

Entwicklung Effizienter Multivariater Lebensdauertests

Developing Efficient Multivariate Lifetime Tests

Der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte
Abhandlung

von
Marco Arndt, M.Sc.
aus Ravensburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Dazer
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mit Berichter

Tag der mündlichen Prüfung:

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2026

Vorwort

Thanks for your service.

Kurzfassung/Abstract

Das ist die Kurzfassung für die Diss.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung/Abstract	v
Abkürzungsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsperspektive und Problembeschreibung	2
1.2 Beitrag dieser Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie	5
2.1.1 Begriffe und Definitionen	5
2.1.2 Deskriptive Statistik für Lebensdauerdaten	5
2.1.3 Parameterschätzverfahren	5
2.2 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung	5
2.2.1 Grundbegriffe der statistischen Versuchsplanung	5
2.2.2 Statistische Lebensdauer-Versuchspläne	5
2.2.3 Statistische Modellbildung	5
3 Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Planung von ausfallbasierten Lebensdauertests mit mehreren Faktoren	7
3.1 Bewertung des Standes der Forschung und Technik	7
3.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit	7

4	Parameter-Screening für multifaktorielle Lebensdauertests	9
4.1	Identifikation potenzieller Einflussgrößen	9
4.2	Kreativmethoden zum Auswahlprozesse im Parameter-Screening	9
4.3	Randbedingungen in der Parameterauswahl für die Zuverlässigkeits- modellierung	9
4.4	Vorgehen zum heuristische Screening für die Zuverlässigkeitsmodel- lierung	9
4.5	Zusammenfassung	9
5	Effiziente multivariate Versuchspläne für Lebensdaueruntersuchun- gen	11
6	Fallstudie	13
7	Zusammenfassung und Ausblick	15
7.1	Key Findings	15
7.2	Diskussion	15
7.3	Ausblick	15
	Literatur	17
	Anhang	29
A	Ein Anhang	29
A.1	Unteranhang 1	29

Abkürzungsverzeichnis

ALT	Accelerated Lifetime Testing
DoE	Design of Experiments
ECU	Electronic Control Unit

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Die Absicherung technischer Produkte und Systeme hinsichtlich ihrer Funktionalität bildet einen zentralen Bestandteil der ingenieurwissenschaftlichen Verantwortlichkeiten im Produktentwicklungsprozess. Motiviert durch Produktversprechen gegenüber der potenziellen Käuferschaft sowie bestehender Kunden, zur Wahrung des Selbstverständnisses einer Marke oder rein aufgrund regulatorischer Vorgaben soll hier im Kontext des vorgesehenen Einsatzzweckes Zuverlässigkeitsmanagement betrieben werden. So wird auch insbesondere Kundensicht aus dabei erwartet, dass ein (technisches) Produkt - ein Fahrzeug, ein Smartphone, eine Photovoltaikanlage - seine Funktionalität mindestens zum Gewährleistungs- oder Garantiezeitraum uneingeschränkt erfüllt.

Über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg unterstützen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik dabei, diese Anforderungen systematisch zu erfüllen. Verfahren aus dem Bereich „Safety“, explorative Datenanalysen zur Untersuchung der Produktperformance im Betrieb oder Test, effiziente Versuchsplanung zum Nachweis der Lebensdauer am Design, Methoden der beschleunigten Versuchsplanung, engl. [Accelerated Lifetime Testing \(ALT\)](#), der Aufbau probabilistischer Lebensdauermodelle sowie das Risikomanagement im Allgemeinen eignen sich für diese Herausforderung. Das zentrale Ergebnis liegt in der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit als Komplement zur Zuverlässigkeit - also der Wahrscheinlichkeit, dass ein entwickeltes Produkt unter den definierten Randbedingungen eine vorgegebene Zeitdauer ohne funktionskritischen Ausfall übersteht [1]. Üblicherweise soll so nachgewiesen werden, dass das Erzeugnis dem Einfluss einer bestimmten Belastung - beispielsweise einer physikalischen oder elektrischen Kraft, einem Wärmeeintrag oder der Exposition gegenüber einer chemischen Beanspruchung - standhält. Gelingt in der Praxis keine hinreichend genaue Quantifizierung dieser probabilistischen Metrik, so liegen die Ursachen jedoch nicht zwangsläufig allein in ökonomischen Einschränkungen wie dem Zeit- und Kostenbudget für ein erforderliches Testing oder einem

fehlenden methodischen Know-how - vielmehr könnten *mehrere* Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit einwirken und sogar Wechselwirkungen ausprägen, ohne dass dies adäquat wahrgenommen oder antizipiert wird. Moderne Produkte können schlichtweg durch multivariat bedingte Fehlermechanismen ausfallen.

1.1 Forschungsperspektive und Problembeschreibung

Da trotz genannter Umstände die Kundenanforderungen und Garantiebedingungen üblicherweise als unveränderlich, teils sogar als zunehmend anspruchsvoll zu verstehen sind, werden Unsicherheiten in der Lebensdauerabsicherung dann meist nur durch präventive Wartungsstrategien, durch Tolerierung von Restrisiken oder durch die Inkaufnahme nachträglicher Schadensbegrenzung behandelt. Der zugrunde liegende Gedanke: ehe ein Produkt, dessen Lebensdauerverhalten nicht quantifizierbar verstanden ist, einen kritischen Verschleißzustand erreicht, wird es im Rahmen eines festgelegten Wartungsintervalls vorsorglich ersetzt. Dabei könnte zugrunde liegen, dass schlichtweg kein physikalisches Modell oder eine ausreichend ausgeprägte empirische Datengrundlage vorhanden ist. Führt auch diese Vorsorge zu erheblichen Regress- oder Kulanzkosten, müssen ausfallschutzorientierte Maßnahmen - bis hin zu Rückrufaktionen - frühzeitig eingeplant und umgesetzt werden, um Image- und Kostenrisiken (wenn auch selten nachhaltig) zu minimieren. Um jenes zu vermeiden, muss also bereits im Vorfeld den verschiedensten Randbedingungen mithilfe der Zuverlässigkeitstechnik begegnet werden. Besonders komplexe Randbedingungen lassen sich beispielsweise durch eine hochgradige Integration von Elektrifizierung und Digitalisierung, verkürzte Entwicklungszyklen, verschärfter Kostendruck, sich per se verändernde Prioritäten, wandelnde Materialauswahl und -komposition, leistungsoptimierte Belastungsszenarien, intensivierete Einsatzbedingungen und nicht zuletzt eine effiziente Ressourcennutzung innerhalb eines Produkts beschreiben - um nur einige zu nennen. Ein einfaches Beispiel verdeutlicht dies: Der komfortable sowie ausfallfreie Betrieb eines Fahrzeugs soll einerseits gegenüber verschiedensten Schadensursachen gewährleistet werden; andererseits hängt er inzwischen maßgeblich vom Funktionserhalt einer bis zu dreistelligen Anzahl an [Electronic Control Units \(ECUs\)](#) ab - während in der jüngeren Vergangenheit noch

eine geringe bis mittlere zweistellige Anzahl mit nur begrenztem Funktionsumfang üblich war [2]. Oder aber der störungsfreie Betrieb digitale Services setzt bei Zentralisierung von ECU-Funktionen die performante Funktionsfähigkeit einer Traktionsbatterie voraus, durch deren chemische Alterung sich jedoch zeitgleich wiederum weitere Unsicherheiten eingliedern können. Ein damit betrachtetes System bildet somit ein vielfältig komplexeres Netzwerk aus teils wechselwirkenden oder direkten Eigenschaften, die zu einem Versagen führen könnten. Damit kann festgehalten werden: Produktdesigns werden angesichts steigender Kundenanforderungen zunehmend raffinierter und im Sinne des Effizienzgedankens optimiert (z.B. durch mehr Sensorik, Rechenleistung und fortschrittliche Assistenzsysteme), gleichzeitig wird jedoch die Art und Weise eines möglichen Funktionsverlustes zunehmend komplexer. Somit rückt die Fähigkeit, Prognosen über die Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von mehreren Einflussgrößen treffen zu können, zunehmend in den unternehmerischen Fokus für strategische Entscheidungen. Über die klassische Testplanung im Rahmen der Zuverlässigkeitstechnik hinaus erfordert dies also Methoden der statistischen Versuchsplanung bei gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren auf die Lebensdauer. Methoden wie ALT und die Lebensdauermodellbildung behalten dabei weiterhin ihre Relevanz und bilden einen unverzichtbaren Bestandteil einer fundierten Teststrategie.

1.2 Beitrag dieser Arbeit

Ausgehend von der beschriebenen Problemstellung lässt sich der übergeordnete Beitrag dieser Arbeit wie folgt formulieren: Liegt ein komplexes technisches System vor und soll dieses hinsichtlich seiner Lebensdauer empirisch untersucht werden, um fundierte Prognosen über die Funktionalität im Betrieb treffen zu können, so müssen mehrdimensionale Lebensdaueruntersuchungen nach dem Prinzip des *Design of Experiments (DoE)* geplant werden. Neben der bloßen Implementierung von mehrdimensionalen Tests für die Lebensdauererprobung berücksichtigt dieser Ansatz damit:

- eine effiziente Methodik zur gezielten Vorauswahl relevanter Faktoren aus der Gesamtheit potenzieller Systemparameter - mit dem Ziel, deren signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer zu untersuchen;

- die Auswahl geeigneter Strategien und passender Testpläne zur statistisch abgesicherten Quantifizierung von Einflüssen auf die Lebensdauer, in Kombination mit konventionellen Zuverlässigkeitsmethoden wie beispielsweise ALT;
- eine präzise Parameterschätzung zur mathematischen Beschreibung der Effekte auf Basis der als signifikant identifizierten Einflussgrößen;
- die Bilanzierung geeigneter Testpläne im Vergleich zu etablierten, in der Literatur bereits umfangreich diskutierten Versuchsplänen, insbesondere hinsichtlich potenzieller Abweichungen bei nicht-normalverteilten Daten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der allgemeine inhaltliche Aufbau der vorliegenden Arbeit kann **Abb. 1** entnommen werden. So folgt auf die in diesem Abschnitt beschriebene Problemstellung sowie Ausführung über den generellen Beitrag der Arbeit weiter in Kapitel 2 der relevante Stand aus aktueller Forschung und Literatur. Kapitel 3 fasst schließlich den Forschungsbedarf zusammen und stellt das Ziel der Arbeit, aus der sich die relevanten Forschungsfragen ergeben, konkret heraus. Kapitel 4 beinhaltet die Vorstellung zu effizienten, qualitativen Screeningmethoden. Hier werden die herausgearbeiteten Vorschläge zu einer Auswahl an heuristischen Methoden für die Selektion der perspektivisch wenig relevanten Faktoren für die Umsetzung in der experimentellen statistischen Datenerhebung beschrieben. Weiter werden in Kapitel 5 darauf die Rahmenbedingungen für die zur statistischen Versuchsplanung neu herausgearbeiteten Versuchsplankonfigurationen für effiziente Lebensdauertests abgeglichen und schließlich bewertet. Als Ergebnis sind neben neuen, effizienten Versuchsplänen auch die relevanten Merkmale beschrieben, die es bedarf, um Versuchspläne im Kontext von Lebensdauertests zu bewerten. **Kapitel 6**. Abschließend stellt Kapitel 7 eine Zusammenfassung über die methodische Herangehensweise und die erreichten Ergebnisse der Arbeit zusammen und ordnet diese für künftige Forschungsbestrebungen im Bereich der multivariaten Lebensdauer-Versuchsplanung ein.

2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel stellt die für diese Arbeit erforderlichen technischen und methodischen Grundlagen bereit. Zunächst werden zentrale Begriffe und Konzepte der Zuverlässigkeitstechnik (Abschnitt 2.1.1) sowie grundlegende statistische Verfahren zur Lebensdauer-Datenanalyse in Kombination mit Versuchsplänen erläutert. Darauf aufbauend folgen die Einführung und die Einordnung von DoE sowie multivariater Lebensdauermodellierung aus dem Stand der Technik und Forschung, die beide für die Entwicklung effizienter Lebensdauerversuchspläne maßgeblich sind. Dies umfasst insbesondere typische Versuchspläne im Kontext der Lebensdauererprobung sowie Metriken und Indikatoren zur Bewertung der Pläne.

2.1 Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie

2.1.1 Begriffe und Definitionen

2.1.2 Deskriptive Statistik für Lebensdauerdaten

2.1.3 Parameterschätzverfahren

2.2 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung

2.2.1 Grundbegriffe der statistischen Versuchsplanung

2.2.2 Statistische Lebensdauer-Versuchspläne

2.2.3 Statistische Modellbildung

3 Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Planung von ausfallbasierten Lebensdauertests mit mehreren Faktoren

3.1 Bewertung des Standes der Forschung und Technik

3.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit

4 Parameter-Screening für multifaktorielle Lebensdauertests

4.1 Identifikation potenzieller Einflussgrößen

4.2 Kreativmethoden zum Auswahlprozesse im Parameter-Screening

4.3 Randbedingungen in der Parameterauswahl für die Zuverlässigkeitsmodellierung

4.4 Vorgehen zum heuristische Screening für die Zuverlässigkeitsmodellierung

4.5 Zusammenfassung

5 Effiziente multivariate Versuchspläne für Lebensdaueruntersuchungen

6 Fallstudie

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Key Findings

7.2 Diskussion

7.3 Ausblick

Literatur

- [1] B. Bertsche und M. Dazer. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 4. Auflage. Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. ISBN: 978-3-662-65023-3. URL: <http://www.springer.com/>.
- [2] *DAT Report 2025: Kurzbericht*. Ostfildern, Deutschland, Februar 2025. URL: https://www.dat.de/fileadmin/protected/DAT_Report/2025/DAT-Report-2025-Kurzbericht.pdf.
- [3] *VDI Richtlinie Riemengetriebe*.
- [4] C. Gundlach. „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung des statistischen Versuchsplanung“. Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2004. Kassel. URL: <http://d-nb.info/971843546/34>.
- [5] *Synchronous belts: Calculation of power rating and drive centre distance*.
- [6] *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019)*. Hannover, 2019.
- [7] *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2019. ISBN: 978-1-5386-6554-1.
- [8] *Proceedings of the 16th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM16)*. Honolulu, HI, USA, 2022.
- [9] *2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2022. ISBN: 978-1-6654-2432-5.
- [10] *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*. Southampton, UK, 2023.
- [11] *Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management & Asian Symposium on Risk Assessment and Management (PSAM17 & ASRAM2024)*. Sendai, Japan, 2024.

- [12] 2024 *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2024. ISBN: 979-8-3503-0769-6.
- [13] 2025 *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2025. ISBN: 979-8-3503-6774-4.
- [14] H. Ahn. „Central Composite Design for the Experiments with Replicate Runs at Factorial and Axial Points“. In: *Industrial Engineering* 349 (2015), S. 969–979.
- [15] S. Albers. *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement: Strategie — Umsetzung — Controlling*. SpringerLink Bücher. Wiesbaden und s.l.: Gabler Verlag, 2005. ISBN: 978-3-322-90787-5. DOI: [10.1007/978-3-322-90786-8](https://doi.org/10.1007/978-3-322-90786-8).
- [16] J. Antony. *Design of experiments for engineers and scientists*. Repr. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2010. ISBN: 9780750647090. DOI: [10.1016/B978-0-7506-4709-0.X5000-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4709-0.X5000-5).
- [17] M. K. Ardakani, D. Das, S. S. Wulf und T. J. Robinson. „Estimation in Second-Order Models with Errors in the Factor Levels“. In: *Commun. in Statistics* 40.9 (2011), S. 1573–1590. DOI: [10.1080/03610921003637421](https://doi.org/10.1080/03610921003637421).
- [18] M. Arndt, M. Dazer, J. Rötting und B. Bertsche. „Probabilistic Reliability Analysis of Screw Connections in Cast Aluminum Housings“. In: *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)*. Hrsg. von B. Castanier. Chennai: Research Publishing Services, 2021, S. 2791–2798. ISBN: 978-981-18-2016-8. DOI: [10.3850/978-981-18-2016-8{\textunderscore}318-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8{\textunderscore}318-cd).
- [19] M. Arndt, P. Mell und M. Dazer. „Generic effects of deviations from test design orthogonality on test power and regression modelling of Central-Composite Designs“. In: *Proceedings of the 16th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM16)*. Bd. PSAM 16. Honolulu, HI, USA, 2022.
- [20] M. Arndt, M. Dazer und B. Bertsche. „Reliability-Based Decision Methodology for Stress-Strength Optimization of Machine Components“. In: *2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2022, S. 1–6. ISBN: 978-1-6654-2432-5. DOI: [10.1109/RAMS51457.2022.9894019](https://doi.org/10.1109/RAMS51457.2022.9894019).

-
- [21] M. Arndt und M. Dazer. „Analysis of Efficiency in Response Surface Designs Considering Orthogonality Deviations and Cost Models“. In: *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*. Southampton, UK, 2023.
- [22] M. Arndt und I. M. Dazer. „Analysis of Efficiency in Response Surface Designs Considering Orthogonality Deviations and Cost Models“. In: *European Conference on Safety and Reliability (ESREL), 3rd September - 7th September 2023*. Hrsg. von M. P. Brito, T. Aven, P. Baraldi, M. Čepin und E. Zio. Singapore: Research Publishing Services, 2023, S. 1167–1174. ISBN: 978-981-18-8071-1. DOI: [10.3850/978-981-18-8071-1{\textunderscore}P160-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1{\textunderscore}P160-cd).
- [23] M. Arndt, M. Dazer, W. Raither und B. Bertsche. „Parameter assessment for reliability modeling of machine components using heuristic screening“. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 87.4 (2023), S. 1347–1370. ISSN: 0015-7899. DOI: [10.1007/s10010-023-00711-5](https://doi.org/10.1007/s10010-023-00711-5).
- [24] M. Arndt und M. Dazer. „Investigating Practical Orthogonality Deviations in RSM for Optimized Predictive Reliability Modeling“. In: *2024 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2024, S. 1–6. ISBN: 979-8-3503-0769-6. DOI: [10.1109/RAMS51492.2024.10457825](https://doi.org/10.1109/RAMS51492.2024.10457825).
- [25] M. Arndt und M. Dazer. „Characteristics of Extrapolation-Optimized Response Surface Designs for Multivariate Reliability Modelling and Lifetime Prediction“. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management & Asian Symposium on Risk Assessment and Management PSAM17 & ASRAM2024* (2024).
- [26] M. Arndt und M. Dazer. „Investigating Practical Orthogonality Deviations in RSM for Improved Predictive Reliability Modeling“. In: *2024 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Bd. RAMS 2024. IEEE, 2024. ISBN: 979-8-3503-0769-6.
- [27] M. Arndt, E. Rittmaier und M. Dazer. „Assessing the Extrapolation Variance of Non-Orthogonal Response Surface Designs“. In: *2025 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2025, S. 1–6. ISBN: 979-8-3503-6774-4. DOI: [10.1109/RAMS48127.2025.10935022](https://doi.org/10.1109/RAMS48127.2025.10935022).

- [28] A. C. Atkinson, A. N. Donev und R. D. Tobias. *Optimum Experimental Designs, with SAS*. 1st. New York: Oxford University Press Inc, 2007. ISBN: 9780199296590.
- [29] B. Bertsche. *Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of component and system reliability*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-33969-4. DOI: [10.1007/978-3-540-34282-3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34282-3).
- [30] G. E. P. Box und J. S. Hunter. „Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces“. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 28.1 (1957), S. 195–241.
- [31] G. E. P. Box und D. W. Behnken. „Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables“. In: *Technometrics* 2 (1960), S. 455–475. ISSN: 0040-1706.
- [32] G. E. P. Box und N. R. Draper. *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. 2. ed. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2007. ISBN: 9780470053577. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0826/2006043975-b.html>.
- [33] A. Breiing und R. Knosala. *Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Berlin und Heidelberg: Springer, 1997. ISBN: 978-3-642-63908-1. DOI: [10.1007/978-3-642-59229-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59229-4).
- [34] M. P. Brito, T. Aven, P. Baraldi, M. Čepin und E. Zio, Hrsg. *European Conference on Safety and Reliability (ESREL), 3rd September - 7th September 2023: The topic of ESREL 2023 is "The Future of Safety in a Reconnected World".; We are delighted to announce ESREL2023, the 33rd European Safety and Reliability Conference. The conference will be held at the University of Southampton, United Kingdom, on 3 -7 September 2023*. Singapore: Research Publishing Services, 2023. ISBN: 978-981-18-8071-1. DOI: [10.3850/978-981-18-8071-1-4procd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1-4procd).
- [35] C. Brückner. *Qualitätsmanagement: Das Praxishandbuch für die Automobilindustrie*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2019. ISBN: 978-3-446-45575-7. DOI: [10.3139/9783446459724](https://doi.org/10.3139/9783446459724).
- [36] T. Buzan und B. Buzan. *The mind map book: Unlock your creativity, boost your memory, change your life*. 1. publ. Harlow u.a.: Pearson, BBC Active, 2010. ISBN: 9781406647167. URL: <https://permalink.obvsg.at/AC11808619>.

-
- [37] R. J. Carrol, D. Ruppert, L. A. Stefanski und C. M. Crainiceanu. *Measurement Error in Nonlinear Models: A Modern Perspective*. 2nd. Chapman & Hall/CRC, 2006. ISBN: 9780429139635.
- [38] B. Castanier, Hrsg. *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021): 19-23 September 2021, Angers, France*. Chennai: Research Publishing Services, 2021. ISBN: 978-981-18-2016-8. DOI: [10.3850/978-981-18-2016-8](https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8).
- [39] D. E. Coleman und D. C. Montgomery. „A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment“. In: *Technometrics* 35.1 (1993), S. 1. ISSN: 0040-1706. DOI: [10.2307/1269280](https://doi.org/10.2307/1269280).
- [40] H. Colsman. *Qualitätstechniken: Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung*. 5. Auflage. Pocket Power. München: Hanser Verlag, 2013. ISBN: 9783446437425. DOI: [10.3139/9783446437425](https://doi.org/10.3139/9783446437425).
- [41] M. Dazer, M. Stohrer, S. Kemmler und B. Bertsche. „Planning of reliability life tests within the accuracy, time and cost triangle“. In: *2016 IEEE Accelerated Stress Testing & Reliability Conference (ASTR)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 1–9. ISBN: 978-1-5090-1880-2. DOI: [10.1109/ASTR.2016.7762270](https://doi.org/10.1109/ASTR.2016.7762270).
- [42] M. Dazer, A. Grundler, A. Benz, M. Arndt und P. Mell. „Pitfalls of Zero Failure Testing for Reliability Demonstration“. In: *Proceedings of the 32st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)*. Hrsg. von M. C. Leva, L. Podofillini, E. Patelli und S. Wilson. Chennai: Research Publishing Singapore, 2022, S. 1639–1646. ISBN: 978-981-18-5183-4. DOI: [10.3850/978-981-18-5183-4](https://doi.org/10.3850/978-981-18-5183-4).
- [43] A. N. Donev. „Design of experiments in the presence of errors in factor levels“. In: *Statistical Planning and Inference* 126.2 (2004), S. 569–585.
- [44] S. D. Eppinger. *Design structure matrix methods and applications*. Engineering systems. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2012. ISBN: 9780262301428. DOI: [10.7551/mitpress/8896.001.0001?locatt=mode:legacy](https://doi.org/10.7551/mitpress/8896.001.0001?locatt=mode:legacy).
- [45] L. A. Escobar und W. Q. Meeker. „Planning Accelerated Life Tests with Two or More Experimental Factors“. In: *Technometrics* 37.4 (1995), S. 411–427. ISSN: 0040-1706.

- [46] R. A. Fisher. *The Design of Experiments*. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1935.
- [47] G. E. P. Box und K. B. Wilson. „On the Experimental Attainment of Optimum Conditions“. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 13.1 (1951), S. 1–45. ISSN: 00359246. URL: <http://www.jstor.org/stable/2983966> (besucht am 23.03.2023).
- [48] G. E. P. Box. „The Effects of Errors in the Factor Levels and Experimental Design“. In: *Technometrics* 5.2 (1963), S. 247–262. ISSN: 0040-1706. URL: <http://www.jstor.org/stable/1266066> (besucht am 23.03.2023).
- [49] J. Gharajedaghi. *Systems thinking: Managing chaos and complexity : a platform for designing business architecture*. 3rd ed. Burlington, MA: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2011. ISBN: 9780123859150. DOI: [10.1016/C2010-0-66301-2](https://doi.org/10.1016/C2010-0-66301-2).
- [50] A. Giovannitti-Jensen und R. H. Myers. „Graphical Assessment of the Prediction Capability of Response Surface Designs“. In: *Technometrics* 31.2 (1989), S. 159–171. ISSN: 0040-1706.
- [51] P. Goos und B. A. Jones. *Optimal Design of Experiments: A Case Study Approach*. 1st. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2011. ISBN: 9780470744611.
- [52] K. Hinkelmann. *Design and Analysis of Experiments - Volume 3: Special Designs and Applications*. 1st. John Wiley & Sons, Inc, 2012. ISBN: 978-0470-53068-9.
- [53] J. Hirtz, R. B. Stone, D. A. McAdams, S. Szykman und K. L. Wood. „A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts“. In: *Research in Engineering Design* 13.2 (2002), S. 65–82. ISSN: 0934-9839. DOI: [10.1007/s00163-001-0008-3](https://doi.org/10.1007/s00163-001-0008-3).
- [54] 2016 IEEE Accelerated Stress Testing & Reliability Conference (ASTR): 28-30 Sept. 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. ISBN: 978-1-5090-1880-2.
- [55] R. T. Johnson, D. C. Montgomery und B. A. Jones. „An Expository Paper on Optimal Design“. In: *Quality Engineering* 23.3 (2011), S. 287–301. ISSN: 0898-2112. DOI: [10.1080/08982112.2011.576203](https://doi.org/10.1080/08982112.2011.576203).
- [56] B. A. Jones und P. Goos. „I-Optimal Versus D-Optimal Split-Plot Response Surface Designs“. In: *Journal of Quality Technology* 44.2 (2012), S. 85–101. ISSN: 0022-4065.

-
- [57] B. A. Jones, K. Allen-Moyer und P. Goos. „A-optimal versus D-optimal design of screening experiments“. In: *Journal of Quality Technology* 53.4 (2021), S. 411–427. ISSN: 0022-4065.
- [58] A. Khuri. *Response Surface Methodology and Related Topics*. 1st. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2006. ISBN: 9789812564580.
- [59] B. Klein. *Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. 3rd ed. München: De Gruyter, 2011. ISBN: 978-3-486-71136-3. DOI: [10.1524/9783486711363](https://doi.org/10.1524/9783486711363).
- [60] W. Kleppmann. *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 9., überarbeitete Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2016. ISBN: 978-3-446-44716-5. DOI: [10.3139/9783446447172?locatt=mode:legacy](https://doi.org/10.3139/9783446447172?locatt=mode:legacy).
- [61] H. Krallmann, A. Bobrik und O. Levina. *Systemanalyse im Unternehmen: Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*. 6., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg-Verl., 2013. ISBN: 978-3-486-72982-5. DOI: [10.1524/9783486729825](https://doi.org/10.1524/9783486729825).
- [62] A. Kremer und B. Bertsche. „Methodik zur Prognose der Lebensdauer von Zahnriemengetrieben“. In:
- [63] A. Kremer und B. Bertsche. „A New Approach for Parametrizing Multidimensional Lifetime Models“. In: *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019)*. Hannover, 2019.
- [64] A. Kremer und B. Bertsche. „A Methodology for Consideration of Uncertainty in Lifetime Design of Experiments“. In: *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2019, S. 1–6. ISBN: 978-1-5386-6554-1. DOI: [10.1109/RAMS.2019.8768906](https://doi.org/10.1109/RAMS.2019.8768906).
- [65] A. Kremer. „Statistische Versuchsplanung in der Lebensdauererprobung mit Vertrauensintervallen“. Diss. 2021. DOI: [10.18419/OPUS-11728](https://doi.org/10.18419/OPUS-11728).
- [66] M. C. Leva, L. Podofillini, E. Patelli und S. Wilson, Hrsg. *Proceedings of the 32st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021): Will be held in Dublin, Ireland from 28th August - 1st September 2022*. Chennai: Research Publishing Singapore, 2022. ISBN: 978-981-18-5183-4. DOI: [10.3850/9789811851834procd](https://doi.org/10.3850/9789811851834procd).

- [67] U. Lindemann, M. Maurer und T. Braun. *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-87888-9. DOI: [10.1007/978-3-540-87889-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87889-6).
- [68] B. Mayers. *Prozeß- und Produktoptimierung mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1997. Als Ms. gedr. Bd. 97,9. Berichte aus der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker, 1997. ISBN: 3826524977.
- [69] W. Q. Meeker, L. A. Escobar und F. G. Pascual. *Statistical methods for reliability data*. Second edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, NJ: Wiley, 2022. ISBN: 978-1-118-11545-9.
- [70] P. Mell, M. Arndt und M. Dazer. „Non-orthogonality in test design: practical relevance of the theoretical concept in terms of regression quality and test plan efficiency“. In: *Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management Conference 2022 PSAM 16* (2022).
- [71] P. Mell und M. Dazer. „Estimating the Duration of Failure-Based Reliability Demonstration Tests“. In: *2024 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2024, S. 1–7. ISBN: 979-8-3503-0769-6. DOI: [10.1109/RAMS51492.2024.10457820](https://doi.org/10.1109/RAMS51492.2024.10457820).
- [72] P. Mell und M. Dazer. „Analytic Evaluation of the Statistical Power of Accelerated Reliability Demonstration Tests“. In: *IEEE Access* 13 (2025), S. 99892–99910. DOI: [10.1109/ACCESS.2025.3577366](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3577366).
- [73] M. Modarres, M. Nuri-Amiri und C. Jackson. *Probabilistic physics of failure approach to reliability: Modeling, accelerated testing, prognosis and reliability assessment*. Performability engineering series. Beverly, MA und Hoboken, NJ: Scrivener Publishing und John Wiley & Sons Inc, 2017. ISBN: 9781119388630.
- [74] D. C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. 10th. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2020. ISBN: 9781119722106.
- [75] D. C. Montgomery. *Introduction to statistical quality control*. Eighth edition, EMEA edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2020. ISBN: 9781119657118.
- [76] D. C. Montgomery, E. A. Peck und G. G. Vining. *Introduction to linear regression analysis*. Sixth edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021. ISBN: 978-1-119-57872-7.

-
- [77] R. H. Myers, D. C. Montgomery, G. G. Vining und T. J. Robinson. *Generalized Linear Models: with Applications in Engineering and the Sciences*. 2nd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2010. ISBN: 978-0-470-55697-9.
- [78] R. H. Myers, D. C. Montgomery und C. M. Anderson-Cook. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 4. Aufl. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2016. ISBN: 978-1-118-91601-8.
- [79] T. Nagel. *Zahnriemengetriebe: Eigenschaften, Normung, Berechnung, Gestaltung*. 1. Aufl. München und Wien: Hanser, 2008. ISBN: 978-3-446-41380-1.
- [80] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote. *Engineering design: A systematic approach*. 3. ed. London: Springer, 2007. ISBN: 978-1-84628-318-5. DOI: [10.1007/978-1-84628-319-2](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2).
- [81] R. Perneder. *Handbuch Zahnriementchnik: Grundlagen, Berechnung, Anwendungen*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-89321-9.
- [82] R. L. Plackett und J. P. Burman. „The Design of Optimum Multifactorial Experiments“. In: *Biometrika* 33 (1946), S. 305–325.
- [83] G. J. B. Probst und P. Gomez. *Vernetztes Denken: Ganzheitliches Führen in der Praxis*. 2., erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler, 1991. ISBN: 978-3-322-89073-3. DOI: [10.1007/978-3-322-89072-6](https://doi.org/10.1007/978-3-322-89072-6).
- [84] D. G. Raheja. „Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis, Wayne Nelson. Wiley, New York, 1989. Price: £69.95“. In: *Quality and Reliability Engineering International* 6.2 (1990), S. 160. ISSN: 0748-8017. DOI: [10.1002/qre.4680060214](https://doi.org/10.1002/qre.4680060214).
- [85] D. Rasch und D. Schott. *Mathematical statistics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2018. ISBN: 9781119385288.
- [86] A. C. Rencher und G. B. Schaalje. *Linear models in statistics*. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008. ISBN: 9780471754985. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0826/2007024268-b.html>.

- [87] E. Rittmaier, M. Arndt und M. Dazer. „Simulative Analysis of Statistical Power of Optimal Test Designs“. In: *2025 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2025, S. 1–7. ISBN: 979-8-3503-6774-4. DOI: [10.1109/RAMS48127.2025.10935086](https://doi.org/10.1109/RAMS48127.2025.10935086).
- [88] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-55742-6.
- [89] C. Spura, B. Fleischer, H. Wittel, D. Jannasch, H. Roloff und W. Matek. *Roloff/Matek Maschinenelemente*. 26. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023. ISBN: 978-3-658-40913-5. URL: <https://link.springer.com/978-3-658-40913-5>.
- [90] P. Tittmann. *Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung : mit 115 Bildern, zahlreichen Beispielen und 92 Aufgaben*. 3., aktualisierte Auflage. Mathematik-Studienhilfen. München: Hanser, 2019. ISBN: 978-3-446-46052-2. DOI: [10.3139/9783446465039](https://doi.org/10.3139/9783446465039).
- [91] R. E. Trueman. *An introduction to quantitative methods for decision making*. 2. ed. Series in quantitative methods for decision making. New York: Holt Rinehart and Winston, 1977. ISBN: 003018391X.
- [92] VDA. *Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Zuverlässigkeits-Methoden und Hilfsmittel*.
- [93] A. Wald. „On the Efficient Design of Statistical Investigations“. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 14.2 (1943), S. 134–140.
- [94] K. Wallace, G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote und L. T. M. Blessing, Hrsg. *Engineering design: A systematic approach*. 3. ed. London: Springer, 2007. ISBN: 1846283183. URL: <http://site.ebrary.com/lib/librarytitles/docDetail.action?docID=10230457>.
- [95] C.-F. Wu und M. Hamada. *Experiments: Planning, analysis and optimization*. Third edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021. ISBN: 9781119470106. URL: <https://zbmath.org/?q=an%3A1460.62003>.

- [96] H. Xu. „An Algorithm for Constructing Orthogonal and Nearly-Orthogonal Arrays with Mixed Levels and Small Runs“. In: *Technometrics* 44.4 (2002), S. 356–368. ISSN: 0040-1706.
- [97] G. Yang. *Life cycle reliability engineering*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2007. ISBN: 9780471715290. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0740/2006019150-b.html>.
- [98] A. Zahran, C. M. Anderson-Cook und R. H. Myers. „Fraction of Design Space to Assess Prediction Capability of Response Surface Designs“. In: *Journal of Quality Technology* 35.4 (2003), S. 377–386. ISSN: 0022-4065.

Anhang A Ein Anhang

Anhang A.1 Unteranhang 1