

Lebensdaueranalyse auf Basis von multidimensionaler Zuverlässigkeits- und Robust Design Simulation

Integrale Betrachtung der Robusten Zuverlässigkeit

Dipl.-Ing. **S. Kemmler***, M.Sc. **M. Dazer***,
Dr.-Ing. **T. Lepold***, Prof. Dr.-Ing. **B. Bertsche***

+Knorr-Bremse, Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH, München

*Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart; TTI GmbH

Kurzfassung

Konventionelle Methoden des *Robust Design* verfolgen größtenteils Ansätze zur Varianzbetrachtung, die potentiell über der Produkteinsatzzeit auftreten können. Daher geben diese Methoden keine genauen Informationen über das zeitlich funktionale Verhalten der sich verändernden Produkteigenschaften und –anforderungen sowie deren Lebensdauer. Um genaue Lebensdauerprognosen bezüglich dieser Funktionserfüllung zu beschreiben, ist eine kontinuierliche Merkmalsänderung in Form von sogenannten Degradationsmodellen von Vorteil. Diese werden im Allgemeinen durch reale Versuche mit einem hohen Grad an zeitlichem und kostenintensivem Aufwand durchgeführt. Für eine effizientere Ermittlung der Modelle sollten bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses, virtuelle Degradationsmodelle entwickelt werden. Durch die genaue Kennung von Funktionsausfällen über der Zeit können nicht nur Produkte zielgerichtet ausgelegt, sondern auch unnötige Ressourcen eingespart werden.

Abstract (optional)

Conventional methods of *Robust Design* are largely used for variance consideration, which may potentially occur during the product use. Therefore, these methods do not provide accurate information about the temporal behavior of the changing product properties and requirements. However, in order to describe accurate life predictions with regard to the fulfilling functions, a continuous feature change is advantageous with the aid of degradation models. These models are generally determined with real tests, which are associated with a high degree of time and cost effort. For a more efficient determination of these models, virtual degradation models should be developed in the early stages of the product development process. The products can be targeted designed and even unnecessary resources can be saved by the precise identification of functional failures over time.

1. Einleitung und Motivation

Die Lebensdauer eines Produkts gilt als wichtiges Qualitätsmerkmal. Sie markiert nicht nur die Beschaffenheit und den Zustand eines Produktes, sondern schließt auch den zuverlässigen und sicheren Betrieb innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens ein. Wird die Ausfallrate an technischen Bauelementen in Abhängigkeit von deren Lebensdauer betrachtet, ergibt sich ein typischer Verlauf, die sogenannte Badewannenkurve. Das Ausfallverhalten wird hierbei in drei Phasen klassifiziert: Früh-, Zufalls- und Ermüdungsausfälle [1]. Bei den Ermüdungsausfällen altert das Bauteil und repräsentiert eine steigende Ausfallrate. Der Ausfallzeitpunkt kann anhand einer messbaren Degradation in der realen Erprobung beziehungsweise mit virtuellen Degradationsmodellen bereits früher im Entwicklungsprozess prognostiziert werden. Diese Modelle ermöglichen dem Entwickler einerseits eine genauere Berechnung der Funktions-Lebensdauer und andererseits eine Möglichkeit Schwachstellen im System zu ermitteln. Bild 1 zeigt schematisch einen typischen Degradationsverlauf bis zu einem definierten Ausfallkriterium (*End-of-life (EOL)* - Kriterium).

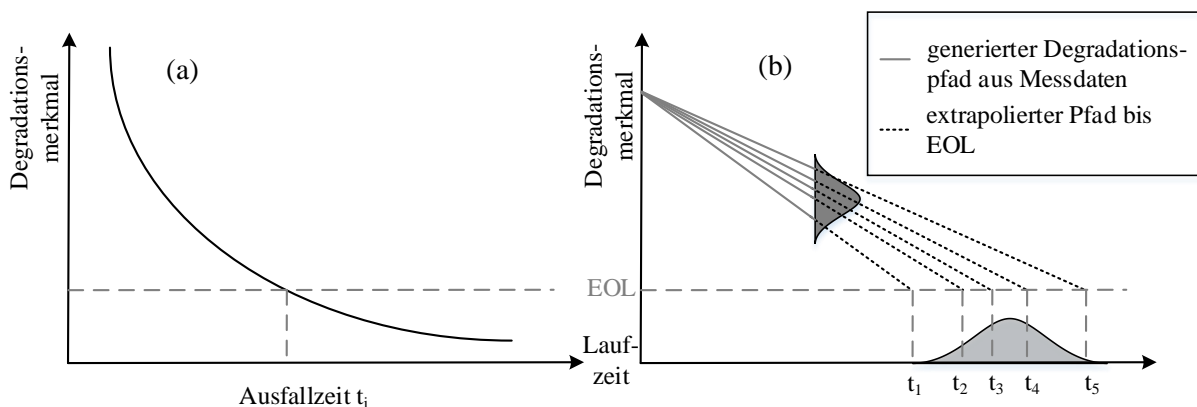


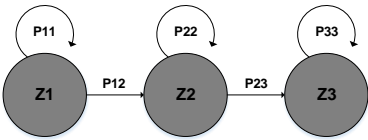
Bild 1: Änderung der Degradation über der Betriebszeit (a) und Zusammenhang zwischen Degradationspfaden und Ausfalldichte (b)

Erste Degradationsmodelle basieren auf der Annahme, dass die Degradation ein zufälliger, stochastischer Prozess (*Wiener Prozess*) in einer definierten Zeit ist [2]. Für die Bestimmung dieser Modelle beziehungsweise die Prognose des Ausfallverhaltens der zu beschreibenden Aufgabenstellung, kann mittels statistischer Modelle erfolgen. Die Modellierung erfolgt auf Basis der Annahme einer Funktion über der Zeit mit multidimensionalen zufälligen Variablen (*General Degradation Path Models*). Beispiele hierfür sind unter anderem die zweistufige Bestimmung der Funktionsparameter (*Nonlinear mixed-effects model*) nach [3], das fraktionell faktorielle Design nach [4] oder das Modell mit zufälligen Regressionskoeffizienten nach [5]. Weitere Modelle sind in Tabelle 1 gelistet.

Gegenüber der herkömmlichen Erprobung haben diese Modelle den wirtschaftlich entscheidenden Vorteil einer beschleunigten Erprobung. Dies hat beispielsweise bei Bauteilen mit einer hohen Lebensdauer, unabhängig von deren Zuverlässigkeit, den Vorteil, dass durch

herkömmliche Lebensdauertests kaum oder keine Ausfälle generiert werden können und anhand der Degradationserprobung neben den Ausfallzeiten auch der Verlauf über der Zeit bis zum Ausfall beschrieben werden kann. Dies ermöglicht eine variable Messzeitpunkt-Definition sowie ein vorzeitiges Beenden der Versuchsreihen nach Verhaltenskenntnis sowie deren Extrapolation. Zudem muss durch die Definition eines *EOL*-Kriteriums nicht zwingend bis zum Ausfall getestet werden.

Tabelle 1: Degradationsmodellen nach Stand der Technik und Forschung

Parametrisch	linear	Arrhenius	$y_{ij}(t, T) = \alpha_{ij} - t\beta_i \cdot \exp(-\frac{Y}{T})$	[6]
		Random-Coefficients	$y_{ij}(t) = \alpha_{ij}[1 - \exp(-(\beta_i(t))^Y) + \epsilon_{ij}$	[7]
		Simple-Constant-Rate	$y_{ij}(t) = \alpha_{ij} - \beta_i \cdot t$	[6]
		Simple Path	$\log(y_{ij}(t)) = \log(\beta_i) + \log(t) + \epsilon_{ij}$	[8]
		Random-Regression-Coefficients	$y_{ij}(t) = \alpha_{ij} + \beta_i \log(t_{ij}) + \epsilon_{ij}$	[5]
		Sample-Degradation-Path	$y_{ij}(t) = D_{ij} + \epsilon_{ij}$	[6]
	nicht-linear	Random-Effects	$y_{ij}(t) = D(t, \beta_{ij}) + \epsilon_{ij}$	[9]
		Mixed-Effects	$y_{ij}(t) = D_{ij} + \epsilon_{ij} = D(t; \alpha_{ij}, \beta_i) + \epsilon_{ij}$	[3]
		Integrated S-Curve	$y_{ij}(t) = \alpha_{ij}F(t, \zeta_{ij}) + \epsilon_{ij}(t)$	[10]
		Gompertz	$y_{ij}(t) = \exp(-ce)^{\beta_i t}$	[11]
		Lloyd-Lipow	$R_t = R_\infty - \frac{\beta_i}{t}$	[12]
		Potenz	$y_{ij}(t) = \beta_i t^m$	[13]
		Exponentiell	$y_{ij}(t) = \exp(\beta_i t)$	
		Logarithmisch	$y_{ij}(t) = \ln(\beta_i t)$	
Stochastisch	Gamma-Prozess	$y_{ij}(t) = r_0 - D_{ij}$ $f_{X(t)}(x) = Ga(x \lambda(t), \beta_i)$	[14]	
	Wiener-Prozess	$y_{ij}(t) = \Lambda(t) + \sigma W(\Lambda(t))$	[2]	
	Markov-Prozess		[15]	

Zusammenfassend gilt, dass die Degradation einen Ausfall hervorruft, sobald sie den kritischen Degradationswert D_f (*EOL*) erreicht. Infolgedessen hängt die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ im Wesentlichen davon ab, mit welcher Wahrscheinlichkeit P

die Degradationswerte y_i über oder unter dem *EOL*-Kriterium liegen. Hierfür ist die Verteilungsform des Degradationsmerkmals y wichtig, vergleich dazu Bild 1 (b) mit folgender Gleichung:

$$P(t > t_f) = F(t) = F(t, y) = P(D(t, y)) > D_f .$$

Für eine sichere und genauere Aussage einer Prognose auf Basis von Stichproben hinsichtlich Streuung und Regressionsgüte gibt es bislang mehrere Ansätze zur Modellierung der Aussagesicherheit. Zur Verfügung stehen klassische Regressionsmethoden sowie analytische und numerische Methoden zur Verfügung. Hierfür wird anhand theoretischer Ausfallzeiten, welche sich aus dem parametrisierten Degradationsmodell ergeben, eine konventionelle Lebensdauerbewertung durchgeführt. Eine Übersicht gibt hierzu Bild 2.

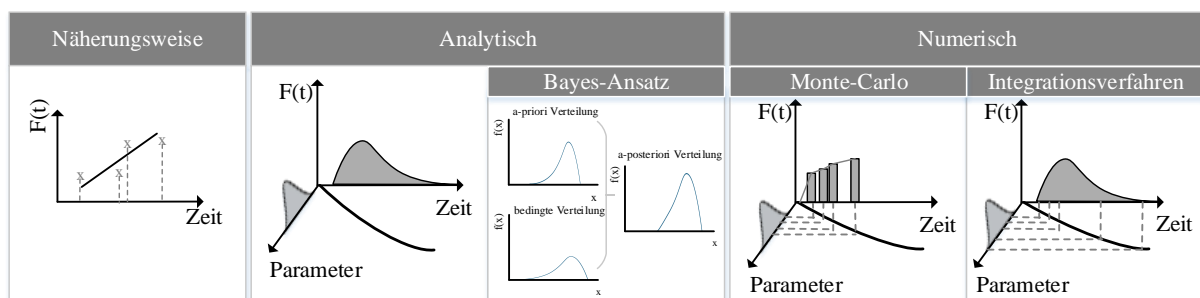


Bild 2: Zuverlässigkeitstechnische Auswertungsmöglichkeiten von Degradationsmodelle

Als weitere Möglichkeit wird in diesem Beitrag eine simulative Alternative gezeigt, die nicht nur die Modellierung der Degradation in der frühen Entwicklungsphase ermöglicht, sondern zudem zur Bestimmung der Aussagesicherheit dient. Hierfür werden stochastische Lebensdauerberechnungen bezüglich Funktionsausfällen mit Hilfe von simulativ ermittelten kontinuierlichen Merkmalsänderungen anhand einer Überlastkupplung einer Nachstelleinheit für Nutzfahrzeuggremssystemen vorgestellt. Dabei werden die schädigungsrelevanten Effekte, wie Verschleiß, hinsichtlich der Funktionsdegradation mit *Finite Element (FE)*-Berechnungen ermittelt. Damit ist es möglich Zuverlässigkeitsprognosen für funktionales Versagen zu prognostizieren.

2. Allgemeine Vorgehensweise

Basierend auf der bekannten Vorgehensweise in Kapitel 2.1 wird als Vergleich die in diesem Beitrag zu Grunde liegende Vorgehensweise vorgestellt.

2.1 Klassische Vorgehensweise

In Bild 3 wird eine allgemeine Vorgehensweise gezeigt. Zu Beginn müssen in der ersten Phase Produkteigenschaften für typische Belastungen, wie beispielsweise Nutzungszyklen, Temperatur, Druck oder Strom, zur Degradationsbeschreibung ermittelt werden. Im Anschluss werden Zeitintervalle sowie *EOL*-Kriterien bestimmt und definiert. In der zweiten Phase wird das Modell auf der generierten Datenbasis sowie im Abgleich zu bestehenden Modellen erstellt. Jeder Degradationsprozess benötigt ein eigenes Modell nach dem jeweiligen

degradierten Merkmal, wie Risswachstum oder Widerstandsänderung. Im Anschluss erfolgen die Abschätzung der Parameter sowie die Evaluierung der Ausfallwahrscheinlichkeit.

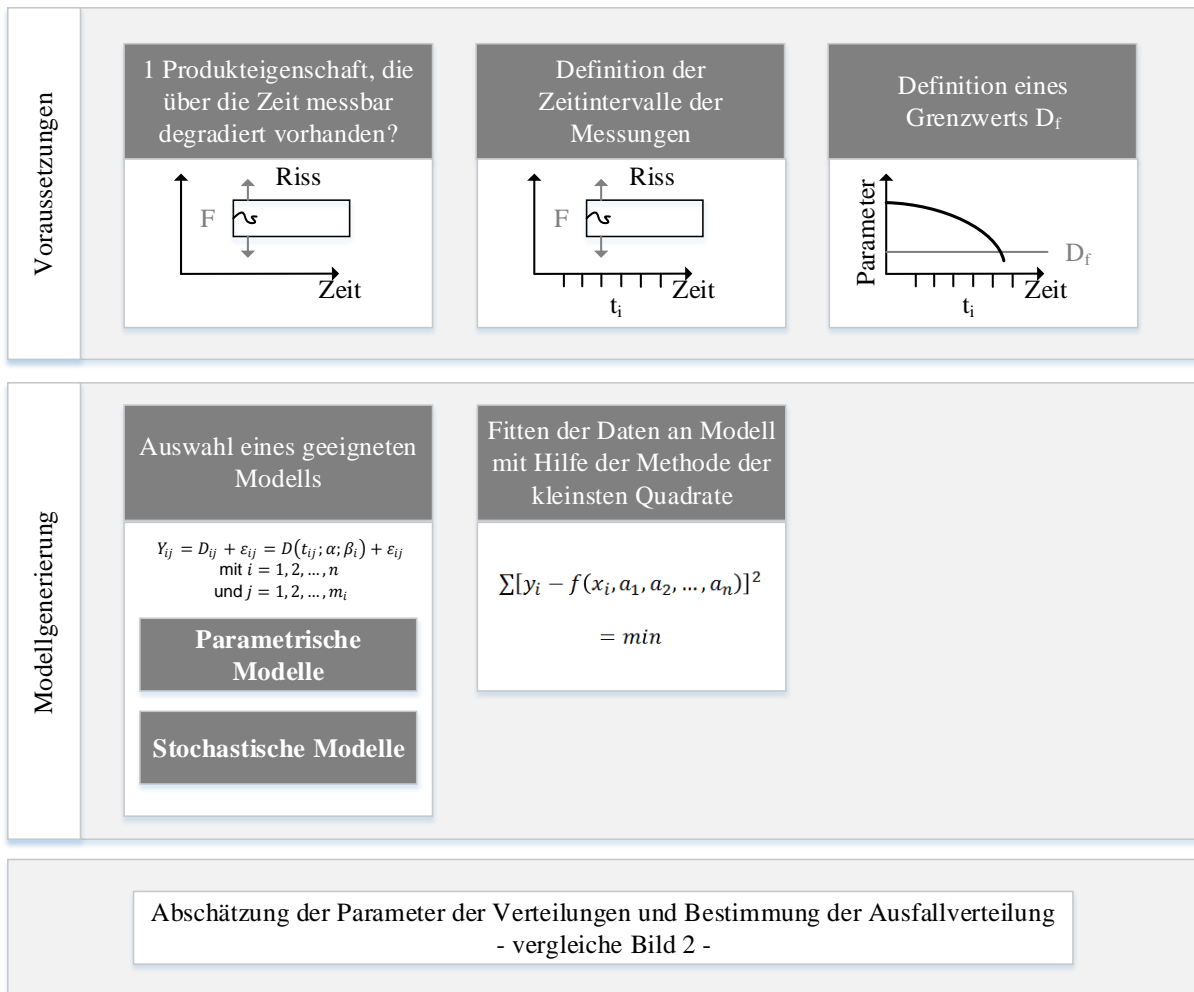


Bild 3: Schematische Vorgehensweise zur Degradationsmodellierung

2.2 Lebensdaueranalyse auf Basis von multidimensionaler Zuverlässigkeits- und Robust Design Simulation

Die Lebensdaueranalyse soll auf Basis des *Robust Design* erfolgen. Der Grundgedanke dabei ist, das System oder die Komponente gegen äußere und innere Störeinflüsse unempfindlich zu gestalten. Hierbei wird nach der klassischen Vorgehensweise nicht explizit die Betriebszeit als eine steuernde Größe betrachtet, sondern als Störgröße, da das Produkt in der geforderten Betriebszeit seine Funktion aufrecht halten soll. Allerdings treten während der Einsatzzeit alterungsbedingte Ermüdungen am Produkt auf. Um das Produkt möglichst robust gegen diese Ermüdungen zu konstruieren, bedarf es eines Designs, das innerhalb der geforderten Einsatzzeit keine beziehungsweise bis zu einem zulässigen Kriterium die Funktion gewährleistet. Diese Herausforderung wird meistens unter der Prämisse einer Überdimensionierung erreicht. Allerdings kann selbst diese unwirtschaftliche Konstruktion außerhalb der Funktionsgrenzen liegen. Um dies zu vermeiden wird entsprechend der Theorie

der *Robusten Zuverlässigkeit* nach [16] eine zeitliche Betrachtung des Funktionsverhaltens unter Berücksichtigung sämtlicher Wechselwirkungen verfolgt. Zur Lebensdaueranalyse auf Basis von multidimensionaler Zuverlässigkeits- und *Robust Design* Simulation wird mittels einer stochastischen Degradationsanalyse die Funktionserfüllung innerhalb der Einsatzzeit betrachtet. Großteils sind solche virtuellen Degradationssimulationen mit einem Mehraufwand verbunden, die eine Effizienz infolge hoher Ressourcenaufwand von beispielsweise Rechenzeit und –kapazität nicht immer gewährleisten. Folglich wird nach der durchgeführten *Robust Design* Definition die 5 % - und 95 % - Quantil-Designs bestimmt sowie ausschließlich mit diesen und dem nominalen Design die Degradation über der Einsatzzeit simuliert und die Ausfallzeit zum *EOL* betrachtet. Ziel ist es, mit den drei durchgeführten Simulationen nicht nur Rechenzeit einzusparen, sondern auch eine Aussagesicherheit respektive für die Population zu bieten. Entsprechend wird hierfür folgende Hypothese aufgestellt:

Die definierten Quantil-Designs aus den Robusten Designs entsprechen zum Zeitpunkt des EOL-Kriteriums der Aussagesicherheit zum jeweiligen Lebensdauer-Quantil.

Zur Überprüfung dieser These wird am nachfolgend beschriebenen Demonstrator das *Robust Design* sowie die virtuelle Degradationssimulation der drei genannten Designs durchgeführt. Zur Bestätigung wird die Simulation, nach erfolgter Validierung mittels realer Degradationsversuche, um die durchgeführte Parameterstudie im *Robust Design* auf die Degradationsmodellierung übertragen. Ziel ist es, die Quantil-Designs in ihrer Definition zu bestätigen. Nach erfolgreicher Bestätigung der Hypothese können somit nicht nur effektive virtuelle Lebensdaueranalysen umgesetzt, sondern auch daraus zielgerichtet reale Nachweisversuche ressourcenreduzierend abgeleitet und geplant werden.

3. Verschleißmodellierung des Demonstrators

In der vorliegenden Funktionsbaugruppe als Anwendungsbeispiel wird eine Überlastkupplung verwendet. Anschließend an die Vorstellung des Demonstrators wird die Vorgehensweise beschrieben und abschließend die Ergebnisse aus virtueller und realer Erprobung diskutiert.

3.1 Das Anwendungsbeispiel

Die Überlastkupplung besteht aus Nabe (1), Flanschring (2) sowie aus rotationssymmetrisch angeordnete Kugeln (3), die durch ihre Kontakteigenschaften das Drehmoment übertragen, vergleiche Bild 4. Bei einer korrekten Funktionsweise übertragen die Kugeln bis zu einem definierten Grenzwert das Drehmoment von der Nabe (1) auf den Flanschring (2). Im Überlastfall rotieren Nabe (1) und Flanschring (2) relativ zueinander, was die Kugeln (3) aus ihren Rastpunkten (RP) drückt. In diesem Zustand kann kein Drehmoment übertragen werden,

vergleiche Bild 4 (b). Die Drehbewegung wird in Folge der Überlastfunktion in eine axial translatorische Bewegung entkoppelt. Das Robustheitsmaß (Zielgröße) ist die Funktion innerhalb eines übertragbaren, normierten Drehmoments von $1,0 \pm 0,2$ [-].

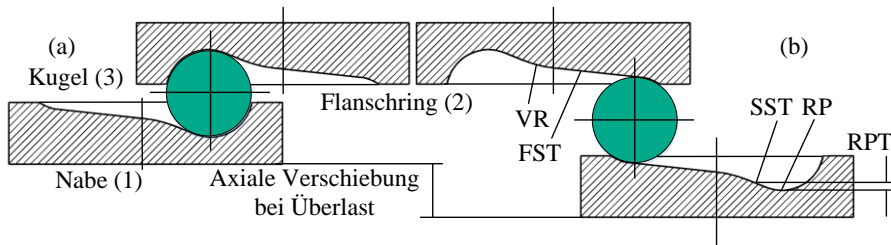


Bild 4: Überlastkupplung im unbestätigtem (a) und betätigtem (b) Zustand

3.2 Degradationsermittlung

Die Umsetzung der Verschleißsimulation findet mittels *FE* statt. Der Grundgedanke besteht

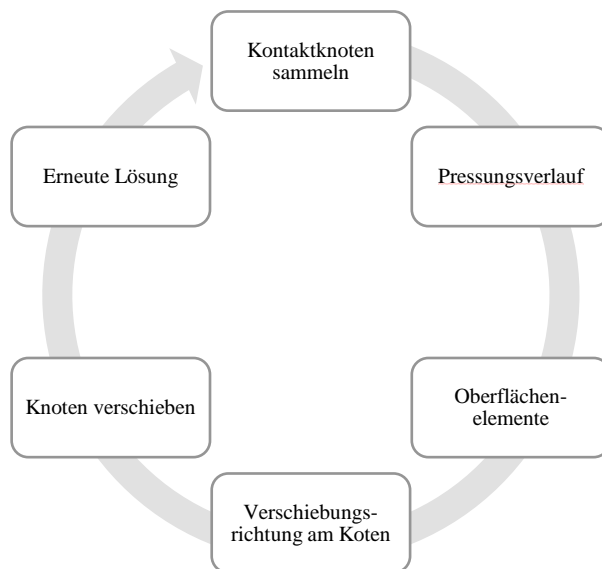


Bild 5: Schematische Vorgehensweise zur Degradationssimulation

darin, alle Knoten des *FE*-Netzes zu sammeln, die während der gesamten Bewegung Kontakt mit den Kugeln erfahren. Diese Knoten sollen in die Wirkrichtung der Pressung in das Bauteilinnere verschoben werden. Die Vorgehensweise ist in Bild 5 aufgezeigt. Der Verschleiß in Form von Materialverlust wird durch Netzknoten-Verschiebung realisiert. Mit den aus der *FE*-Simulation erhaltenen Pressungswerten kann eine einfache Simulation des Materialabtrags aufgrund von adhäsiven Verschleiß modelliert werden. Hierfür werden Derivate des Archard'schen Verschleißmodells nach [17,18] angewandt. Weitere Informationen zur Umsetzung und Anwendung der Verschleißsimulation siehe [19].

3.3 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach dem *Robust Design*, der Verschleißsimulation der Bahnkontur und der Validierung der Überlastkupplung kategorisiert vorgestellt.

3.3.1 Robust Design der Überlastkupplung

Beginnend mit dem *Robust Design* der Überlastkupplung ist ein Design definiert, welches mit seiner Toleranzdefinition die maximal geforderten Grenzen von $1,0 \pm 0,2 [-]$ (normiert) unter Einwirkung innerer sowie äußerer Störgrößen einhält. Dies zeigt die dargestellte Parameterstudie, vergleiche Bild 6 (a).

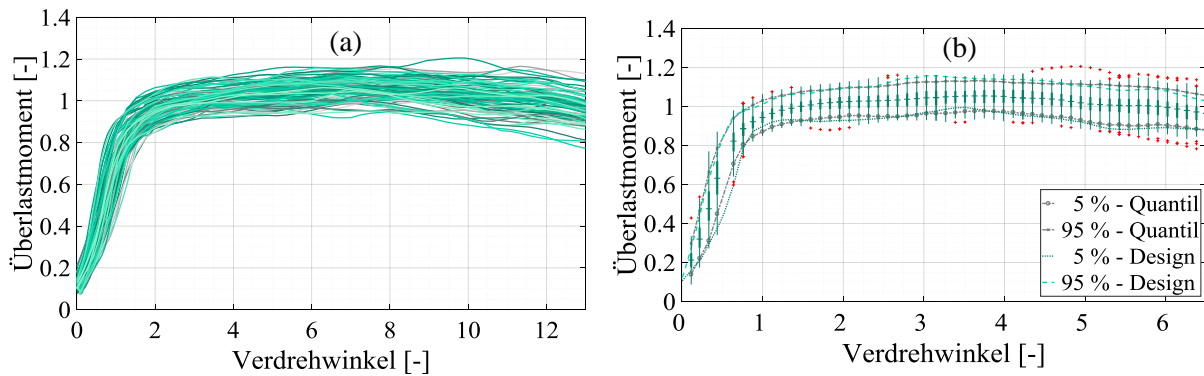


Bild 6: Überlastmoment der Kupplung: *Robust Design* (a), Quantile sowie deren Designs (b)
Für eine robuste Aussagesicherheit werden für die anschließende virtuelle Degradationsmodellierung zuerst die Verläufe der Überlastmomente des *Robust Design* diskretisiert und je Diskretisierungspunkt x ein $p = 5\%$ und $p = 95\%$ - Quantil mittels *Linearer Interpolation* für $n = 150$ Designs aus Bild 6 (a) bestimmt:

$$x_{[(n-1)p+1]} + ((n-1)p + 1 - [(n-1)p + 1])(x_{[(n-1)p+1]} + 1 - x_{[(n-1)p+1]}) .$$

Für die Zuordnung des jeweiligen Quantil zum entsprechenden Design, wird die Methode der *Kleinsten Fehlerquadrate* der deskriptiven Statistik angewendet:

$$Q(\beta_0; \beta_1) = \sum_{i=1}^n (p_i - \hat{p}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (p_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 ,$$

substituiert mit:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{und} \quad \hat{\beta}_0 = \bar{p} - \hat{\beta}_1 \bar{x} .$$

Als Ergebnis ergibt sich aus der minimalen Fehlerquadratsumme aller diskretisierten Abstandsberechnungen der in Bild 6 (b) dargestellte Zusammenhang zwischen Quantil und resultierenden Design.

3.3.2 Degradationsergebnisse der Überlastkupplung

Wird die Degradation der Bahnkontur beider Scheiben in Bezug auf das Überlastmoment in Abhängigkeit des Verdrehwinkels aufgetragen, vergleiche Bild 7, beispielhaft für sechs Simulationen, ergibt sich mit zunehmenden Verschleiß und verschiedenen Parameterkombinationen an der Bahnkontur ein stetig zunehmendes (a) und ein stetig abnehmendes (b) Überlastmoment sowie ein sich änderndes Verhalten der Merkmale.

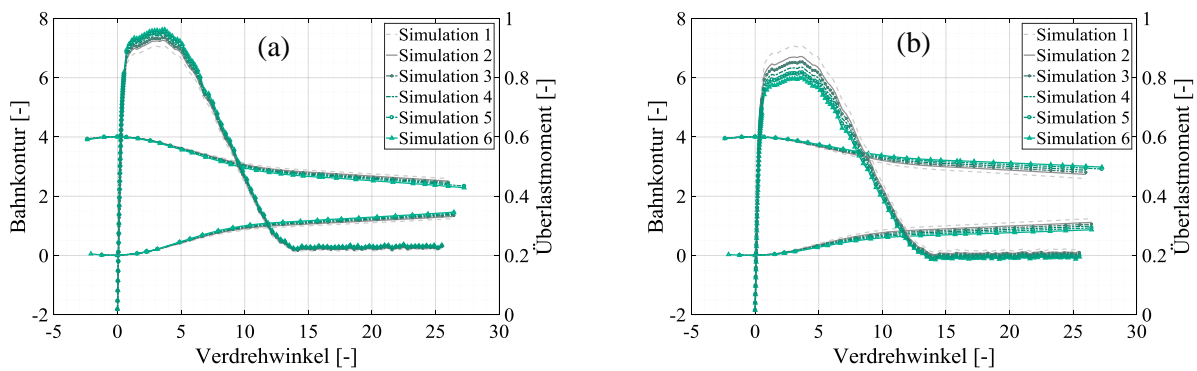


Bild 7: Degradation der Bahnkontur in Bezug auf das resultierende abnehmende (a) und zunehmende (b) Überlastmoment

Der Grund hierfür wird durch die Betrachtung der Degradationsmerkmale der Bahnkontur (*Rastpunkt-Radius* und *-Tiefe*, *Übergangsradius* sowie *steile* und *flache Steigung*) nachvollziehbar, vergleiche Bild 8. Es zeigt sich in allen Merkmalen eine durch die Pressung und Reibarbeit bedingte Abnahme des 95 % Designs, die ein erschwerter Übergang zur rotatorischen Entkopplung indiziert und folglich zu einem zunehmenden Überlastmoment führt. Die Abnahme des 5 % und des Nominal-Designs ergibt sich aufgrund deren Parameterkombination, die eine wechselseitige Beeinflussung auf die Merkmale haben.

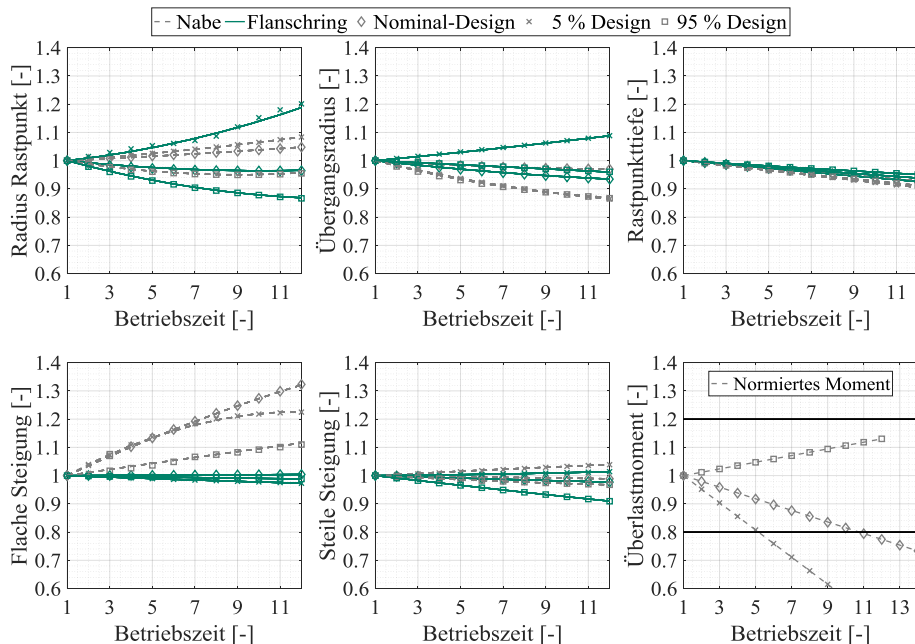


Bild 8: Normierte Degradation des Nominal- und der Quantil-Designs der Bahnkontur-Parameter der Nabe und des Flanschring und des maximalen Überlastmoments

3.3.3 Validierung der Überlastkupplung

Mittels den vorhandenen Testdaten von sechs Nachstellern ist es möglich, eine erste Modellauswahl zu treffen. Nach erster Einschätzung beschreibt der lineare Modellansatz

(*Simple-Constant-Rate*) nach [7], vergleiche Tabelle 1, den Degradationspfad. Nach dem festgelegten *EOL*-Kriterium können via Monte-Carlo (*MC*)-Simulation und Extrapolation zur Generierung weiterer Degradationspfade der Daten sogenannte *Pseudo-Ausfallzeiten* generiert werden, vergleiche Bild 9. Eine Validierung des Degradationsmodells von realer und virtueller Erprobung kann aus dem Vergleich des normierten Überlastmoments aus Bild 8 und Bild 9 (a) geschlossen werden. Beide Modelle stimmen sowohl im Modell als auch in deren zeitlichen Verhalten überein, vergleiche hierzu vorab das Überlastmoment in Verhältnis zum Nominal-Design in Bild 10.

4. Virtuelle Degradationsmodellierung und Ergebnisinterpretation

Die Schlussfolgerung aus der Simulation zeigt sich in der Validierung der sechs Nachsteller sowie in der *MC*-Simulation, vergleiche Bild 9 und Bild 10. Die realen Versuche weisen sowohl zunehmende als auch abnehmende Überlastmomente auf. Der Streubereich verdeutlicht diesen Trend. Werden die *EOL*-Kriterien betrachtet ergibt sich eine B_5 - Lebensdauer beziehungsweise ein 5% - Quantil für die untere Ausfallgrenze bei einer normierten Betriebszeit von 4,06 [-] und eine obere Ausfallgrenze von 6,81 [-].

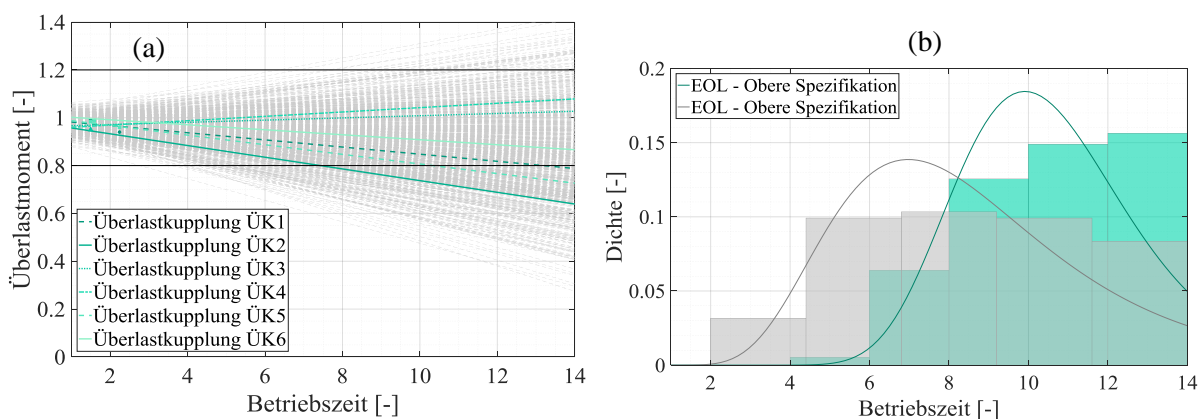


Bild 9: Extrapolation des Überlastmodells zum *EOL* mittels *MC*-Simulation

Zur Überprüfung der Hypothese aus Kapitel 2.2 wird auf Basis der Quantil-Designs sowie dem Nominal-Design der virtuellen Degradations-Simulation eine Aussagesicherheit zum Zeitpunkt des *EOL* prognostiziert. Bild 10 zeigt die Simulation des jeweiligen Momentverlaufs. Es sind sowohl die Quantil- und Nominal-Designs der *MC*-Simulation auf Basis der realen Versuche aus Bild 9 (a), als auch die virtuelle Degradations-Simulation zusammengefasst. Es wird deutlich, dass alle Designs innerhalb der Degradation der Quantil-Designs liegen beziehungsweise mit konservativeren Ansatz diese umhüllen. Es ergibt sich ein 5% - Quantil für die untere Ausfallgrenze bei einer normierten Betriebszeit von 3,95 [-] und eine obere Ausfallgrenze von 6,05 [-]. Dies sind im Vergleich zur *MC*-Simulation auf Basis der realen Versuche eine um 3,5%ige beziehungsweise um 12,6%ige konservativere Betrachtung.

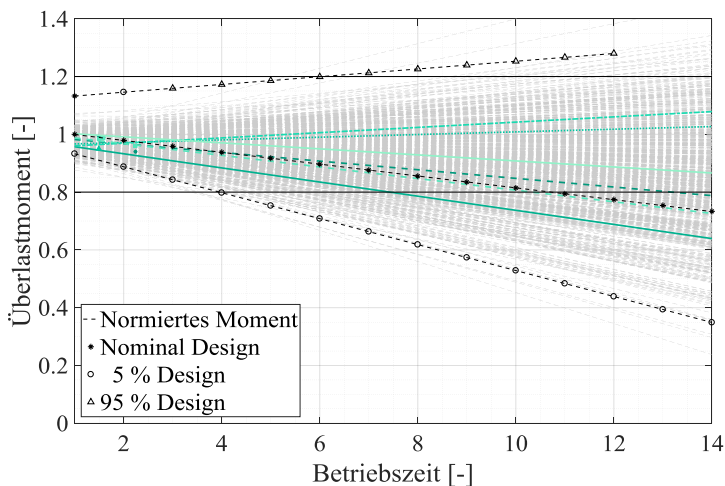


Bild 10: Virtuelle Degradation mit Design-Grenzen als Aussagesicherheit im Vergleich zur realen Erprobung

Die aufgestellte Hypothese zur Definition von Quantil-Designs aus den *Robust Designs* einer virtuellen Degradations-Simulation umfassen zum Zeitpunkt des *EOL*-Kriteriums die Aussagesicherheit zum jeweiligen Quantil, kann folglich bestätigt werden. Entsprechend ist eine integrale Betrachtung der *Robusten Zuverlässigkeit* des vorgestellten Anwendungsbeispiels gegeben.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Lebensdaueranalyse auf Basis von multidimensionaler Zuverlässigkeits- und *Robust Design* Simulation am Beispiel einer Überlastkupplung für Nutzfahrzeuggremssysteme vorgestellt. Die zu Beginn durchgeführte *Robust Design* Untersuchung beschreibt die Quantil- und Nominal-Designs zum Auslegungszeitpunkt vor Inbetriebnahme. Die anschließende virtuelle Degradations-Simulation zeigt, aufgrund der bestehenden Wechselwirkung der Degradationsmerkmale auf den Verlauf der Degradationspfade, ein sich zu- und abnehmendes Momentverhalten. Dieses wird durch die anschließenden realen Versuche und der darauf aufbauenden *MC*-Simulation unter Beweis gestellt. Diese realen Degradationspfade verlaufen innerhalb der Quantil-Designs. Dies bedeutet einerseits eine Bestätigung der aufgestellten Hypothese sowie eine ausreichende und konservative Abdeckung der virtuellen Degradations-Simulation anhand von Quantil- und Nominal-Designs. Dies erlaubt dem Entwickler frühzeitig eine robuste und zuverlässige Auslegung der Produkte sowie eine gezielte Versuchsplanung.

Literaturverzeichnis

- [1] Bertsche, B.; Lechner, G.: Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007.
- [2] Doksum, K. A.: Degradation Rate Models for Failure Time and Survival Data. CWI Quart, Nr. 4, S. 195-203, 1991.

- [3] Meeker, W.; Escobar, L.: Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution. *Technometrics*, 40. Jg., Nr. 2, S. 89-99, 1998.
- [4] Hamada, M.: Using statistically designed experiments to improve reliability and to achieve robust reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 44. Jg., Nr. 2, S. 206-215, 1995.
- [5] Lu, J.-C.; Park, J.; Yang, Q.: Statistical inference of a time-to-failure distribution derived from linear degradation data. *Technometrics*, 39. Jg., Nr. 4, S. 391-400, 1997.
- [6] Nelson, W.: *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- [7] Carey, M.; Koenig, R.: Reliability assessment based on accelerated degradation: A case study. *IEEE Transactions on Reliability*, 40. Jg., Nr. 5, S. 499-506, 1991.
- [8] Lu, J.-C.; Meeker, W.; Escobar, L.: A comparison of degradation and failure-time analysis methods for estimating a time-to-failure distribution. *Statistica Sinica*, S. 531-546, 1996.
- [9] Chiao, C.-H.; Hamada, M.: Analyzing experiments with degradation data for improving reliability and for achieving robust reliability. *Quality and Reliability Engineering International*, 17. Jg., Nr. 5, S. 333-344, 2001.
- [10] Boulanger, M.; Escobar, L.: Experimental design for a class of accelerated degradation tests. *Technometrics*, 36. Jg., Nr. 3, S. 260-272, 1994.
- [11] Winsor, C.: The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the national academy of sciences*, 18. Jg., Nr. 1, S. 1-8, 1932.
- [12] Reliasoft: *Reliability growth & repairable system data analysis*. Reliasoft Corp., 2015.
- [13] Davidovic, V.: *Reliability Physics and Engineering: Time-to-Failure Modeling*, JW McPherson. Springer, 2012.
- [14] Pandey, M.; Yuan, X.; Van Noortwijk, J.: Gamma process model for reliability analysis and replacement of aging structural components. *Proceedings ICOSAR*, Rome, 2005.
- [15] O'Connor, P.; Kleyner, A.: *Practical Reliability Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [16] Kemmler, S.; Eifler T.; Bertsche B.: *Development of robust, reliable products and processes - using the methodology of Robust Reliability* (in print).
- [17] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibung*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [18] Thompson, J.; Thompson, M.: A Proposal for the Calculation of Wear. *International ANSYS Users Conference & Exhibition*, 2006.
- [19] Dazer, M.; Kemmler, S.; Bertsche, B.: Wear simulation of an overload clutch. *WEAR*, 2017 (in print).