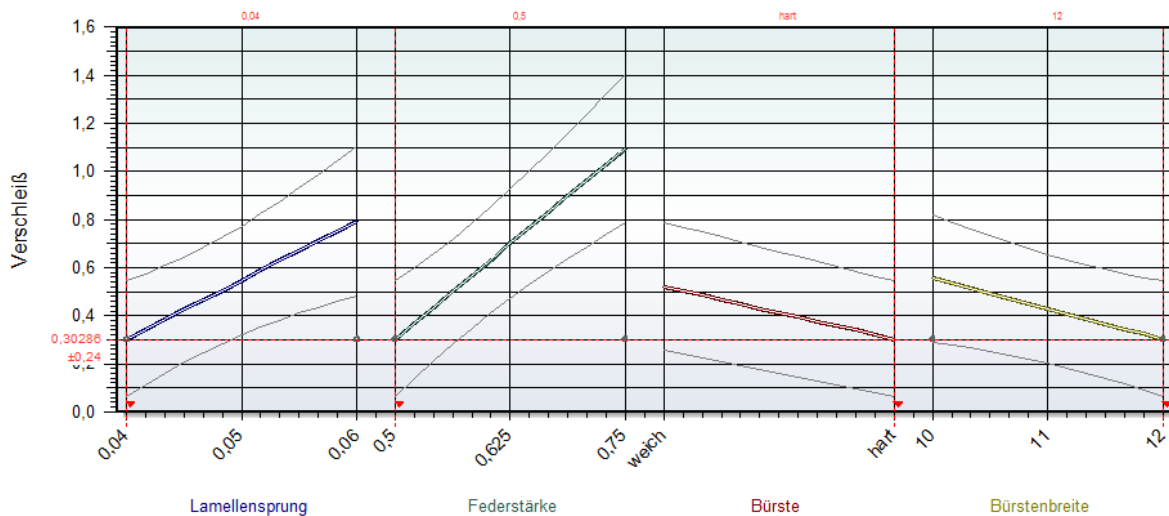
Über die Taste Auto-Stepwise wird das Modell auf die signifikanten Terme reduziert und es bleibt eine Wechselwirkung übrig



Über den Reiter Optima lässt sich über des gefundene Modell eine Einstellung finden, bei der der Verschleiß minimal ist.

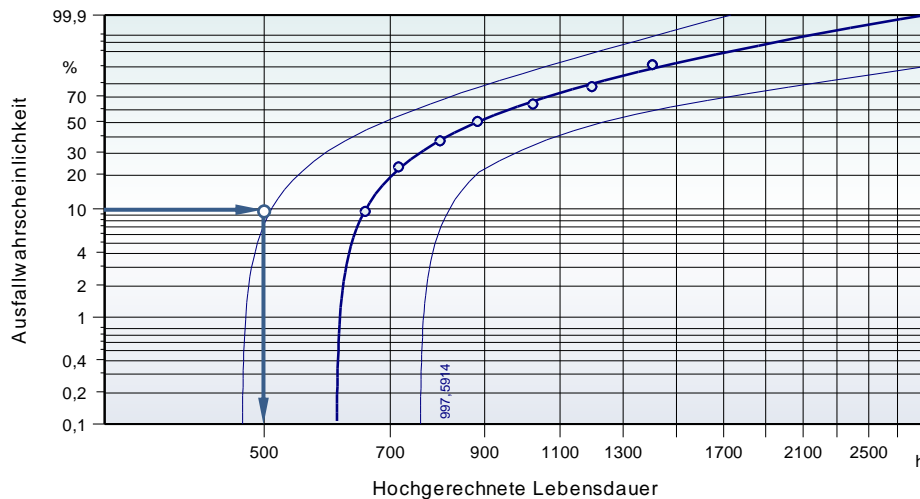


Unter dem sogenannte Kurvendiagramm sind die optimalen Einstellungen durch ein rotes Dreieck gekennzeichnet.



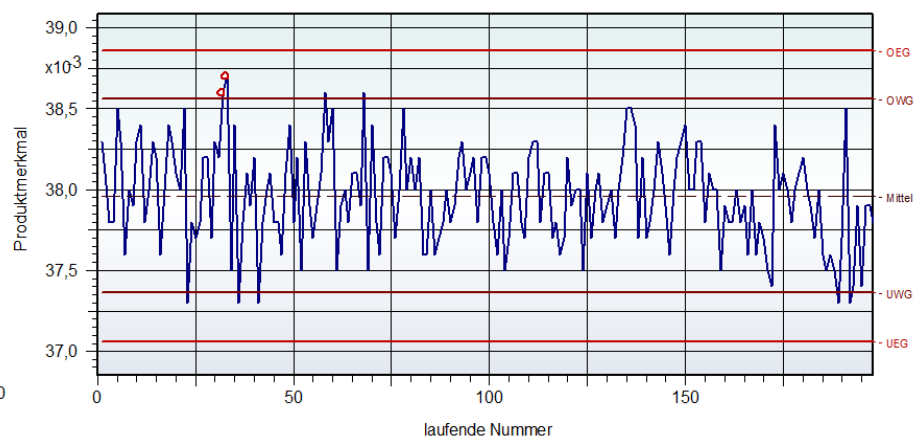
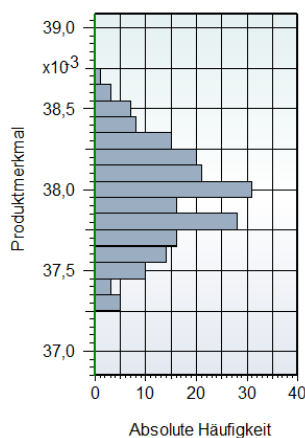
Demnach ist, wie zu erwarten war, ein kleiner Lamellensprung besser. Dies wird durch eine geringere Drehzahl beim Drehen des Kommutators erreicht. Weiterhin sollte eine geringe Federstärke, eine harte Bürste und eine große Bürstenbreite verwendet werden.

In der Control-Phase soll über ein Lebensdauertest überprüft werden, ob die Lastenheftanforderung erfüllt ist. Wie zu Beginn beschrieben, gibt es einen Standard-Lebensdauertest von 500h. Durch die Design-Änderung haben keine der 7 getesteten E-Motoren mehr als 2mm Verschleiß an den Bürsten. Über einen Dreisatz werden die zu erwartenden Laufzeiten hochgerechnet, wann ein Verschleiß von 2mm erreicht würde. Mit diesen hochgerechneten Laufzeiten wird nun ein Weibull-Diagramm erstellt.



Unter Berücksichtigung eines Vertrauensbereiches von 90% wird ein  $t_{10\%}$  von 500h gerade erreicht und die Anforderung ist erfüllt.

In der DoE wurde u.a. der Lamellensprung als bedeutender Einfluss ermittelt. Dieser Parameter ist somit ein „besonderes Merkmal“ und es soll laufend in der Produktion mit einer Regelkarte überwacht werden.



## Anlage

### Ausbildungsstufen von SixSigma

Bei der Ausbildung für Six Sigma gibt es die folgenden wichtigen Titel:



#### **Master Black Belt:**

Erfahrene Experten, die umfangreiche Verbesserungsprojekte mit Six Sigma leiten und die andere Belts methodisch weiterbilden, beraten und auf ihren Projekten coachen.

Voraussetzung: Mehrjährige Tätigkeit als Black Belt und Abschluss mehrerer Six Sigma-Projekte



#### **Black Belt:**

Experten, die umfangreiche Verbesserungsprojekte mit Six Sigma leiten und hierfür zu 100% freigestellt sind. Sie sind vielseitig auf verschiedene Anwendungsgebiete einsetzbar.

Ausbildung ca. 4 Wochen, Abschluss von 2 Projekten Voraussetzung.



#### **Green Belt:**

Spezialisten, die Verbesserungsprojekte mit Six Sigma leiten. In Unternehmen behalten sie meist ihre Linien-Verantwortung (z.B. Gruppenleiter) und optimieren ihren eigenen Verantwortungsbereich.

Ausbildung ca. 2 Wochen, Abschluss eines Projektes Voraussetzung.

## Literatur

### Taschenbuch der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden

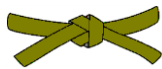
Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis.

Beinhaltet statistische Methoden für Versuchsplanung & Datenanalyse, sowie Zuverlässigkeit & Weibull.

- Statistische Verteilungen und Tests & Mischverteilungen
- Six Sigma Einführung und Zyklen
- Systemanalysen Wirkdiagramm, FMEA, FTA, Matrizen-Methoden
- Shainin- und Taguchi-Methoden
- Versuchsplanung DoE, D-Optimal
- Korrelations- und Regressionsverfahren
- Multivariate Datenauswertungen
- Prozessfähigkeit – Messmittelfähigkeit MSA 4 und VDA 5
- Regelkarten
- Toleranzrechnung und Monte-Carlo-Simulation
- Statistische Hypothesentests
- Weibull und Lebensdaueranalysen
- Stichprobengröße

190 Seiten, Ringbuch

ISBN: 978-3-00-043678-9



#### **Yellow Belt:**

Ein Yellow Belt hat die Six Sigma Philosophie im Überblick. Er ist kein Methodenspezialist, aber unterstützt aktiv in Projekten. Er wirkt als Multiplikator. Ausbildung ca. 3 Tage