

Systematisches Toleranz Design unter Berücksichtigung von Funktions- und Kostenaspekten nach der robusten Zuverlässigkeitsmethode SMAR²T

Kemmler, S.¹; Fuchs, A.²; Leopold, T.² und Bertsche, B.¹

*¹Institut für Maschinenelemente IMA;
Universität Stuttgart*

²Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH

Abstract

In today's efficient development of technical products the tendencies and challenges shift to simulative computer aided engineering. Therefore in the industrial development of complex technical products, methods are applied which provide realistic results and simultaneously economize the required resources. These results become purposefully optimized regarding the respective requirement with in concurrently consideration of robustness, technical feasibility as well as the cost by varying sets of tolerances. In this paper an approach for the design of robust and reliable products with simultaneous considering of functional and cost-related aspects, SMAR²T (Systematic Method for Axiomatic Robust Reliability-Testing Method), is discussed and visualized by the application example of an overload clutch.

Keyword: Robust Design, Reliability Engineering, Design for cost, Tolerance Design

1 Einleitung und Motivation

Ein stetiger Zielkonflikt in der Produktentwicklung, vor allem in der Disziplin der Optimierung, ist der Kompromiss zwischen der Definition von Toleranzen von Produktmerkmalen und den resultierenden Kosten für die Realisierung dieser Merkmale hinsichtlich Herstellung und Fertigung. Prozessbedingt variierende Toleranzen führen einerseits zur Abweichung von dem Qualitätsoptimum und der geforderten Robustheit beziehungsweise Zuverlässigkeit des Produkts. Die Disziplin der Optimierung kann diese Eigenschaft beherrschen. Dies führt allerdings in den meisten Fällen zu engeren Toleranzfeldern, die wiederum signifikant die Kosten erhöhen.

Ein robustes Produkt muss nach [1] nicht zwingend zuverlässig sein und konträr ein zuverlässiges Produkt nicht unbedingt robust. Ein Ansatz die zwei Domänen Robustheit und Zuverlässigkeit mit ihren unterschiedlichen Definitionen, aber einem gemeinsamen Ziel, in Zusammenhang zu bringen, wird in [2] diskutiert und soll in diesem Beitrag um den Kostenaspekt erweitert werden. Folglich wird das in [2] vorgestellte robuste Zuverlässigkeitsmodell R²-Modell (Robust Reliability-Model – R²-Model) modifiziert.

Um die genannten Zielkonflikte zu steuern, werden heutzutage etablierte Methoden zur Gestaltung von robusten und zuverlässigen Produkten angewandt. Eine dieser Methoden ist die robuste Zuverlässigkeitsmethode (Robust Reliability-Method – R²-Method) SMAR²T (Systematic Method for Axiomatic Robust Reliability-Testing Method) nach [3]. Die Robust Design Methode SMART nach [1] berücksichtigt in ihrer ersten Fassung nicht die ganzheitliche Zuverlässigkeitsbetrachtung in allen drei Phasen. Mit der überarbeiteten SMAR²T-Methode wird die Zuverlässigkeitsbetrachtung in allen Phasen ganzheitlich. Zudem ist das Toleranz Design um das in diesem Beitrag vorgestellte Kostenmodell in Kapitel drei ergänzt und das R²-Modell nach [2] entsprechend modifiziert.

2 Robust Reliability Method – SMAR²T

SMAR²T richtet sich nach dem Taguchi-Gedanken [4] und gliedert sich analog in die drei Robust Design Phasen System, Parameter und Toleranz Design. Zudem sind sowohl der Produktentwicklungsprozess (PEP) nach der VDI-Richtlinie 2221 [5] als auch die Musterphasen nach VDA [6] als chronologische Orientierung integriert.

Während des System Design werden ein oder mehrere Konzepte mit der Hilfe des Ansatzes der Robust Design Methode Axiomatic Design [7] gene-

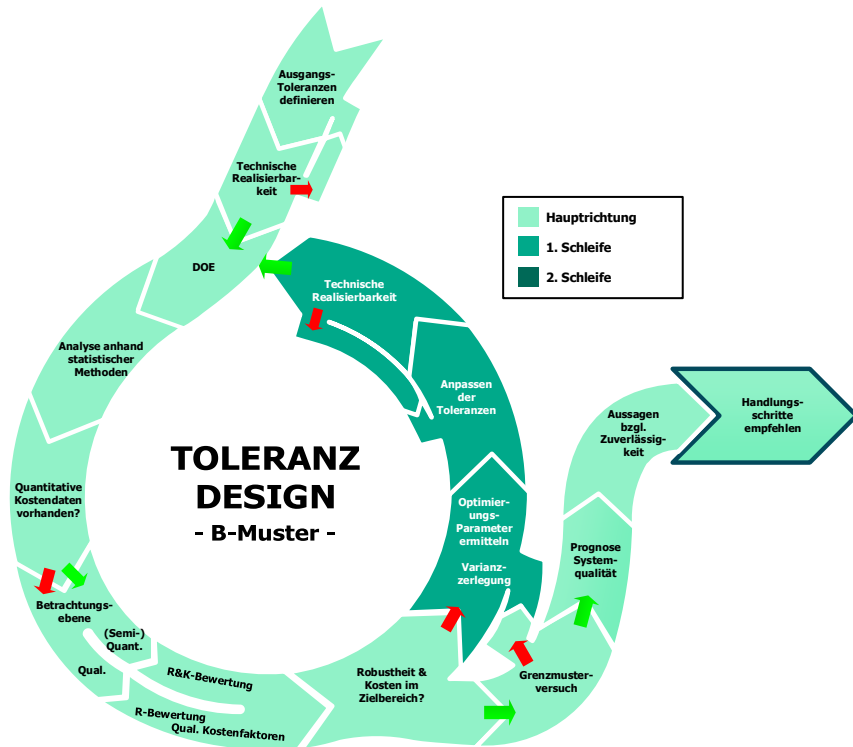


Bild 1: SMAR²T – Toleranz Design

riert. Hierbei wird die System bzw. Bauteilkomplexität im Design analysiert und präventiv diese, in Form von Designanpassungen oder -änderungen, reduziert.

In den darauffolgenden Phasen, Parameter und Toleranz Design, wird Design of Experiments (DoE) in Kombination mit dem stochastischen Simulationsmodell (SIM-SMAR²T) [8] angewandt, um die optimalen Parametereinstellungen sowie deren Toleranzgrenzen zu bestimmen, die sowohl unempfindlich gegenüber äußeren Störeinflüssen als auch technisch und wirtschaftlich realisierbar sind. Zudem können Zufallsausfälle analysiert und deren Erprobung durch virtuelle oder reale Versuche durchgeführt werden [9]. Die Bestimmung von Toleranzparametern für die Kostenoptimierung ist der letzte Schritt in SMAR²T und wird detailliert im Beitrag diskutiert. Ziel von SMAR²T ist die Gestaltung eines robusten, zuverlässigen sowie kosteneffektiven Produktes, welches für Analysen bezüglich Fehlerprognosen und Lebensdauer mit Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen angewendet werden kann.

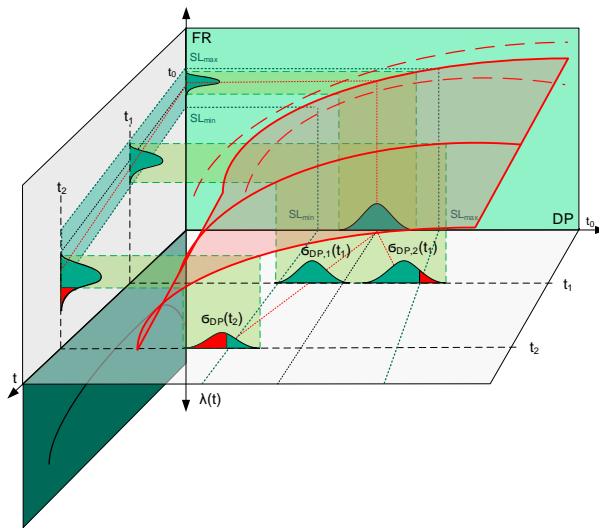


Bild 2: R²-Modell [2]

Das modifizierte Toleranz Design nach SMAR²T, vergleiche Bild 1, beschreibt eine Vorgehensweise für eine detaillierte Bestimmung der System- und Komponentenrobustheit in Verbindung mit deren Kosten. Sie prognostiziert kumulative Kosten in Abhängigkeit von verfügbaren Herstellungsdaten, beispielsweise Materialkosten und Bearbeitungsdauer. Das Ziel des modifizierten Toleranz Designs nach SMAR²T ist es, die optimalen Toleranzen der Designparameter (DP) bezüglich der Herstellung eines hoch qualitativen Produkts unter Beibehaltung der Wirtschaftlichkeit, zu bestimmen.

3 Modifiziertes Toleranz-Design

Das modifizierte Toleranz Design nach SMAR²T gewährleistet eine optimale Toleranzsynthese mit integrierter Robustheits- und Kostenbewertung, in Abhängigkeit der verfügbaren Bauteilkostendaten. Dabei kann die Beurteilung der Bauteilkosten auf quantitativer, semi-quantitativer oder rein qualitativer Betrachtungsebene erfolgen. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Vorgehensweise im modifizierten Toleranz Design nach SMAR²T chronologisch.

3.1 Definition der Ausgangstoleranzen des Produkts

Im ersten Schritt müssen Startwerte für die Toleranzoptimierung festgelegt werden. Ebenso müssen die systeminternen, invarianten Parametertoleranzen ermittelt werden, dazu gehören funktionale Toleranzen, die aufgrund der Qualitätsanforderungen invariant sind und daher zur iterativen Toleranzsynthese nicht berücksichtigt werden können. Die Voraussetzung zur Definiti-

on der Ausgangstoleranzen ist in jedem Fall die Erfüllung der technischen Realisierbarkeit, welche im Vorfeld abgeklärt werden muss.

3.2 Statistische Versuchsplanung

Um die Beeinflussung der Zielfunktion durch die toleranzbedingte Streuung der Parameter zu untersuchen, werden Versuche auf Basis der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Nach SMAR²T werden hierfür Taguchi-Versuchspläne [4] angewendet. Die Produktmerkmale des inneren Feldes werden in einer dreistufigen Versuchsanordnung variiert, was zu einer aussagekräftige Untersuchung der Varianz und Linearität beiträgt. Die Einstellstufen des inneren Feldes müssen so gewählt werden, dass die Parameterstreuung mit hinreichender Genauigkeit abgebildet wird. Die Parametergrenzen (SL) werden nach [10] folgendermaßen bestimmt:

$$SL_{min,max} = \mu_i \pm \sigma_i \cdot \sqrt{3} \quad . \quad (1)$$

Die Verwendung dieser Parametergrenzen beugt einer Überschätzung der Parameterstreuung vor, indem die Gleichverteilung der Parameter in eine Normalverteilung transformiert wird. Im Anschluss werden die geplanten Versuche mit den definierten Toleranzeinstellungen mittels Simulation oder durch reale Versuche durchgeführt.

3.3 Robustheits- und Kostenanalyse

Die gekoppelte Robustheits- und Kostenanalyse kann in unterschiedlichen Betrachtungsebenen erfolgen. Die Wahl der Betrachtungsebene erfolgt im Toleranz Design nach SMAR²T anhand den vorliegenden Kostendaten sowie deren Vollständigkeit und Anwendbarkeit. Wird das zu untersuchende Produkt beispielsweise in eigener Produktion gefertigt, können quantitative Kostendaten durch abteilungsübergreifende Zusammenarbeit beziffert werden. Falls der Kenntnisgrad der Fertigung eine Bestimmung von zuverlässig quantitativen Kostendaten nicht zulässt, kann die Kostenbetrachtung auf qualitativer oder semi-quantitativer Ebene durchgeführt werden. Während die qualitative Betrachtung darauf abzielt, dem Entwickler Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Zielkonflikts Herstellungskosten und Robustheit zu erarbeiten, wird mit der quantitativen Kostenanalyse eine Einschätzung der realen Kosten für die Herstellung mit den definierten Toleranzfeldern durchgeführt und in einer frühen Phase Optimierungspotential zur Kosteneinsparung aufgezeigt. Sind die vorliegenden Kostendaten unvollständig oder mit Unsicherheiten behaftet, kann die semi-quantitative Betrachtung angewendet werden. Die Vorgehens-

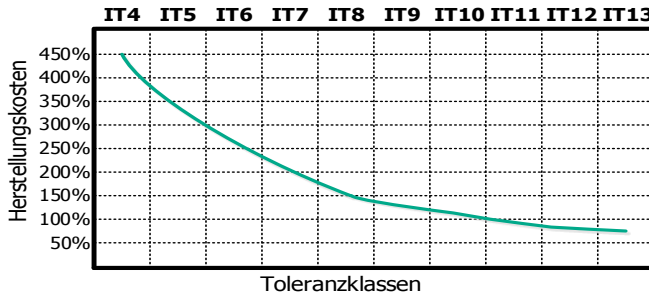


Bild 3: Empirisch ermittelter Verlauf der Herstellungskosten

weise der semi-quantitativen Kostenbeurteilung wird im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

3.4 Semi-quantitative Betrachtungsebene

Die semi-quantitative Kostenbetrachtung wird angewendet, wenn eine rein quantitative Untersuchung durch fehlende Kostendaten nicht möglich ist. Um die semi-quantitativen Kostenfunktionen zu bestimmen wird eine empirisch ermittelte Annahme von Herstellungskosten in Abhängigkeit der eingestellten Toleranzklasse angewendet, vergleiche Bild 3. Durch die bekannte Bezugsgröße der Bauteileinkaufskosten kann mit Untersuchungsergebnissen des VDI [11], wonach sich die Einkaufskosten in einen fixen Anteil aus Material- und Personalkosten sowie eines variablen Anteils durch die eingestellten Toleranzklassen gliedert, auf die Kostenanteile zurückgeschlossen werden (45% Materialkosten, 17% Personalkosten). Dieser Zusammenhang kann wie folgt definiert werden:

$$K_{\text{fix}} = 0,62 \cdot K_{\text{gesamt}} \rightarrow K_{\text{var}} = (1 - 0,62) \cdot K_{\text{gesamt}} \quad (2)$$

Durch Tabellen mit herstellbaren Toleranzklassen bezogen auf das Fertigungsverfahren, können unter Verwendung der Kostenentwicklung nach Bild 3 die variablen Kostenanteile der Bauteile berechnet werden. Dabei müssen Kostensprünge durch zusätzliche Schritte beispielsweise erhöhter Fertigungsaufwand oder Folgeverfahren, berücksichtigt werden.

3.5 Erweiterung des R²-Modells

Das ursprüngliche R²-Modell, vergleiche Bild 2 und [2], wird um das zuvor vorgestellte Kosten- und Qualitätsmodell in den zweiten Quadranten mittels der Übertragungsfunktion nach der semi-quantitativen Kostenbetrachtung, vergleiche Bild 3 und Gleichung (2), erweitert. Hierbei ist zu beachten, dass die Betrachtungstiefe n und die Anzahl i der Designparameter ($DP_{n,i}$), der Funk-

tionsanforderungen ($FR_{n,i}$) und deren Qualitäts- bzw. Kostenbetrachtung ($Q_{n,i}/C_{n,i}$) entsprechen. In der Ebene $n = 0$ wird das Gesamtsystem, bei $n = 1$ die Komponentenebene und bei $n = 2$ die Merkmalsebene betrachtet. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich folgende Gleichung (3):

$$Q_{n,i}/C_{n,i} = f(FR_{n,i}, t) \quad \text{mit} \quad FR_{n,i} = f(DP_{n,i}, t) \\ \text{mit} \quad FR_{n,i} = \sum_{i=1}^j FR_{n+1,i} \quad \text{und} \quad DP_{n,i} = \sum_{i=1}^j DP_{n+1,i} \quad (3)$$

wobei $n \in \{\mathbb{N}\}$ und $i \in \{\mathbb{N}^*\}$ ist. Es ist zu beachten, dass die Qualität $Q_{n,i}$ zeitabhängig ist und bei Überschreitung der Qualitätsgrenzen in einen merklichen Verlust für den Kunden resultiert. Die Kosten $C_{n,i}$ hingegen unterstehen keiner zeitlichen Änderung und sind einmalige Kosten aus Fertigung und Herstellung zum Zeitpunkt $t = 0$. Allerdings können diese für eine bessere Einschätzung auf deren Verhalten über der Zeit, für eine transparente Betrachtung, separiert werden. Die diskrete Einteilung des zweiten Quadranten ist abhängig von der Betrachtungstiefe. Eine auf der Betrachtungstiefe 3 (Merkmalsebene), wie sie in Bild 4 dargestellt ist, beschreibt die Qualität und die Kosten anhand der IT-Klassierung. In der obersten Ebene (Systemebene) wird der Quadrant in sogenannte Qualitätsklassen eingeteilt.

4 Toleranz Design – Anwendung anhand einer Überlastkupplung

Das Toleranz Design nach SMAR²T mit der semi-quantitativen Kostenbe-

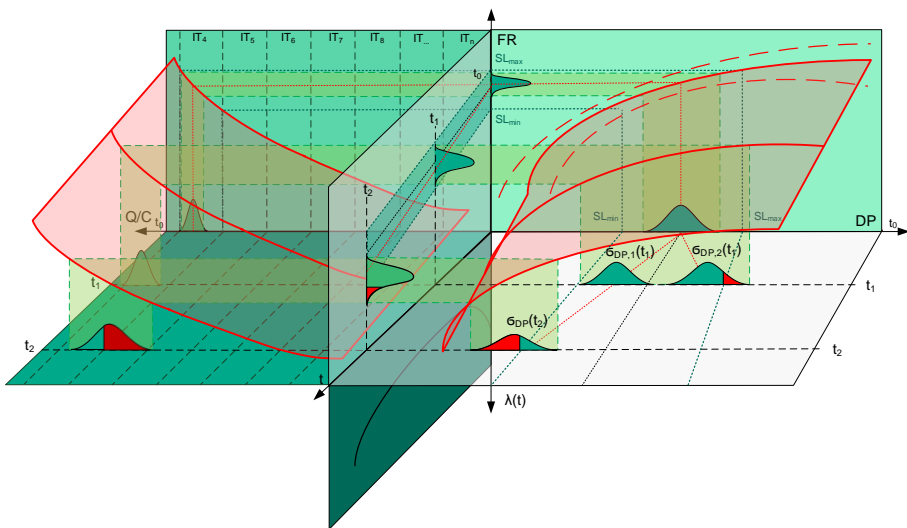


Bild 4: Erweitertes R²-Modell mit dem Qualitäts- und Kostenaspekt

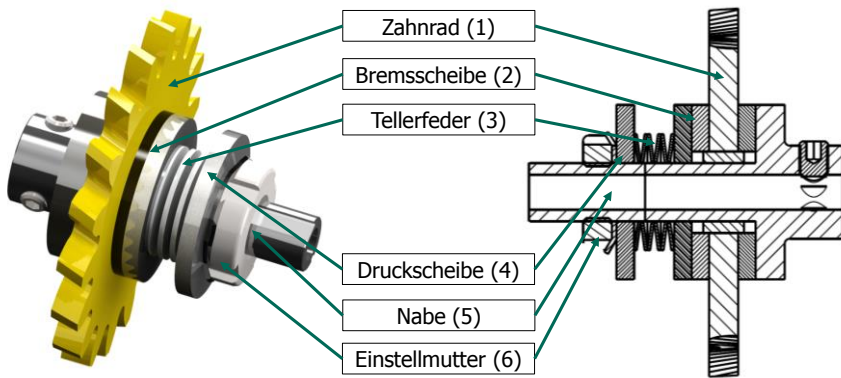


Bild 5: Überlastkupplung

trachtung soll im Folgenden am Anwendungsbeispiel Überlastkupplung aufgezeigt werden.

4.1 Funktionsweise

Die Überlastkupplung hat die Aufgabe, eine konstante Kraft bzw. Moment vom Antrieb zum Abtrieb zu übertragen. Zudem soll sie bei einem zu großen Moment des Abtriebs eine Schutzfunktion auslösen, indem das zu übertragende Moment im Kraftfluss unterbrochen wird. In dieser vorgestellten Ausführung wird diese Schutzfunktion infolge des Anpressdrucks einer vorgespannten Tellerfeder (3) über eine Bremscheibe (2) auf das Zahnrad (1) umgesetzt. In diesem Beispiel soll die Schutzfunktion der Kundenanforderung (CA), die Anpresskraft der Funktionsanforderung (FR) und die Federvorspannlänge des Design Parameters (DP) entsprechen.

Für eine genauere Kennung und für die weitere Toleranzanalyse werden die DPs mittels P-Diagramm in Stell-, Steuer-, und Störgrößen eingeteilt sowie deren FR als Zielfunktion, vergleiche Bild 5. Die Herausforderung ist, das System Überlastkupplung gegenüber den Einfluss der Störgrößen unempfindlich zu gestalten und die Funktion durch das Reibmoment $M_R = 200 \pm 40 \text{ Ncm}$ gewährleisten.

4.2 Bauteilklassifizierung nach Herstellungs- und Kostenaufwand

In diesem Teilschritt müssen die systemeigenen Bauteile nach Herstellungsverfahren und vorliegender IT-Toleranzklasse klassifiziert werden. Als Basis der Kostenbetrachtung dient der Einkaufspreis der Bauteile. Mit der vorgestellten, empirischen Kostenfunktion nach Bild 3 sowie den erreichbaren Toleranzklassen nach Tabelle 2, können semi-quantitative Kostenkurven er-

stellt werden. Weiter müssen Zusatzfaktoren für erhöhten Aufwand sowie für anfallende Folgeverfahren berücksichtigt werden, falls die geforderte Toleranzklasse durch das gewählte Fertigungsverfahren nicht realisierbar ist. Diese Zusatzfaktoren müssen für jedes Verfahren separat beziffert werden. Folgende Tabelle zeigt die Bauteilklassifizierung der Rutschkupplung.

Tabelle 1: Bauteilklassifizierung und deren Kostenaufwand

Bauteil	Herstellungsverfahren	IT-Klasse	Einkaufspreis [€]
Zahnrad	Sintern	IT-10	0,55
Bremsscheibe	Spritzguss (Kunststoff)	IT-11	0,26
Tellerfeder	Stanzen, Drehen	IT-10	0,43
Druckscheibe	Sintern	IT-11	0,32
Einstellmutter	Normteil	-	0,05
Nabe	Drehteil	IT-10	0,75

Tabelle 2: Erreichbare Genauigkeit ausgewählter Fertigungsverfahren

Verfahren	Toleranzklassen								
	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13
Sintern									
Stanzen									
Drehen									
Spritzguss									

Normal erreichbar
 Mit Sondermaßnahmen erreichbar

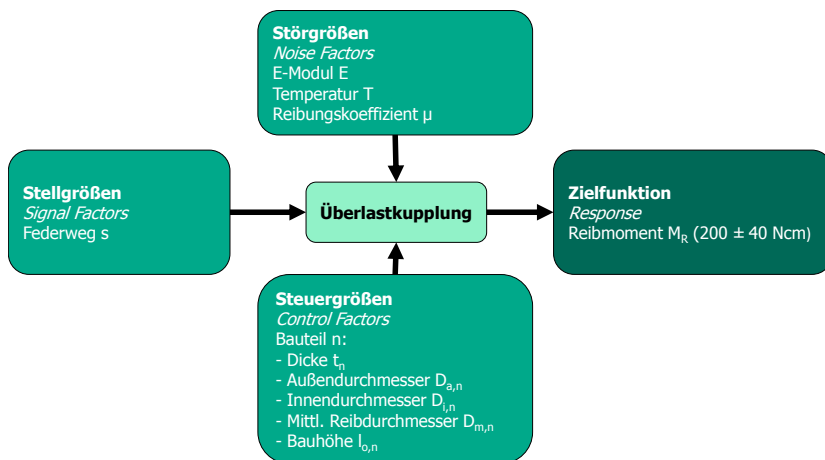


Bild 5: Verallgemeinertes P-Diagramm der Überlastkupplung

Tabelle 2 gibt einen Auszug aus einer Auflistung der erreichbaren Genauigkeit verschiedener Fertigungsverfahren, vergleiche [12].

Bild 6 zeigt beispielhaft die semi-quantitative Kostenfunktion am Beispiel der Bauteile Zahnrad und Bremsscheibe. Den sprunghaften Anstieg im Kurvenverlauf lässt sich durch den notwendigen Einsatz eines Folgeverfahrens bzw. durch erhöhten Fertigungsaufwand zur Erzielung der Toleranzklassen erklären.

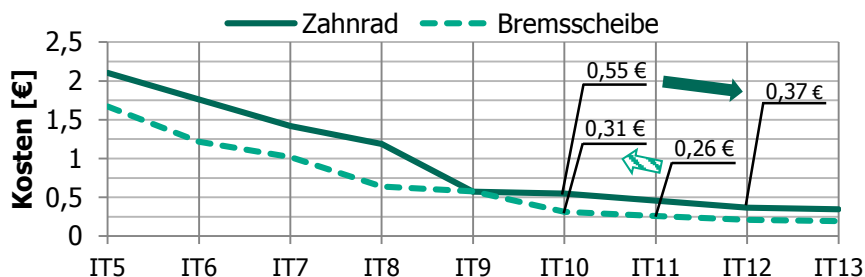


Bild 6: Semi-quantitative Kostenfunktionen

4.3 Optimierungspotential des Designs

In Abhängigkeit von Sensitivitätsstudien im Rahmen der Methode SMAR²T ist die Bremsscheibe als hochsignifikanter Parameter und die DPs des Zahnrads als weniger signifikant hinsichtlich der Zielfunktion Rutschmoment bestimmt. Eine genauere Untersuchung ergibt, dass die geforderten Festigkeitseigenschaften des Zahnrads bei Änderung des Prozesses weiterhin gewährleistet werden. Im Gegensatz dazu müssen die Topologie-Merkmale, beispielsweise die Reibwertänderung, anhand eines geänderten Prozessverfahrens mit einer höheren Qualität gefertigt werden

Basierend auf dieser Untersuchung wird das iterative Vorgehen, vergleiche Bild 1, mit einer Toleranzaufweitung des Zahnrads sowie einer Toleranzeinengung der Bremsscheibe durchlaufen. Die kumulierten Kosten des Ausgangsdesigns ergeben sich nach Addition der Bauteilkosten zu 2,36 €.

4.4 Optimiertes und kosteneffektives Design

Die Ergebnisse vor und nach dem modifizierten Toleranz Design sind in Bild 7 dargestellt. Die in Kapitel 4.3 durchgeführten Maßnahmen führen einerseits zur Mittelwertverschiebung (216,9 – 192,9 *Ncm*) und andererseits zur Streuungsreduzierung (29,4 – 14,3 *Ncm*) auf die geforderte Kundenanforde-

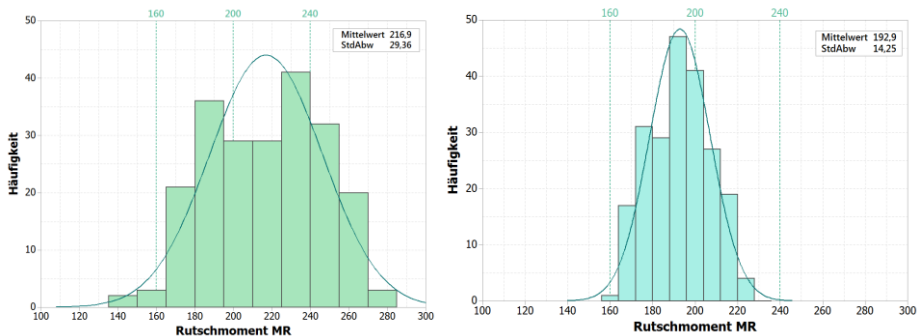


Bild 7: Ergebnisse der Verteilungen des Rutschmoments M_R vor (links) und nach (rechts) dem modifiziertem Toleranz Design

ung und folglich zur Realisierung der Qualität innerhalb der Grenzen. Die kumulierten Kosten des Systems Rutschkupplung ergeben sich durch die geänderten Toleranzeinstellungen zu 2,23 €, was einer Kostenreduzierung um 5,5% bei optimierter Funktionalität, entspricht, vergleiche Bild 6.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem in diesem Beitrag vorgestellte modifizierten Toleranz Design ist die Robust Design Methode SMART nach [2] anhand der semi-quantitativen Kostenbetrachtung und deren Integration zum erweiterten R^2 -Modell zur ganzheitlichen robusten Zuverlässigkeitsmethode (Robust Reliability Method – R^2 -Method) SMAR²T komplettiert. Das R^2 -Modell ist um den Qualitäts-/Kosten-Quadranten ergänzt und bietet dem Anwender eine umfassend zusammenhängende Betrachtungsweise bezüglich der zeitabhängigen Design-, Funktions-, Kosten- und Qualitätsänderung.

Anhand der Ergebnisse des einfachen Anwendungsbeispiels Überlastkupplung ist die Herangehensweise von SMAR²T bezüglich Kostenreduzierung und Erreichung der geforderten Qualität und Funktion verifiziert. Folglich kann das modifizierte Toleranz Design in SMAR²T, als Tool in der Produktentwicklung oder als Analyseverfahren um die Kostenentwicklung in frühen Entwicklungsphasen zu steuern, angewendet werden.

In zukünftigen Forschungsarbeiten soll das R^2 -Modell bis auf Merkmals-ebene ausgerollt und als dynamisches Modell für die ganzheitliche Entwicklung in SMAR²T integrieren werden. Anschließend soll sie in einem aktuellen Industrieprojekt umgesetzt und validiert werden. Für eine verbesserte Anwendung des semi-quantitativen Kostenmodells und umfassende Kostenbetrachtung soll eine Datenbank mit weiteren empirisch ermittelten Kostenfunktionen von verschiedenen Verfahren erstellt werden.

Literatur

- [1] Kemmler, S.; Bertsche, B.: "Gestalten robuster und zuverlässiger Produkte mit der SMART-Methode", Proc. 25. DfX-Symposium, TuTech Verlag, Hamburg, 2014.
- [2] Kemmler, S. et al.: "Robust reliability or reliable robustness – integrated consideration of Robustness- and reliability-aspects", Proc. 27th VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2015.
- [3] Kemmler, S., Bertsche, B.: "Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing (SMART)", International Symposium on Robust Design 2014, Copenhagen.
- [4] Taguchi, G. et al.: "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [5] VDI – Verein Deutscher Ingenieure: "VDI Richtlinie 2221", Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [6] Hab, G. ; Wagner, R.: "Projektmanagement in der Automobilindustrie", Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [7] Suh, N.: "Axiomatic Design – Advances and Applications", Oxford University Press, New York, 2001.
- [8] Kemmler, S. et al.: "Method for the development of a functional adaptive simulation model for designing robust products", Proc. 11th Weimar Optimization and Stochastic Days, Weimar, 2014.
- [9] Bertsche, B.; Lechner, G.: "Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau", Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [10] D'Errico, J.; Zaino, N.: "Statistical Tolerancing using a Modification of Taguchi's Method", Journal of American Society for Quality, Taylor & Francis Group, London, 1988.
- [11] VDI – Verein Deutscher Ingenieure: "Qualifizierung Ressourceneffizienz für Berater", Seminarbeitrag Beraterqualifizierung Ressourceneffizienz, Stuttgart, 2014.
- [12] Haberhauer, H.; Bodenstern, F.: "Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung", Springer-Verlag, Berlin, 2007