

DFSS Design for Six Sigma

Kilian Eisenegger
IWC Schaffhausen, Baumgartenstrasse 15, 8200 Schaffhausen

Zusammenfassung

IWC will mit dem Einsatz von Six Sigma bzw. mit der DFSS Methode die Fehlerrate der Produkte senken und den Optimierungsgrad der Funktionsanforderungen erhöhen. Dazu werden analytische statistische Methoden eingesetzt, welche mathematisch die Funktionsanforderung bewerten. Die Methoden dienen auch dazu, Prozessmessgrößen zu definieren, an denen wir die Kundenanforderung messen können. Ziel ist es auch, die Entwicklungszeiten zu verkürzen oder einzuhalten, indem die Prototyp-Iterationen auf ein Minimum reduziert werden. Je besser die Arbeit in der Konzeptphase ist, desto sicherer sind wir bei der Prototypierung. Die Prozessevaluation entscheidet über die Machbarkeit und Prozessfähigkeit der einzelnen Teile. Mit der Erstmusterprüfung VDA überprüfen wir das Toleranzfeld der Einzelteilzeichnungen und die langfristige Prozessfähigkeit. Das Resultat führt zur Kostensenkung, *Time to Market* Verkürzung und zu zufriedenen Kunden. Im folgenden Text werden zwei Tools von DFSS erläutert. DOE Design of Experiments (Statistische Versuchsplanung) und die Prozessevaluation.

1. Was ist DFSS

DFSS ist eine Abkürzung für Design for Six Sigma. Fast jedes Unternehmen definiert DFSS unterschiedlich, deshalb ist die DFSS Methode nicht vollumfänglich anerkannt oder definiert. Das liegt daran, dass oftmals eine Unternehmung DFSS einführt, um ihr Geschäft, Industrie und Kultur anzupassen. Das DFSS ist also eher eine Annäherung, als eine definierte Methode. (Abbildung 1)

DFSS wird eingesetzt für die Ausgestaltung oder Wiedergestaltung eines Produkts oder einer Dienstleistung. Das zu erwartende Prozess-Sigma-Level für ein DFSS Produkt oder für eine Dienstleistung ist mindestens 4,5 (nicht mehr als ca. 1 Fehler pro 1000 Möglichkeiten), kann jedoch bis 6 Sigma oder sogar höher sein, je nach Produkt. Ein Produkt oder eine Dienstleistung mit einer solchen niedrigen Fehlerquote setzt voraus, dass die Kundenerwartungen und Bedürfnisse (CTQ's) gänzlich verstanden werden müssen, bevor ein Produkt oder eine Dienstleistung vervollständigt und eingeführt werden kann (1).

Eine beliebte Design for Six Sigma Methode ist das **DMADV**. Die fünf Phasen des DMADV sind wie folgt definiert:

- **Definieren** der Projektziele und Kundenwünsche (intern und extern)
- **Messen** und festsetzen von Kundenbedürfnisse und Spezifikationen, Benchmark Konkurrenz und Industrie
- **Analysieren** der Prozessmöglichkeiten um Kundenbedürfnisse zu erreichen
- **Design** (detailliert) erstellen des Prozesses um Kundenbedürfnisse zu erreichen
- **Verify** Sicherstellen der Designleistung und vergewissern, dass die Kundenbedürfnisse erreicht sind

In der IWC verwenden wir DFSS mit folgenden Methoden:

- **Design** VOC to CTQ's, (Voice of Customer, Critical to Quality)
- QFD Quality Function Deployment
- **(Optimize)** OFD Opportunities for Defects
- **Analysieren** und Optimieren, FMEA Failure Methods Effects Analyses
- DoE Design of Experiments, (Versuchsplanung)
- ANOVA Analyses of Variances
- CPM Critical Parameter Management (5)
- Prozessevaluation
- Prozessanalyse
- Rauschfaktoren, Noise Factors (Taguchi)
- **Verify** Qualifikation Homologation
- VDA Erstmusterprüfung

1.1 DFSS Ablauf IWC

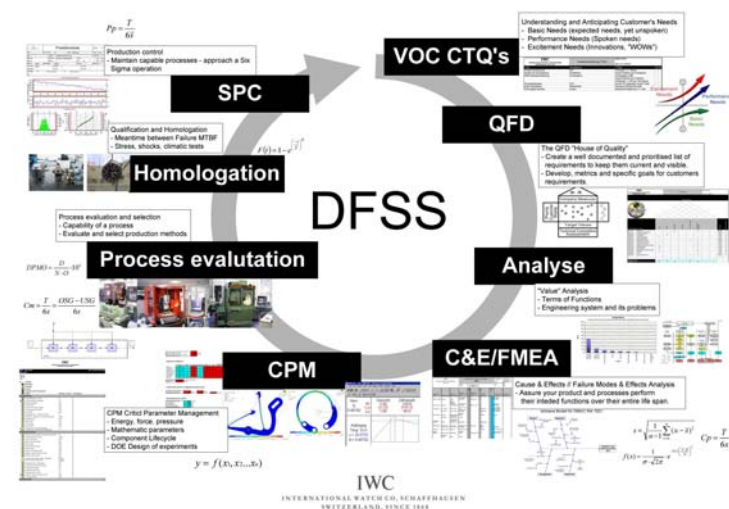


Abbildung 1: Ablaufschema von Design for Six Sigma bei IWC für den Entwicklungsprozess neuer Produkte (2)

2. DOE Design of Experiments

Der Produktlebenszyklus wird dauernd kürzer. Dies bedingt kürzere Entwicklungszeiten. Bei den immer komplexer aufgebauten Produkten hat dies zur Folge, dass nur durch eine systematische Produkt- und Prozessentwicklung, die alle beeinflussenden Parameter/Faktoren frühzeitig ermittelt und beachtet, sowohl der Termin- und Kostenrahmen eingehalten, als auch das angestrebte Qualitätsniveau erreicht werden kann. Die Methode des Design of Experiments basiert auf den Arbeiten des Engländers Ronald Aylmer Fisher, der die Methode bei landwirtschaftlichen Experimenten anwendete. E. P. Box und K. B. Wilson entwickelten die Methode zur Lösung von Optimierungsproblemen weiter, was zur industriellen Anwendung von DoE führte.

Das Ziel der Methode Design of Experiments (DoE, Statistische Versuchsplanung) ist, die benötigten Informationen über diese Parameter mit minimalem Aufwand zu beschaffen, statistisch abzusichern und die Parameter auf optimale Werte einzustellen. Als Parameter oder Faktoren werden beim DoE diejenigen Variablen bezeichnet, die Einfluss auf interessierende Qualitätsmerkmale haben. Sie können quantitativer (z.B. Dicke einer

Feder) oder qualitativer (z.B. unterschiedliche Materialien) Art sein.

1. Problemdefinition

Hier wird das Optimierungskriterium festgelegt und durch eine messbare Grösse definiert. Ferner sind die Randbedingungen des Projekts anzugeben (z.B. Parameter, die nur in gewissen Grenzen variieren können).

2. Problemanalyse

Das Ziel der Problemanalyse ist, alle für das Problem massgeblichen Einflussgrössen zu bestimmen. Diese Phase ist besonders wichtig, da das Nichtbeachten eines wichtigen Parameters dazu führen kann, dass kein Optimum gefunden wird. Die Problemanalyse kann z.B. mit den Methoden Ishikawa-Diagramme, FMEA etc. durchgeführt werden.

3. Parameterreduzierung (Homing-In)

Unter den in der vorhergehenden Phase ermittelten Einflussgrössen müssen die, mit dem grössten Einfluss auf das Problem, ermittelt werden, da eine Berücksichtigung aller Faktoren aus Kosten- und Zeitgründen (hoher Versuchsaufwand) oft nicht möglich ist.

4. Versuchsplanung und -durchführung

In dieser Phase werden Versuchsreihen nach aufgestellten Versuchsplänen ausgeführt. Die Versuchspläne sollen die Quantifizierung des Einflusses der einzelnen Faktoren und deren Wechselwirkungen ermöglichen.

5. Versuchsauswertung

In dieser Phase werden die Effekte der Faktoren und Wechselwirkungen auf die Zielgrössen rechnerisch ermittelt und graphisch dargestellt. Sind alle Faktoren und Zielgrössen quantitative Grössen, so lässt sich oft ein mathematischer Zusammenhang ermitteln, der die zwischen diesen Grössen bestehende Relation in gewissen Grenzen beschreiben kann. Mit Hilfe der Ergebnisse der Versuchsauswertungen können die Zielgrössen je nach Vorgabe (Optimierungsrichtung) eingestellt werden. Mit dem Einsatz von Software, wie Minitab© (3), können die Zielgrössen mit dem *Response Optimizer* (Abbildung 5) dynamisch optimiert werden.

6. Statistischer Nachweis

Abschliessend muss die Gültigkeit, der für die einzelnen Faktoren festgelegten Einstellwerte, statistisch abgesichert werden. Nachzuweisen ist, dass sich die Situation mit den geänderten Einstellungen tatsächlich verbessert hat.

Mit vollfaktoriellen Versuchsplänen können neben den Auswirkungen der einzelnen Einflussgrössen auch alle Wechselwirkungen zwischen den Faktoren untersucht und beurteilt werden. Sind k Faktoren vorhanden, die auf jeweils n Stufen variiert werden können, so sind dazu pro Versuchsreihe n^k Versuche durchzuführen. In der Praxis variieren die qualitätsrelevanten Prozessfaktoren oft auf zwei Stufen, einer unteren und einer oberen (im Versuchsplan symbolisiert durch '-' bzw. '+').

Für die Versuchsauswertung und Darstellung ergänzt man die Planmatrix des Versuchsplans, um eine Matrix der unabhängigen Variablen und um eine Matrix der Zielgrössen, in welche die Versuchsergebnisse einzutragen sind. Bei einem 2^3 -Versuchsplan gibt es $2^3 - 1$ unabhängige Variablen: drei Hauptinflussgrössen, drei 2-Faktor-Wechselwirkungen und eine 3-Faktor-Wechsel-Wirkung (8).

2.1. Drei Faktor DOE für Ref. 3723

Bei der Wippentaste am Gehäuse der Ref. 3723 sind 3 Faktoren für die Kraft massgebend. Über die Wippe wird ein synchron laufender Minutenzeiger gestoppt. (Ratrapant Mechanismus)

Faktor 1: Winkel beim Lagerrohr

Faktor 2: Federbreite

Faktor 3: mit ohne Halteplatte

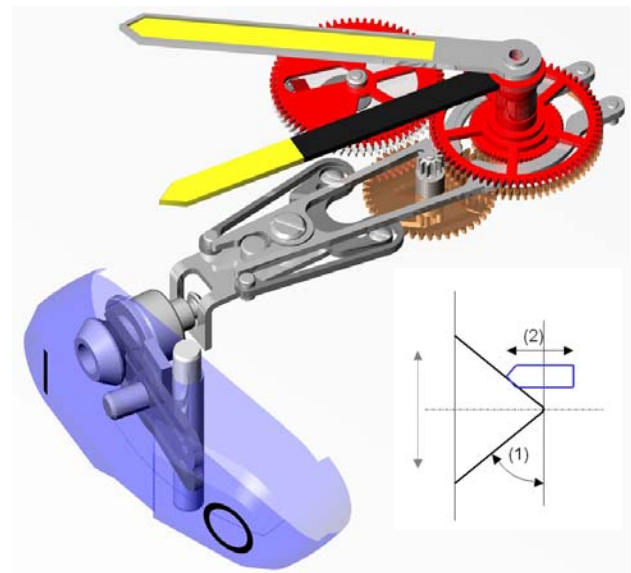


Abbildung 2: Zangensystem Ref.3723

Bei 3 Faktoren gibt es 8 Kombinationsmöglichkeiten, welche montiert und gemessen werden müssen.

C5	C6	C7-T	C8	C9	C10
Gleitwinkel	Federbreite	Halteplatte		Resultate S [N]	Resultate Z [N]
40	0.62	ohne		6.28	4.62
45	0.62	ohne		9.85	6.31
40	0.67	ohne		8.42	5.71
45	0.67	ohne		11.11	8.04
40	0.62	mit		6.21	6.91
45	0.62	mit		10.04	8.40
40	0.67	mit		8.27	8.34
45	0.67	mit		11.33	8.87

Abbildung 3 : Matrix mit den Eingabeparameter für die DOE in Minitab

Die Software berechnet die Haupteinflüsse der einzelnen Faktoren. Wir erkennen dass der Winkel am Führungsrohr der grösste Einfluss auf die Kraft auf der Wippe ausübt. Der Einfluss der Halteplatte (Schraube) hat beim Ziehen einen grossen Einfluss

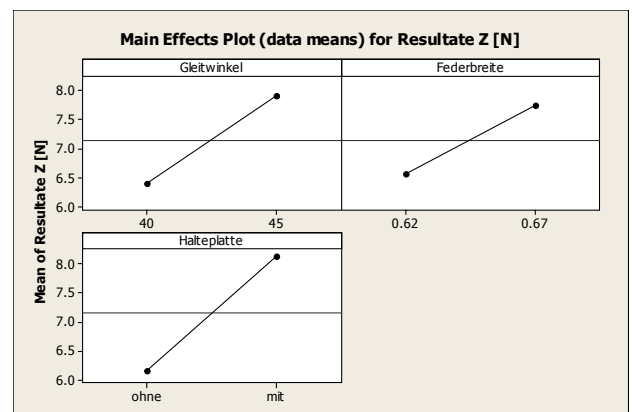


Abbildung 4: Einfluss der Faktoren auf das Resultat

Mit dem *Response Optimizer* können die Faktor-Parameter dynamisch verändert werden. Hier können sämtliche Zwischenergebnisse simuliert werden. Bsp: Wenn die Kraft bei 8.5 N liegen soll, muss der Winkel auf 41.5° angepasst werden.

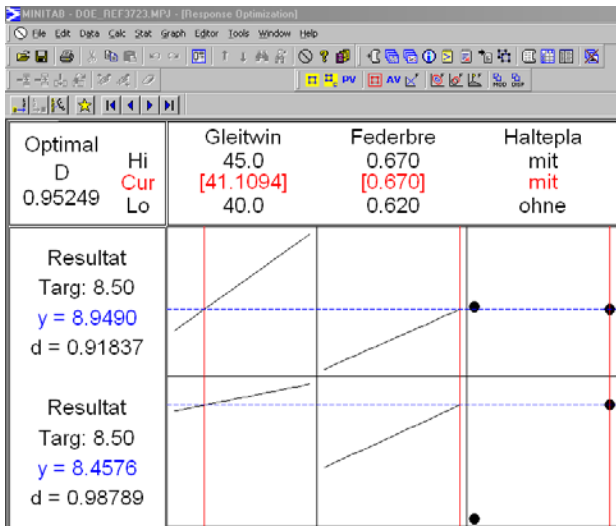


Abbildung 5: Response Optimizer für die Online Auswertung der Faktoren. Simultane Darstellung beim Stossen und Ziehen.

Der Interaktionsplot zeigt die gegenseitigen Einflüsse unter den verschiedenen Faktoren. In diesem Beispiel sind die Interaktionseinflüsse vernachlässigbar.

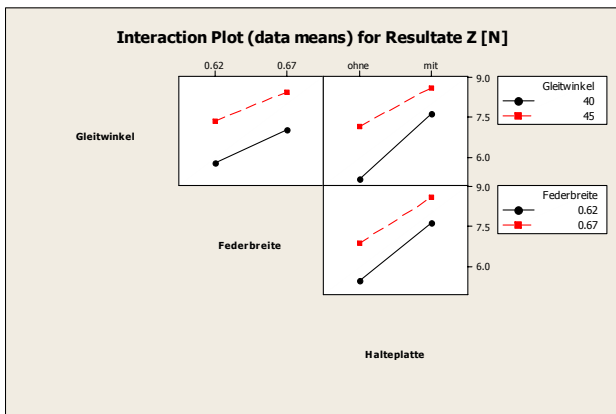


Abbildung 6: Interaktion zwischen den Faktoren

Wir haben die Wippe auf 8.5N über einen asymmetrischen Winkel optimiert, beim Ziehen und Drücken ist somit die gleiche Kraft vorhanden. Ohne DoE wäre eine endlose Versuchsreihe nötig gewesen.

3. Prozessevaluation

Bei der Prozessevaluation entscheiden wir, welche Prozesse für die Herstellung eines bestimmten Uhrenteils verwendet werden. Innerhalb des Prozesses überprüfen wir mit der Prozessfähigkeit, ob die Teile gemäss Toleranzvorgaben hergestellt werden können. Die Maschinenfähigkeit C_m muss dazu bekannt sein.

- Prüfen der Prozessfähigkeit auf (Abbildung 7)
 - Komponenten, OFD's (Opportunities for defects)
 - Zeichnungen, Toleranzen
- Prüfen der Messfähigkeit für die Kontrolle (C_{pm} und Gage R&R)
- Prüfen der Preisauswertung, wenn man verschiedene Lieferanten für den selben Prozess hat
- Prüfen des Optimierungsprozesses => Preis- und Qualitätsverbesserungen
- Kenntnisse der Rauschfaktoren Z in der Produktion (Taguchi)

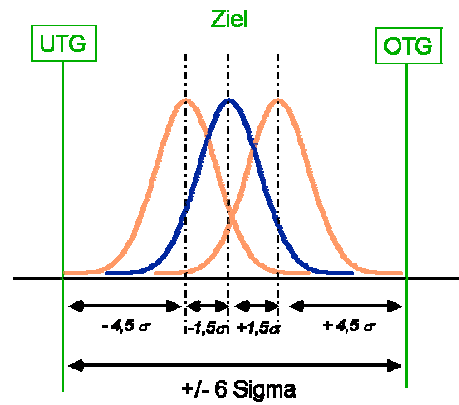


Abbildung 7: Mittelwertschwankung eines Prozesses über eine längere Zeitdauer

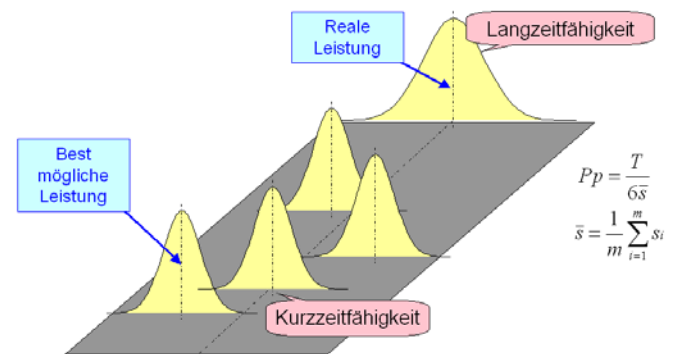


Abbildung 8: Kurzzeitfähigkeit und Langzeitfähigkeit eines Prozesses mit $\pm 1.5\sigma$ Mittelwertschwankung

Bei der Prozessfähigkeit der Einzelteile sind C_p Werte ≥ 2.00 anzustreben.

Bei einem C_p Wert von 2.0 ist der P_{pk} Wert 1.5. Bei Langzeitfähigkeit schwankt der Mittelwert um $\pm 1.5\sigma$ (Abbildung 8)

Beispiel Positionstoleranz ± 0.006 mm
Damit die Langzeitfähigkeit bei $C_p=2.0$ und P_{pk} von 1.5 gewährleistet ist, muss die Maschine eine C_m Fähigkeit von 2.0 bei ± 0.004 mm vorweisen. Der C_{mk} darf bei $\pm 1.5\sigma$ Mittelwertschwankung nicht unter 1.5 liegen (7).

$$C_p = \frac{T}{6s} = \frac{OTG - UTG}{6s} \quad (1)$$

$$T = C_p \cdot 6s \quad (2)$$

Bei $C_p=2$ ist $T = 12s$

Wird die Langzeitfähigkeit berücksichtigt wird C_{mk} zu $P_{pk} = 1.5$

$$C_{mk} = \frac{(12-3)}{6} = 1.5 \quad (3)$$

Damit man die Maschinenfähigkeit C_m und C_{mk} ermitteln kann, müssen 30 Teile nacheinander gefertigt und ausgemessen werden. Das Toleranzfeld der Maschine ergibt sich bei einem theoretischen Wert $C_m=2 \Rightarrow T=2 \cdot 6\sigma$. Dieses wiederum muss 1.5 mal besser sein als die Plantoleranz. Bei der Messfähigkeit muss berücksichtigt werden, dass sie 10 mal genauer ist als das Toleranzfeld. In unserem Beispiel 0.008 mm / 10 = 0.0008 mm (6).

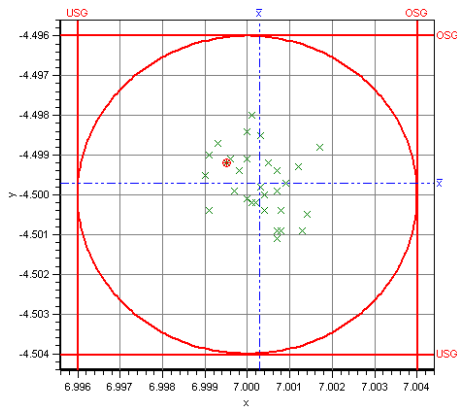


Abbildung 9: Positionsmessung von 30 gleichen Teilen (gefertigt auf einer Almac) in der Kurzzeitfähigkeit (QS-Stat)

Merkm.Nr.	Merkm.Bez.	\bar{x}	s	Index	Index	
1	Position 1			$P_{0.5}$	$P_{1.5}$... 100
1	x	4.99896	0.00050895	C_{pk} 2.62	C_{pk} 1.94	😊
1	y	7.49868	0.00062150	C_{pk} 2.15	C_{pk} 1.44	😞

Abbildung 10: Auswertung der Prozessfähigkeit Cp und Mittelwertschwankung Cpk (QS-Stat)

Für die Auswertung der Messwerte kann man Excel© oder spezielle Statistiksoftware wie QS-Stat© (4) (Abbildung 10) verwenden. Die Auswertung einer Positionstoleranz kann auch grafisch dargestellt werden. (Abbildung 9)

Teilgruppe	Spanende Bearbeitung																Folgebild		
	1.0x2	1.0x5	1.0x2	1.0x4	1.0x5	1.0x6	1.0x1	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2	1.0x2			
Plattinen					X	X	X	X									X	X	7
Brücken					X	X	X	X										X	6
Federhaus	X		X		X	X	X	X										X	5
Federhül / Federhül					X	X	X	X	X	X									6
Habel / Finger					X	X	X	X											6
Räder	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	11
Triebe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	9
Wellen, Röhre	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7
Spezielle Stabdiele					X	X	X	X										X	5
Buchsen, Stifte	X																		1
Steine																			0
Schrauben	X																		2
Kugellager																			0
Hammerung																			0
Uhrhül / Spirale																			0
Stoßsicherung																		X	0
Buchsen, Stifte	X							X										X	3
Schrauben	X																	X	2
Kronen	X	X															X	X	5
Drucker	X	X															X	X	3
Räder (Kronen)	X	X						X									X	X	4
Dichtungsringe		X																	1
Teilgruppen pro Prozess	50%	9%	27%	14%	32%	9%	23%	27%	27%	19%	23%	9%	9%	14%	36%	14%	19%	19%	0

Abbildung 11: QFD Matrix der Teilefamilien und Prozesse zu deren Herstellung, Prozessfähigkeit und Toleranzfeld

Bei der Herstellung der Räder werden bis zu 11 verschiedene Prozesse benötigt. Die Anzahl der Prozesse steht im Zusammenhang mit der Durchlaufzeit und Komplexität (OFD Opportunities for Defects) der Teile. (Abbildung 11)

Die Prozessevaluation hilft uns vorgängig die Toleranzfelder der Einzelteile zu prüfen und die Machbarkeit bzw. Prozessfähigkeit abzuschätzen. Bei Teilen mit einer grossen Anzahl von Prozessen muss zudem die Funktion soweit wie möglich vorher simuliert oder berechnet worden sein. FEM bei Federn; Zahnprofile bei Rädern etc.

Die Matrixdarstellung gibt einen Gesamtüberblick aller verwendeten Prozesse und deren Fähigkeiten. Sie dient als Hilfsmittel für die Industrialisierung und Beschaffung und zeigt die Kompetenz vertikalierter Prozesse.

4. Resultate

IWC hat mit DFSS im 2003 gestartet. Pilotprojekt war das Werk des Minuteschleppzeigers. Das Produkt ist 2004 an der SIHH

erfolgreich vorgestellt worden. Die Entwicklung und Industrialisierung inkl. Homologation dauerte 13 Monate.

5. Quellenangaben

1. What is DFSS, Kern Simon www.isixsigma.com
2. DFSS Roadmap, C2C Solutions Inc www.c2c-solutions.com
3. Minitab Inc. Statistik Software www.minitab.com
4. QS-Stat SPC Software www.q-das.de
5. DFSS In technology and product development, C.M.Creveling, J.L.Slutsky, D.Artis
6. Almac Cm, Cmk Messungen Manufacture Complication, F.Gerz Six Sigma Blackbelt ASQ
7. DFSS Handbuch, K.Eisenegger Six Sigma Blackbelt ASQ
8. DoE, Prof. Dr.-Ing. G. Redeker, Institut für Qualitätssicherung - Universität Hannover