

# Gestalten robuster und zuverlässiger Produkte mit der SMART-Methode

Dipl.-Ing. Stefan Kemmler  
*Institut für Maschinenelemente IMA;*  
*Universität Stuttgart*

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche  
*Institut für Maschinenelemente IMA;*  
*Universität Stuttgart*

## Abstract

Product requirements grow with customer requirements. Thus, systems become more complex, but the demands for quality, reliability, safety and energy efficiency increase. In order to meet these requirements, the priority must be on the designing of robust and reliable products and their Design Parameters (DP) in the Product Development Process (PDP). SMART (Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing) is a method for the development of these robust and reliable products. In this paper, the holistic approach is shown by an elementary machine component. Therefore, the focus lies on the reliability prognosis and definition in the early state of the PDP.

*Keywords: Robust Design, Taguchi Method, Axiomatic Design, Product Development Process (PDP)*

## 1 Einleitung

Eine Methode zum Gestalten von robusten und zuverlässigen Produkten ist die SMART-Methode. Sie vereint Elemente aus der Robust Design Methodik,

wie Axiomatic Design (AD) [1] und die Taguchi Methode (TM) [2], zu einer ganzheitlichen Systemmethode, indem diese klassischen und etablierten Methoden insbesondere um die Zuverlässigkeitsaspekte ergänzt und erweitert werden.

Ein robustes Design liegt vor, wenn die Streuung des Design Parameters (DP) möglichst keinen Einfluss auf seine Funktionsanforderung (FR) hat. Der DP unterliegt einer konstanten Abweichung  $\Delta DP$ , vergleiche Bild 1. Im Kontrast dazu erfährt die Streuung der FR eine signifikante Änderung zwischen den Einstellstufen  $DP_{1-}$  und  $DP_{1+}$ . Die Systemantwort  $FR(DP_{1+})$  weist eine relativ geringe Streuung auf, während  $FR(DP_{1-})$  eine erheblichere Abweichung aufweist. Auslöser dieses Verhaltens bilden nicht beeinflussbare Störgrößen aus der Umwelt oder der Produktion, denen das Produkt ausgesetzt ist.

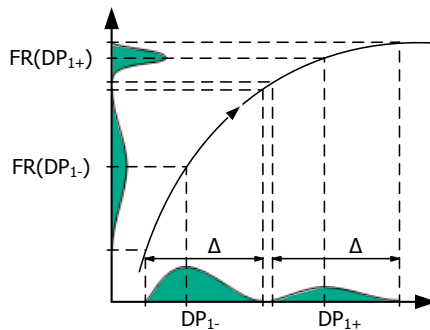


Bild 1: Robust Design einer Funktionsanforderungs-Verteilung für zwei Design-Varianten nach [2]

In diesem Paper soll die Vorgehensweise von SMART an einem elementaren Maschinenelement, der Druckfeder, im Konzept des Einlassventils eines Verbrennungsmotors vorgestellt werden. Dabei liegt der Fokus auf der Zuverlässigkeitsprognose und -bestimmung in der frühen Phase des PEP sowie die Empfehlung zur Anwendung der geeigneten Methode für komplexere Systeme, wie beispielsweise die Taguchi-Optimierung oder die Robust Design Optimization (RDO).

## 2 SMART - Robust Design und Zuverlässigkeit

SMART orientiert sich nach den vier Phasen des PEP (Planung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) nach der VDI Richtlinie 2221 [5]. Auf dieser Grundlage sind die drei Phasen (System Design (SD), Parameter Design (PD) und

Toleranz Design (TD)) nach Taguchi [3] aufgebaut und entsprechend integriert, vergleiche Bild 2. Besteht zu Beginn des PEP kein Entwurf, kann zur Lösungsfindung in die SD Phase eingestiegen werden. Hierbei wird die AD Methode angewendet, um die Komplexität des Entwurfs zu beschreiben. Ziel ist es in dieser Phase ein Konzept zu entwickeln, welches eine geringe Komplexität seiner Funktion und deren DP aufweist. Als DPs mit einer hohen Komplexität werden DPs bezeichnet, die mehrere FRs erfüllen [3].

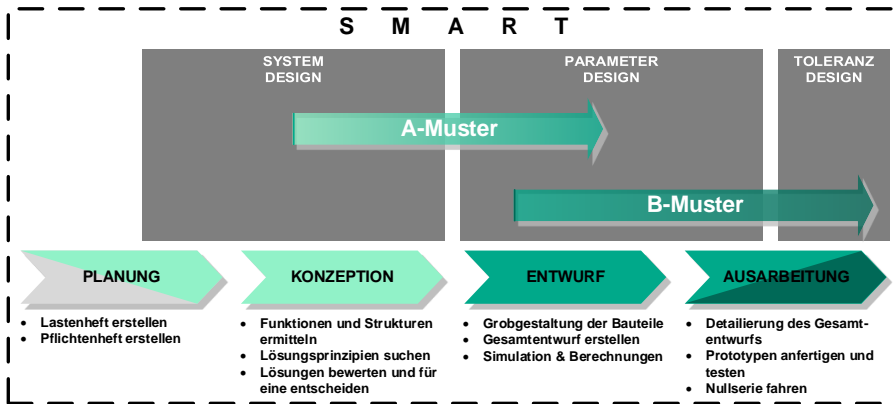


Bild 2: SMART - Einordnung in den Produktentwicklungsprozess (PEP) [4]

Im späteren PEP (Entwurf und Ausarbeitungsphase) existiert bereits ein Entwurf. Dieser kann in seiner Grundstruktur zwar nicht mehr geändert werden, aber hinsichtlich seiner Komplexität mit Hilfe von AD untersucht und gegebenenfalls Änderungen für ein robustes Design ermittelt werden. AD dient hier nicht nur zur Beschreibung der Komplexität eines Entwurfes, sondern auch als Systemanalyse. Zudem kann mit AD in diesem Entwicklungsschritt das P-Diagramm nach Taguchi [2] erstellt werden. SMART ermöglicht damit sowohl den Einstieg in den ersten Phasen (Planungs- und Konzeptphase – SD) als auch in den späteren Phasen (Entwurf und Ausarbeitungsphase – PD und TD). Falls die robusten DPs bestimmt sind, kann auch direkt in die TD Phase eingestiegen werden, vergleiche Bild 3.

Ein weiterer Aspekt bei der Vorgehensweise von SMART ist die prognostizierte Zuverlässigkeit am Ende der Phasen PD und TD. An diesen Stellen können erste Prognosen zum Ausfallverhalten des Designs getroffen werden. Nach der PD Phase sind die Parameter hinsichtlich der Robustheit des Designs optimiert und festgelegt. Hier können durch Kombination der verschiedenen Para-

meter Zufallsausfälle im Sinne von Funktionsausfällen, Fehlbedienungen, Missbräuchen oder Wechselwirkungen einzelner Komponenten [6], bestimmt und simuliert werden. Zudem können in dieser frühen Phase Ermüdungsausfälle anhand eines simulativen oder realen Bestätigungsexperiments ermittelt werden. Je nach Validierungsgrad des Simulationsmodells kann die Zuverlässigkeitsprognose um deren Vertrauensbereiche erweitert und frühzeitig eine Empfehlung zur Versuchsstrategie gegeben werden. Dies wird durch das notwendige Bestätigungsexperiment der robusten DPs unterstützt. Bei diesem Experiment kann anhand etablierter Betriebsfestigkeitsanalysen, wie sie die FKM-Richtlinie oder Simulationssoftware beinhalten, beispielsweise ANSYS nCode Design Life, die Lebensdauer bestimmt werden. Dabei sollte diese erste Prognose als nominelle Lebensdauer gesehen werden und der geforderten Zuverlässigkeit entsprechen. Nachdem der robuste Designraum bestimmt ist, können Szenarien durchgeführt werden, die die Parameter-Streuung von äußeren Störgrößen auf innere Kontrollgrößen überführen. Dies ermöglicht dem Entwickler in der frühen Musterphase noch einschlägige Eingriffe im Design vorzunehmen. Die detailliertere Zuverlässigkeitsbestimmung in der frühen Phase des PEP kann zum Ende des TD vorgenommen werden. Zu diesem Musterstand sind die nötigen Toleranzen unter Berücksichtigung der Herstellungstoleranzen in Abhängigkeit des Kostenaufwands bekannt.

### 3 Anwendungsbeispiel „Druckfeder“

Der Gesamtablauf der SMART-Methode wird im Folgenden anhand einer Druckfeder, wie sie beispielsweise in einem Einlassventil eines Verbrennungsmotors, vergleiche Bild 4, zum Einsatz kommt, schrittweise erläutert. Alle Daten basieren auf rein fiktiven Größen und haben keine praxisbezogene Relevanz. Sie dienen rein der Veranschaulichung der Vorgehensweise. Als Ausgangspunkt wird angenommen, dass noch kein Entwurf vorhanden ist und somit die komplette SD Phase nach SMART durchlaufen wird. Bei einem Viertaktmotor findet der Ladungswechsel durch Öffnen und Schließen der Lufteinlass- beziehungsweise Abgasauslasskanäle statt. Das Ventil wird über einen Stößel durch die Nockenwelle geöffnet und durch eine Schraubenfeder wieder geschlossen [1]. Grundlegende Formeln für die nachfolgende Untersuchung der Schraubendruckfeder sind dabei die Federkraft  $F$  und die Schubspannung  $\tau$

$$F = R \cdot s = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_m^3 \cdot n_f} \cdot s \qquad \tau = \frac{G \cdot d}{\pi \cdot D_m^3 \cdot n_f} \cdot s$$

mit Schubmodul  $G$  [N/mm<sup>2</sup>], Drahtdurchmesser  $d$  [mm], mittlerer Windungsdurchmesser  $D_m$  [mm], federnde Windungen  $n_f$  [-] und Federweg  $s$  [mm].



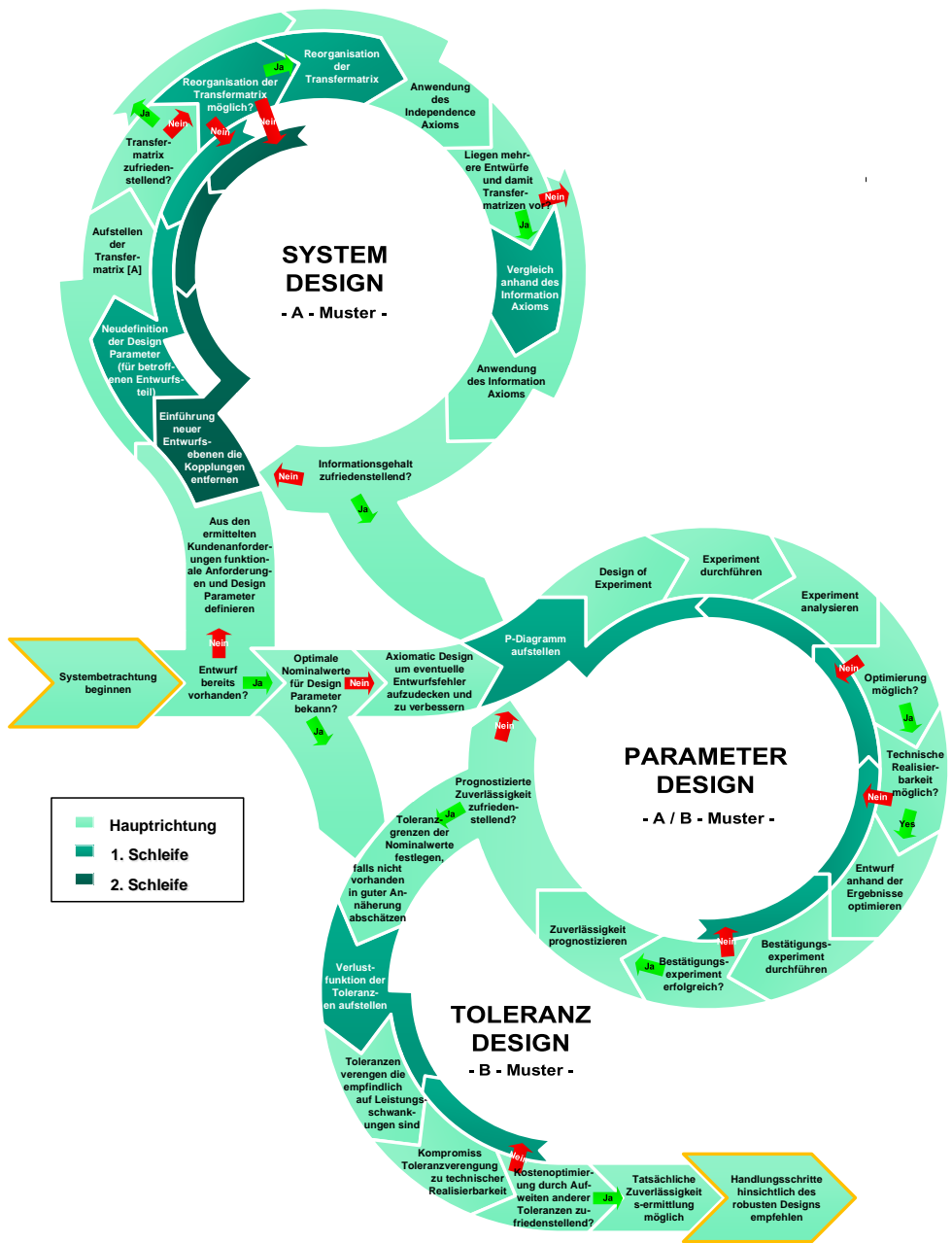


Bild 3: SMART - Gesamtübersicht [4]

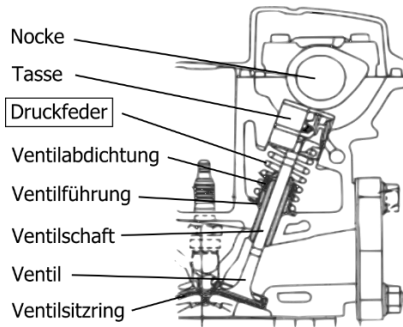


Bild 4: Tassenstößelventiltrieb nach [1]

### 3.1 SMART – System Design

Zu Beginn der SD Phase werden die Kundenanforderungen (CRs) im Stile eines Lastenheftes definiert. Im Fall der Ventildfeder wird eine konstante Rückstellkraft gewünscht, die bei einem definierten Federweg erbracht wird. Die Federkraft sollte möglichst wenig streuen, um eine robuste Arbeitsweise des Ventils und damit des Motors zu gewährleisten. Eine zu große Federkraft könnte den Ventilteller beschädigen, wohingegen eine zu geringe Federkraft den Arbeitsraum nicht korrekt abdichten würde. Außerdem sollte ein Einsatz sowohl beim Starten des Motors bei tieferen Temperaturen (-40 °C) als auch im Höchstleistungsbetrieb des Motors bezüglich der örtlichen Begebenheit des Ventilsitzes (250 °C) gewährleistet sein. Die Feder sollte zudem unabhängig von den Materialeigenschaften wiederholbar gefertigt werden können. Die zulässigen Spannungen dürfen nicht überschritten werden, um einen Federbruch zu vermeiden. Zuletzt sollte durch den Platzmangel im Verbrennungsmotor ein definiertes Bauvolumen nicht überschritten werden.

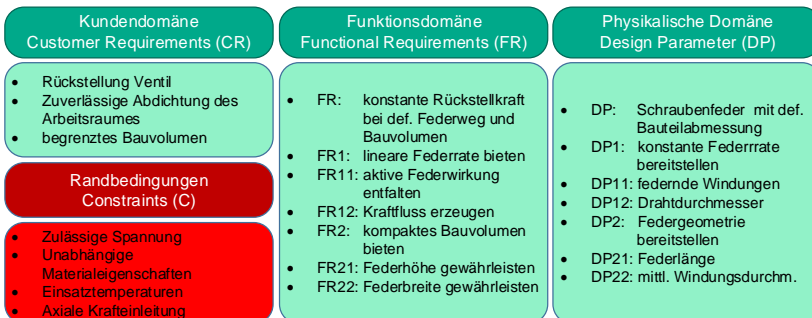


Bild 5: Die drei Domänen der Druckfeder nach AD

Aus diesen CRs können FRs, DPs und Randbedingungen (C) des Entwurfs abgeleitet werden, vergleiche Bild 5. Jede Vorgängerdomäne beschreibt dabei Anforderungen, die von der Nachfolgedomäne erfüllt werden. Mit Hilfe der „ZigZag-Methode“ nach Suh [2] kann der Bezug zwischen den Domänen hergestellt werden. Dabei definieren die FRs die DPs in der gleichen Hierarchieebene. Die Eigenschaften dieser DPs definieren wiederum die FRs der untergeordneten Ebene. Diese Zuordnung kann mit Hilfe einer Design-Matrix A veranschaulicht werden, vergleiche Bild 6.

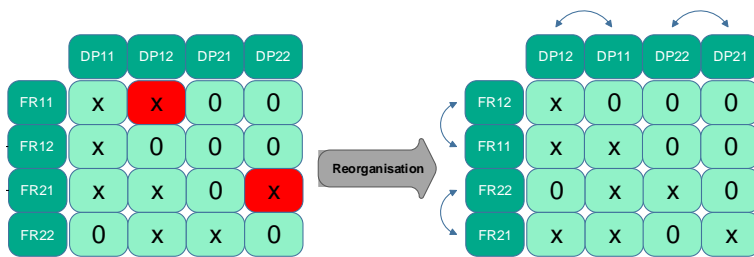


Bild 6: Design-Matrix A und deren Reorganisation

AD unterscheidet sich zwischen ungekoppeltem, entkoppeltem und gekoppeltem Entwurf. Im Fall der Schraubenfeder ergibt sich zunächst eine gekoppelte Designmatrix. Das Independence Axiom gibt vor, dass nur ein ungekoppeltes oder ein entkoppeltes Design eine optimale beziehungsweise akzeptable Lösung bildet. Eine Reorganisation der Matrix, durch Vertauschen der FR/DP-Paarungen, führt zu einem entkoppelten und damit akzeptablen Design. Für die Entkopplung der Designmatrix stehen neben der hier durchgeführten Reorganisation mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, auf die hier nicht näher eingegangen wird [11]. Die Berechnung des Informationsaxioms ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da ein Entwurf vorliegt, dem keine Varianten gegenüber gestellt werden können. Die SD Phase ist an dieser Stelle abgeschlossen und es kann in die PD Phase vorangeschritten werden.

### 3.2 SMART – Parameter Design

Mit einem zufriedenstellenden Design und den gewonnenen Erkenntnissen aus dem AD wird im ersten Schritt der PD Phase ein P-Diagramm nach Taguchi erstellt, vergleiche Bild 7. Das P-Diagramm veranschaulicht dabei die Druckfeder als Modell, welches die Federkraft  $F$  in Abhängigkeit der unterschiedlichen Eingangsparameter darstellt. Eingangsgröße bildet in diesem Fall der konstante Federweg  $s$ . Die Steuergrößen beziehungsweise DPs wurden bereits im SD er-

mittelt und werden durch den Drahtdurchmesser  $d$ , den mittleren Windungsdurchmesser  $D_m$  und die federnde Windungszahl  $n_f$  definiert. Durch ihre Variation kann eine optimale Produktwirkung erzielt werden. Die Materialeigenschaften repräsentiert durch das Schubmodul  $G$  sowie die Umgebungstemperatur  $T$  bilden Störgrößen des Systems.

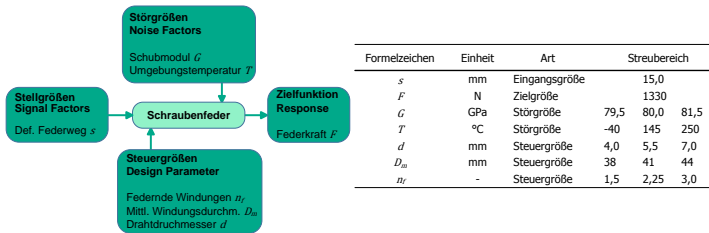


Bild 7: P-Diagramm und Einstellstufen der Druckfeder

Um optimale Werte für die DPs eines robusten Designs zu erhalten, wird ein DoE in Form eines Taguchi-Versuchsplanes durchgeführt. Der Versuchsplan besteht aus einem inneren Feld, welches die Variation der DPs beinhaltet und einem äußeren Feld, indem die Störgrößen variiert werden [3]. Aufgrund der geringen Anzahl an DPs und Störgrößen, wird sowohl das innere als auch das äußere Feld vollfaktoriell ausgeführt. Ein großer Vorteil von Taguchi-Versuchsplänen ist, dass äußeres und inneres Feld unabhängig voneinander gestaltet werden können. Somit kann gegebenenfalls der Simulationsaufwand auf ein nötiges Maß reduziert werden. Die Auswertung des Versuchsplanes beruht auf der Tatsache, dass die Einstellung auf den Sollwert einfacher zu erreichen ist, als die Minimierung der Streuung. Yang [7] beschreibt dazu geeignete Methoden. Für das Zielwertproblem werden als erstes die Einstellungen der signifikanten Faktoren ausgewählt, die das  $S/N$ -Verhältnis maximieren und folglich die Streuung minimieren. Damit die Zielfunktion den gewünschten Sollwert im Mittel erreicht, werden die signifikanten Faktoren ausgewählt und entsprechend eingestellt. Die Einstellungen der restlichen Faktoren erfolgt nach wirtschaftlichen Aspekten. Als Hilfsmittel stehen Methoden der statistischen Versuchsplanung wie beispielsweise die Mittelwertanalyse (ANOM) und die Varianzanalyse (ANOVA) zur Verfügung [12]. Abschließend wird ein Bestätigungsexperiment mit den optimalen Faktorstufen durchgeführt. Zum Abschluss der PD Phase kann eine erste Zuverlässigkeitsprognose ermittelt werden. An dieser Stelle wird die Berechnung der Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie durchgeführt. Ziel ist dabei eine dauerfeste Auslegung ( $LW > 2 \cdot 10^6$ ) der Feder. Das definierte Design erträgt allerdings nur eine Lastwechselspielzahl von 151.000 LW ( $B_{2,5}$ ) bis zum Anriss und ist somit nicht zuverlässig. Es muss ein neues Design ausgewählt werden, welches einen Kompromiss aus Robustheit und Zielwert



berücksichtigt. Nach erneuter Überprüfung der Lebensdauer mit den neu gefundenen Faktorstufen wird die Feder als dauerhaft eingestuft. Mit den optimierten DPs des Produkts kann nun in die TD Phase übergegangen werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der PD Phase

Nr.	$F$ [N]	$S/N$ [dB]	$D_m$ [mm]	$d$ [mm]	$n_f$ [-]	LW [-]
1	1280	37,41	38,0	5,5	1,5	151.000
2	1358	37,27	44,0	7,0	3,0	dauerfest

Alternativ stehen in dieser Phase des PEP nur qualitative Zuverlässigkeitsmethoden, wie FMEA, FTA, ETA oder HAZOP zur Verfügung [9], da in dieser Phase keine Ausfalldaten aus Testläufen vorhanden sind.

### 3.3 SMART – Toleranz Design

Quality Loss Function (QLF)

Designpunkt	Toleranzen			Mittelwert	Standardabweichung	Verlust
	$D_m$ [mm]	$n_f$ [-]	$d$ [mm]	$\mu$ [N]	$\sigma$ [-]	$L(\mu)$ [€/Stück.]
Design 2	$38 \pm 0,3$	$3 \pm 0,2$	$7 \pm 0,05$	1356	25,38	0,14
Design 3	$38 \pm 0,3$	$3 \pm 0,1$	$7 \pm 0,05$	1356	16,88	0,12
Nominal	-	-	-	1330	30,00	0,06

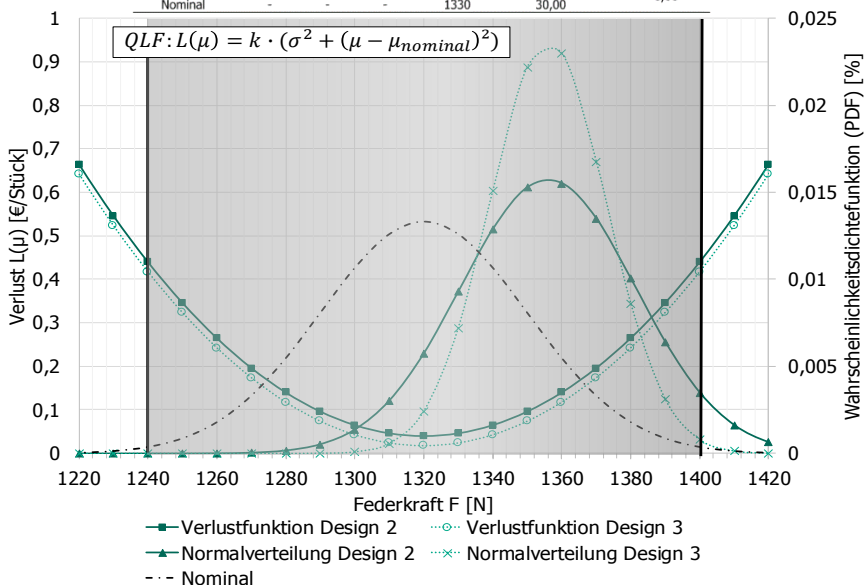


Bild 8: Ergebnisse zum Toleranz Design der Druckfeder

---

Im ersten Schritt wird die Quality Loss Function (QLF) definiert und welchen Kostenpunkt diese mit sich bringt. Im Beispiel der Druckfeder gilt eine Überschreitung der Toleranzgrenzen als Totalausfall und kostet den Hersteller 0,40 €/Stück. Demnach kann anhand der QLF  $L(\mu)$  der Proportionalitätsfaktor  $k$  berechnet werden. Für einen beherrschten Prozess soll ein Prozessfähigkeitsindex  $c_{pk} = 1,33$  (4σ) angenommen werden. Damit lassen sich die Toleranzgrenzen der robusten Einstellstufen des Designs 2 bestimmen, vergleiche Bild 8. Die dargestellte Dichtefunktion (PDF) des Designs 2 zeigt eine deutliche Verbesserung der Streuung im Gegensatz zur  $PDF_{nominal}$ , allerdings auch eine deutliche Verschiebung des Mittelwerts und somit eine um 5 % außerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs liegende Zielfunktion. Im zweiten Schritt erfolgt eine Nachbesserung der Robustheitskriterien des signifikantesten Faktor für das S/N-Verhältnis  $n_f$  um  $\pm 0,1$ . Anhand eines Bestätigungsexperiments erreicht das neue Design 3 die festgelegte Spezifikation und zudem einen geringeren Verlust als Design 2, vergleiche  $QLF_{Design3}$ . Die Rückführung auf den Zielwert ist mit einem erhöhten Fertigungsaufwand verbunden und folglich in diesem Fall nicht zu empfehlen. Abschließend mit der TD Phase und somit mit SMART wird je nach Kapazität und gegebenem Vorwissen die Prüfstrategie zur Ermittlung der Lebensdauer sowie der Zuverlässigkeit bestimmt.

## 4 Diskussion

Um robuste Produkte zu gestalten, wird nach der TM die Streuung um den Sollwert minimiert und erst anschließend, je nach Fertigungsaufwand, die Einstellung auf den Zielwert durchgeführt [7]. Nachteile sieht unter anderem Montgomery [10] in der umstrittenen Auswertung anhand des S/N Indikators, der mangelnden statistischen Effizienz sowie die Vermengung von Haupt- und Wechselwirkungen bei dem Einsatz von Teilfaktorplänen. Allerdings zeigt sich der Vorteil von Taguchi-Versuchsplänen im reduzierten Versuchs- und Simulationsaufwand. Zudem kann durch die individuelle Auswahl von innerem und äußerem Feld einerseits die Vermengung reduziert und andererseits ein Mehraufwand erspart werden, was für den Einsatz in der Praxis einen entscheidenden Vorteil darstellt. Wie im Beispiel gezeigt, beschränkt sich SMART nicht darauf, eine konkrete Anwendung der Optimierung (TM oder RDO) vorzugeben, sondern empfiehlt die geeignete Methode je nach Aufwand der Simulation und den gegebenen Prüfeinrichtungen. Auch eine alleinige Umsetzung von RD mit Hilfe von AD ist bei heutigen komplexen Produkten sehr aufwendig. SMART wendet die Vorteile der funktionalen Systembeschreibung mit AD als Systemanalyse an. Dadurch kann neben einem frühen Design-Entwurf auch ein verbessertes Funktionsverständnis geschaffen werden und ergänzt somit die TM, deren Schwerpunkt eher im PD liegt. SMART gibt eine Empfehlung, welche

---

chronologische Kombination der RD Methoden zielführend ist. AD sollte als Systemanalyse sowie zur Entkopplung komplexer Designs und zum Erstellen des P-Diagramms in der SD Phase oder bei einem späteren Einstieg mit der Methode im PEP, in PD angewendet werden. TM und RDO werden in der PD und TD Phase von SMART angesetzt. In der PD Phase soll die mittels RDO durchgeführte Sensitivitätsanalyse für der Evaluierung der Wechselwirkungen und der Reduzierung von umfangreichen Simulationsmodellen dienen. Die Versuchsplanung nach Taguchi wird im PD mit unterschiedlichen inneren und äußeren Feldern sowie RDO mittels dynamischem Sampling für die Designtoleranzbestimmung im TD angewendet. Ein zu optimierender Punkt ist der bislang nicht berücksichtigte Aspekt der Herstellkosten, der im TD mehr in den Fokus gerückt werden sollte.

## 5 Zusammenfassung

SMART ist eine adaptive Methode zur Gestaltung von robusten und zuverlässigen Produkten und kann zu jedem Zeitpunkt des PEP angewendet werden. Die praktische Anwendbarkeit der SMART-Methode zeigt sich bislang erfolgreich an einem komplexeren Produkt in einem Industrieprojekt. Hier wird die Anwendung der SMART-Methode am Beispiel einer Druckfeder durchgeführt und dient ausschließlich zur Erklärung und Veranschaulichung der Methode. Die Vorgehensweise in diesem Anwendungsbeispiel stützt sich größtenteils auf die Vorgehensweise nach Taguchi. Diese wird durch die RD Methode AD erweitert sowie dem PEP angeglichen und um die Musterphasen ergänzt. Zudem wird der Zuverlässigkeitsaspekt früh integriert. Mit AD wird eine Zuverlässigkeitsanalyse in die TM integriert, die sowohl komplexe Funktionsstrukturen als auch funktionale Systemstrukturen analysiert. Es gibt bislang Forschungsarbeiten, vergleiche Hasenkamp [8], die sich mit der Implementierung von RD Methoden in der Praxis beschäftigen. Allerdings sind einige Unterschiede zur SMART-Methode erkennbar. SMART wird zeitlich genauer in den PEP eingeordnet und um die Musterphasen erweitert. Außerdem werden die eingesetzten Methoden AD sowie die drei Phasen nach Taguchi (SD, PD und TD Phase) gekoppelt und detailliert beschrieben. Schwerpunkt zukünftiger Forschungsarbeiten zur SMART-Methode bildet die Vertiefung des Zuverlässigkeitsaspekts. Dazu wird das Thema virtuelle Lebensdauerermittlung (VLE) [in Druck] näher ausgearbeitet und direkt in die Methode implementiert. Grundlage der bisherigen Lebensdauerermittlung von Bauteilen bilden Bauteil-Wöhlerlinien, bei denen die unterschiedlichen Eingangsstreuungen und deren Vertrauensbereiche nicht ganzheitlich berücksichtigt oder sogar vernachlässigt werden. Mit Hilfe der neuen Methode können zu einem frühen Design-Stand diese Aspekte berücksichtigt und das Ausfallverhalten beschrieben werden, beispielsweise eine nominelle Lebensdauer am Ende der PD Phase.

---

## Danksagung

Die Autoren möchten Martin Dazer und Dominik Herre für die intensive Zusammenarbeit und ihre konstruktiven Anregungen und Vorschläge danken.

## Literatur

- [1] Basshuysen, R.; Schäfer, F.: "Handbuch Verbrennungsmotor", Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2010.
- [2] Suh, N.: "Axiomatic Design – Advances and Applications", Oxford University Press, New York, 2001.
- [3] Taguchi, G. et al.: "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [4] Kemmler, S., Bertsche, B.: "Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing (SMART)", ISO RD 2014, Kopenhagen, 2014.
- [5] VDI – Verein Deutscher Ingenieure: "VDI Richtlinie 2221", Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [6] Bertsche, B.; Lechner, G.: "Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau", Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [7] Yang, G.: „Life Cycle Reliability Engineering“, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [8] Hasenkamp, T.: „Engineering Design for Six Sigma – A Systematic Approach“, John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- [9] Eifler, T., Ebro, M., Howard, T.J.: „A Classification of the industrial relevance of Robust Design Methods“, ICED 13, Seoul, 2013.
- [10] Montgomery, D.C.: „Design and Analysis of Experiments“, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [11] Benavides, E.M., Rodríguez L.G.: "Extended Algorithm for Design-Matrix Reorganisation", ICAD2011, Daejeon, 2011.
- [12] Ross, P.J.: "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill, New York, 1988.