



## Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum  
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**  
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**  
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**  
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**  
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**  
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**  
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**  
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**  
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**  
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

[www.VDI-Mechatroniktagung.de](http://www.VDI-Mechatroniktagung.de)

# Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung

## Integration of design reliability models into a digital twin for use in predictive maintenance

Thorben Kaul<sup>1</sup>, Julian Hentze<sup>2</sup>, Walter Sextro<sup>1</sup>, Iris Gräßler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, Universität Paderborn, 33098 Paderborn, Deutschland, thorben.kaul@upb.de, walter.sextro@upb.de

<sup>2</sup>Lehrstuhl Produktentstehung, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 33098 Paderborn, Deutschland, julian.hentze@hni.upb.de, iris.graessler@hni.upb.de

### Kurzfassung

In der Entwicklung mechatronischer Systeme spielt die Steigerung der Verlässlichkeit und somit auch der Zuverlässigkeit und der funktionalen Sicherheit eine entscheidende Rolle. Die modellbasierte Entwicklung liefert in Kombination mit unterstützender Software einen wichtigen Beitrag zur Absicherung der Verlässlichkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. In der Nutzungsphase ermöglichen aktuelle Verfahren der Zustandsüberwachung und moderne Methoden der Regelungstechnik eine effektive Absicherung. Modelle aus der Entwicklung mechatronischer Systeme enthalten weitreichende Informationen über die Architektur, das Verhalten und die Verlässlichkeit eines Systems. Diese Modelle können als Grundlage für die Erstellung eines Digitalen Zwillings für die vorausschauende Instandhaltung verwendet und mit Zustandsdaten des realen Systems kombiniert werden. Die Nutzung der Modelle für den Digitalen Zwilling bietet weitreichende Potenziale und vereinfacht dessen Erzeugung. Die Veröffentlichung beschreibt Rahmenbedingungen der Integration und stellt die Potenziale des Digitalen Zwillings zur vorausschauenden Instandhaltung dar.

### Abstract

The development of mechatronic systems increasingly focuses on dependability aspects as reliability and functional safety. Model-based development of mechatronic systems enables for extensive dependability analysis at early design phases. During operation phase, state-of-the-art condition monitoring algorithms as well as methods of advanced control theory ensure an effective dependability investigation. The models used for development of mechatronic systems include substantial information about the architecture, behavior and dependability of the investigated system. Based on these models, a digital twin for use in predictive maintenance can be set up and combined with condition monitoring data of the real system. The integration of those models into a digital twin offers extensive potentials and supports its setup. The paper at hand describes and illustrates the integration of these models and shows the potentials that arise from the use of digital twins for predictive maintenance.

## 1 Einleitung

Die voranschreitende Digitalisierung offenbart vielfältige aufkommende Herausforderungen und Risiken. Gleichzeitig impliziert sie keimende Chancen, die mit technologie-induzierten Disruptionen gesamtgesellschaftliche Aspekte unserer Ökonomie und Arbeitswelt betreffen. Sie fordert in diesem Rahmen technologische Ansätze wie den Digitalen Zwilling zur erfolgreichen Partizipation und Gestaltung der vierten industriellen Revolution.

Mit Zunahme der Komplexität und Interdisziplinarität von Produkten steigt der Aufwand, moderne mechatronische Systeme in der Entwicklung und im Betrieb zu analysieren und entsprechende Maßnahmen zur Verlässlichkeitssteigerung abzuleiten. Besonders in der Entwicklung mechatronischer Systeme spielt daher die Steigerung der Verlässlichkeit und somit auch der Zuverlässigkeit und der funktionalen Sicherheit eine entscheidende Rolle [2, 3].

Dazu werden im Verlauf der Entwicklung eine Vielzahl an Modellen gebildet, welche dabei helfen, bereits in frühen Phasen Aussagen über die Verlässlichkeit des mechatronischen Systems treffen zu können. Diese Modelle begleiten die Entwicklung bis in den Feinentwurf eines Systems und seiner Systemelemente. Aus dem modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme sind entsprechend weitreichende Modelle verfügbar [2]. Der Modelltransfer zur Nutzbarmachung dieser Modelle in späteren Lebenszyklusphasen ist für eine effiziente Umsetzung des Digitalen Zwillings elementar und durch geeignete Methoden und Vorgehensmodelle zu unterstützen. Eine Kombination des bestehenden Vorwissens in Form von Modellen mit den durch zunehmende Digitalisierung mechatronischer Produkte und Produktionssysteme zur Verfügung stehenden Daten bietet das Potenzial zur Umsetzung Digitaler Zwillinge. Die Digitalisierung technischer Systeme ermöglicht zudem neue Geschäftsmodelle wie *Pay-Per-Use*-Konzepte. Der

Nutzer zahlt nur noch die erbrachte Leistung und muss das System nicht selbst erwerben [4, 5]. Diesem Geschäftsmodell folgend wird der Hersteller der Systeme zum Anbieter der Leistung und hat ein intrinsisches Interesse an Verlässlichkeit seiner Systeme, da der unternehmerische Erfolg nicht mehr über den einmaligen Verkauf der Systeme oder Instandhaltungsverträge abgedeckt wird [4, 5]. Zur Erhöhung der Verlässlichkeit kommt der vorausschauenden Instandhaltung eine zentrale Bedeutung zu, da hier ungeplante Ausfallzeiten stark reduziert werden können [6]. Diese Arbeit zeigt, wie Modelle aus der Entwicklung auch für nachfolgende Lebenszyklusphasen nutzbar gemacht werden und wie sie die Grundlage für die Erstellung eines Digitalen Zwilling bilden. Im Themenfeld dieser Arbeit dient der Digitale Zwillings dabei als Grundlage für eine vorausschauende Instandhaltung des mechatronischen Systems. Grundlage sind Definitionen der Verlässlichkeit mechatronischer Systeme und Digitaler Zwillinge (Abschnitt 2). Der Beitrag zeigt auf, wie die Modelle aus frühen Entwicklungsphasen in Kombination mit Daten der Zustandsüberwachung (Abschnitt 3) genutzt werden. Der Transfer in einen Digitalen Zwillings mit dem Zweck der Verlässlichkeitssteigerung wird auf methodischer Ebene (Abschnitt 4) sowie anhand eines Anwendungsbeispiels (Wälzlagerprüfstand in Abschnitt 5) erläutert.

## 2 Begriffe und Definitionen

Basierend auf der Definition der Verlässlichkeit nach Avizienis [1] sind in Bild 1 die Kenngrößen der Verlässlichkeit aufgetragen.

Diese Definition stammt ursprünglich aus der Informatik und wurde u. a. im SFB 614 für mechatronische Systeme adaptiert [7]. Die Integrität bezieht sich daher auf die Zugriffssicherheit der im System vorhandenen Daten und Signale. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt dabei auf den Kenngrößen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit als Zielgrößen einer vorausschauenden Instandhaltung.



Bild 1 Kenngrößen der Verlässlichkeit (nach [1])

Vorausschauende Instandhaltung kann nach Kothamasu [8] auf Basis von zuverlässigkeits- und zustandsbasierten Methoden umgesetzt werden. Zuverlässigkeitsbasierte Methoden benötigen Überlebenswahrscheinlichkeitsverteilungen aller relevanten Systemelemente und Teilsysteme. Auf dieser Basis und unter Berücksichtigung einer Restüberlebenswahrscheinlichkeit ist eine Planung von Instandhaltungsintervallen möglich. Dabei kann die aktuell vorherrschende Belastungssituation meist jedoch nicht berücksichtigt werden.

In zustandsbasierten Methoden werden charakteristische Merkmale in Mess- oder Betriebsgrößen des zu untersu-

chenden Systems betrachtet und analysiert, um Rückschlüsse auf den aktuellen Schädigungszustand ziehen zu können (Diagnose). Darüber hinaus können die identifizierten charakteristischen Merkmale auch direkt auf die Restlebensdauer der Systemelemente oder des Systems abgebildet werden (Prognose). Eine korrekte Klassierung des aktuellen Schädigungszustands sowie die präzise Prädiktion des Ausfallzeitpunkts sind die Basis für eine effektive Instandhaltungsplanung, um ungeplante Stillstände zu minimieren, Instandhaltungsintervalle optimal zu planen und aufeinander abzustimmen.

Bei einem Digitalen Zwillings handelt es sich um eine vollständige, digitale Repräsentanz eines Systems, Produkts, Objekts oder Prozesses aus der realen Welt in Form von Software. Diese kann sowohl physikalische Objekte als auch datenbasierte Dienste beschreiben und beinhaltet sämtliche für den Anwendungsfall relevanten Informationen und Funktionen. Über definierte Schnittstellen ist das Produkt mit dem Digitalen Zwillings verbunden [9-11].

Der Digitale Zwillings wird für einen definierten Zweck erstellt. Ein solcher Zweck kann beispielsweise die Umsetzung einer Analyse zur vorausschauenden Instandhaltung, zur Zustandsüberwachung, zur Integration von Systemupdates im After-Sales-Management oder zum Transfer von Daten aus der Anwendung in den Entwicklungsprozess zukünftiger Produktgenerationen sein [10, 12]. Die Deloitte-Studie [13] nennt die folgenden Nutzen für die Anwendung des Digitalen Zwillinges:

- Gesteigerte **Effizienz** durch Anpassung der beobachteten Betriebsparameter auf den optimalen Betriebszustand,
- Gesteigerte **Qualität** durch das zusätzliche Erfassen von Daten über den kompletten Entwicklungsprozess hinweg,
- Erhöhtes **Wachstum** durch die Identifikation neuer Potenziale mittels hoher Datenverfügbarkeit und Analyse-Funktionen,
- **Risikominimierung** durch vorausschauende Maßnahmen in Kombination mit permanenter Überwachung von Systemen,
- Gesteigerte **Flexibilität** durch die Möglichkeit von vernetzten Steuerungen,
- Gesteigerte **Transparenz** durch das kontinuierlichere Erfassen von Systemdaten.

Die Anwendung des Digitalen Zwillinges wird als der nächste logische Schritt bezeichnet, um die digitale und reale Welt noch stärker miteinander zu verschmelzen [10].

Der für diese Arbeit relevante Digitale Zwillings zur vorausschauenden Instandhaltung entsteht aus den Modellen der Produktentwicklung, speziell dem Model Based Systems Engineering (MBSE). Seine Existenz beginnt mit der Produktion eines realen Seriensystems und der zugehörigen Realisierung der Kommunikation durch Schnittstellen. Mit dem Fokus auf vorausschauende Instandhaltung sind reale Systeme der Entwicklung wie Muster und Prototypen ausgeschlossen bzw. dienen als Informationsgrundlage für die Realisierung im Seriensystem.



## 4 Modellintegration: Digitaler Zwilling

Grundlage für die Integration der Modelle aus der Produktentwicklung ist die Nutzung eines modellbasierten Vorgehens. Die Durchgängigkeit, Vollständigkeit und Korrektheit der Verlässlichkeitsmodelle ist logische Voraussetzung für die Nutzung als Grundlage für den Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung.

Bild 4 gibt einen Überblick über die Vernetzung des Lebenszyklus mit dem Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung. Neben den Informationen aus der *Entwicklung* in Form von Verlässlichkeitsmodellen, besteht die zwingende Voraussetzung der Realisierung einer Schnittstelle zur Kommunikation zwischen dem Digitalen Zwilling und dem realen System.

Der Lebenszyklusphase *Produktion* folgt die Phase der *Nutzung*, welcher in der Regel parallel die Phase *Service* zugeordnet wird [21]. In dieser Phase wird die zuvor realisierte Schnittstelle zur Kommunikation genutzt, um Daten des realen Systems zur vorausschauenden Instandhaltung in den Digitalen Zwilling zu integrieren.

Die Kombination der Verlässlichkeitsmodelle der Entwicklung und der Daten des realen Systems zur vorausschauenden Instandhaltung im Digitalen Zwilling bietet weitreichende Potenziale:

- Die Überprüfung der Annahmen aus der Entwicklung zur Absicherung der Verlässlichkeit durch die Anreicherung von realen Daten im Digitalen Zwilling, kann die Methode [2] verbessern und deren Aussagen mit zunehmender Erfahrung und Datenmenge präzisieren und validieren.
- Der Aufwand in der Erstellung eines Digitalen Zwillings wird enorm reduziert: Mit der Nutzung der Verlässlichkeitsmodelle aus der Entwicklung ist der heute durchgeführte vollkommene Neuaufbau neuer Modelle in späteren Lebenszyklusphasen nicht mehr notwendig. Dabei werden die in der Entwicklung erarbeiteten Wirkzusammenhänge in den Modellen repräsentiert und das Risiko, funktionale Zusammenhänge nicht oder falsch zu erkennen, minimiert.

- In vielen Fällen wird vorausschauende Instandhaltung auf einzelne, im ersten Eindruck kritische Systemelemente des realen Systems angewendet. Durch die aus der Entwicklung vorhandenen und vollständigen Modelle wird ein ganzheitliches Bild des Systems gewonnen. Zusammenhänge von Teilsystemen und Systemelemente sind eindeutig definiert. Die aktiven und passiven Beeinflussungen kritischer Elemente können dadurch identifiziert werden.
- Der Digitale Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung erlaubt Rückschlüsse auf Systemelemente und Subsysteme, mit denen keine Schnittstelle zur Kommunikation besteht. Beispielsweise kann bei gleichartigen z. B. parallelen Systemelemente oder Teilsystemen eine einzelne Schnittstelle ausreichen. Die vorausschauenden Aussagen über Verlässlichkeit können mit dem Digitalen Zwilling ohne zusätzliche Sensorik prognostiziert werden. Dies kann als indirekte Betrachtung der Zuverlässigkeit von einzelnen Systemelemente oder Teilsystemen bezeichnet werden.

Werden die Verlässlichkeitsmodelle aus der Entwicklung verwendet, können diese im Laufe der Nutzung an Erweiterungen oder Anpassungen des realen Systems angeglichen werden. Dies kann über die integrierte Modellierung bzw. die enthaltene automatisierte Ableitung erfolgen, sodass die Modellintegrität des Digitalen Zwillings in allen adressierten Lebenszyklusphasen erhalten bleibt. Für die Umsetzung eines Digitalen Zwillings sind die Verfahren und Modelle der Zustandsüberwachung von großer Bedeutung. Diese bilden die vom System bereitgestellten Daten auf für den Digitalen Zwilling relevante Größen bezüglich der aktuellen Schädigung ab.

Es bestehen Potenziale zur Nutzung der Integration von Verlässlichkeitsmodellen aus der Entwicklung in den Digitalen Zwilling. Diese gelten nicht nur in Hinsicht auf die vorausschauende Instandhaltung: Die Verlässlichkeitsmodelle der Entwicklung liefern präzise Informationen über das System, die Struktur und das Verhalten. Somit könnte der beschriebene Integrationsansatz auch als Grundlage für die Erstellung Digitaler Zwillinge mit alternativen zweckgebundenen Absichten angewendet werden.

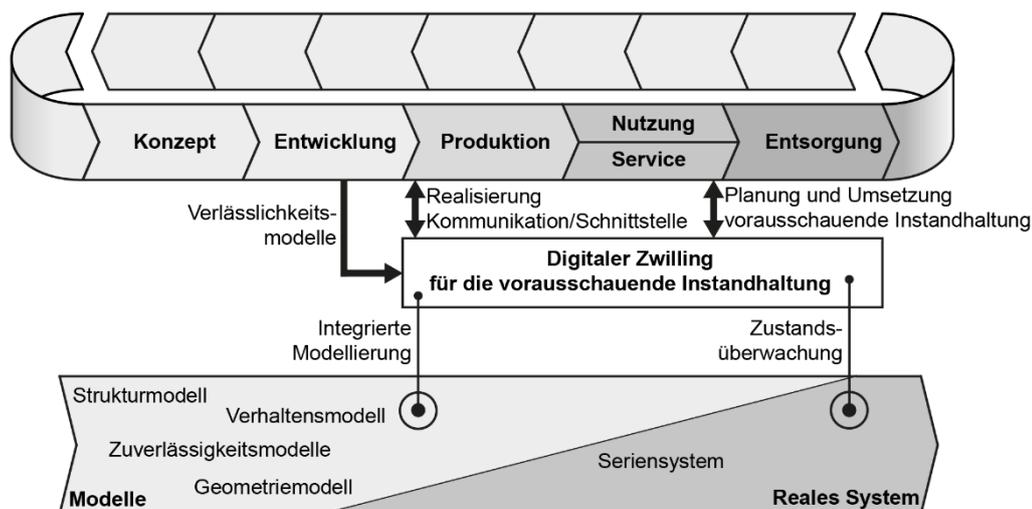


Bild 4 Digitaler Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie mit den adressierten Lebenszyklusphasen Produktion, Nutzung und Service (eigene Darstellung basierend auf [11] und [19]).

## 5 Evaluation an einem Wälzlagerprüfstand

Der modulare Wälzlagerprüfstand dient der Erzeugung einer Datenbasis zur Entwicklung von Zustandsüberwachungen, siehe Bild 5.

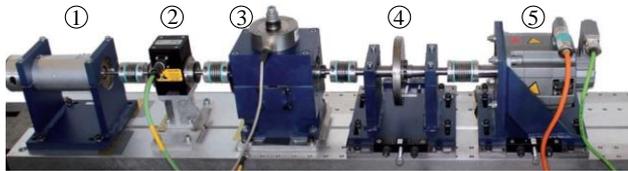


Bild 5 Wälzlagerprüfstand mit fünf Modulen zur Erzeugung von Zustandsüberwachungsdaten (nach [14]).

Dazu werden gezielt vorgeschädigte Wälzlager jeweils in ein Prüfmodul (3) eingesetzt und Beschleunigungen und Temperatur des Lagers aufgenommen. Der Prüfstand wird durch einen Gleichstrommotor (1) angetrieben und arbeitet gegen ein Widerstandsmoment (5) und eine Trägheit (4). Das resultierende Drehmoment wird mittels einer Messwelle zusammen mit der Drehzahl aufgenommen.

Auf der Basis der Messdaten werden mittels einer Zustandsüberwachung die Schäden an jeweils einem Wälzlager charakterisiert. Anhand der korrespondierenden Schädigungsarten sind Cluster zu erkennen (siehe Bild 7).

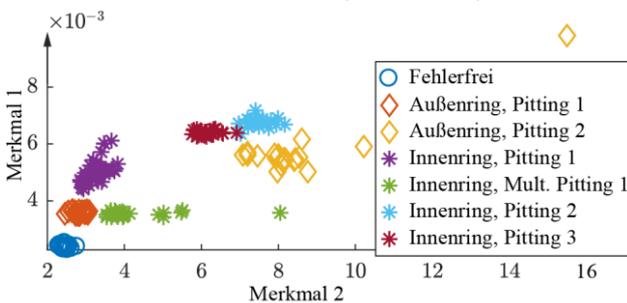


Bild 7 Identifizierte Schädigungszustände der untersuchten Wälzlager im Prüfstand und ihre Clusterung über zwei verwendete Merkmale für die Klassifizierung.

So konnten verschiedene Arten von Oberflächenausbrüchen (Pitting) wie Ausprägung, Einzel- oder mehrfache Ausbrüche auf Innen- und Außenringen durch Auswertung verschiedener charakteristischer Merkmale der Messsignale, Wavelet Energie u. a. klassiert, also definierten Klassen zugeordnet werden. Das Ergebnis der Zustandsüberwachung ist zu jedem Diagnosezeitpunkt die Wahrscheinlichkeit, dass das Wälzlager in einem der zuvor identifizierten Schädigungszustände ist. Eine eindeutige Diagnose liefert eine hohe Wahrscheinlichkeit für jeweils einen Zustand.

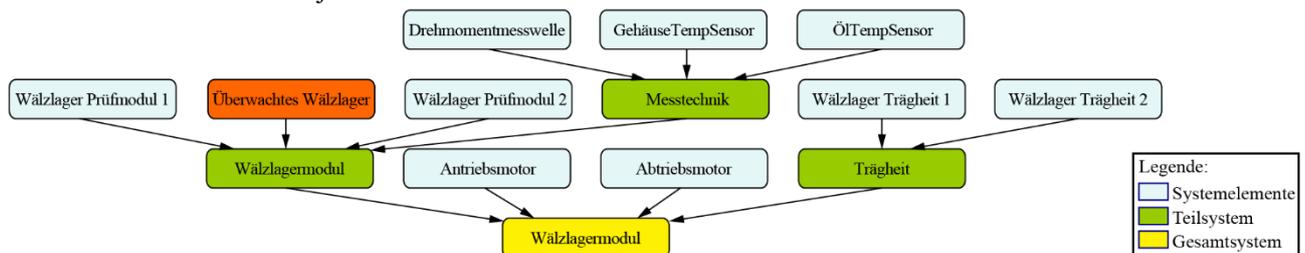


Bild 8 Systemzuverlässigkeitsmodell des Wälzlagerprüfstands aus dem Entwurf als Basis für den Digitalen Zwilling.

In der Entwurfsphase des Prüfstands wurde das in Bild 8 abgebildete Bayes'sche Netz als Systemzuverlässigkeitsmodell modelliert. Es wurde auf Basis eines Systemmodells mit Hilfe der automatisierten Ableitung aus der integrierten Modellierung erstellt. Es bildet die für die Zuverlässigkeitsanalyse relevanten Systemelemente und Teilsysteme ab. Als Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse ist die Systemzuverlässigkeit über der Betriebsdauer in Bild 6 angegeben.

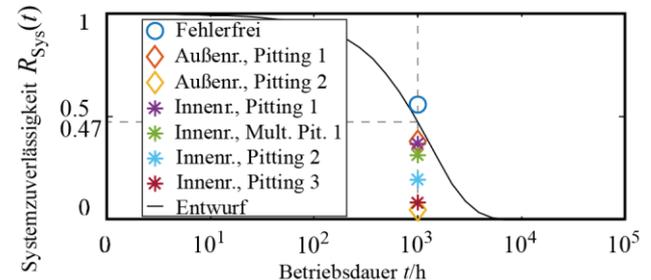


Bild 6 Systemzuverlässigkeit auf Basis des Digitalen Zwillings im Entwurf und im Betrieb für unterschiedliche Schädigungen des Wälzlagers.

Eine Aktualisierung der Systemzuverlässigkeit während des Betriebs durch Kombination des Systemzuverlässigkeitsmodells aus dem Entwurf mit den Ergebnissen einer Zustandsüberwachung zur Zustandsbestimmung erfolgt durch Integration der Messungen in das Bayes'sche Netz mittels sogenannter Evidenzen [22]. Das ursprüngliche Modell bleibt dabei erhalten, die Beobachtungen werden als zusätzliche Information integriert.

Aus Messungen am Wälzlagerprüfstand stehen Datensätze für alle identifizierten Schädigungen aus Bild 7 zur Verfügung. Diese Wälzlager wurden in einem separaten Prüfstand gezielt vorgeschädigt, sodass eine kontinuierliche Messung während der Betriebsdauer des Wälzlagerprüfstands nicht gegeben ist. Zur exemplarischen Anwendung innerhalb des Digitalen Zwillings sei angenommen, dass die Datensätze jeweils zu der Betriebsdauer  $t=1000h$  aufgenommen wurden. Der Einfluss der verschiedenen Schädigungen auf die Systemzuverlässigkeit ist in Bild 6 dargestellt. Ein fehlerfreies Wälzlager erhöht die Systemzuverlässigkeit im Vergleich zum während des Entwurfs berechneten Wert. Alle weiteren Zustände repräsentieren Schädigungen mit unterschiedlichen Ausprägungen mit zunehmender Reduzierung der Systemzuverlässigkeit.

Die Integration von Modellen der Entwicklung und der Zustandsüberwachung führt zur Realisierung eines Digitalen Zwillings für die Umsetzung, Planung und Verbesserung von Instandhaltungsmaßnahmen.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die zur Zuverlässigkeitsabschätzung eingesetzten Modelle in der Produktentwicklung eine solide und sehr gut nutzbare Grundlage für die Erstellung eines Digitalen Zwillinges für die vorausschauende Instandhaltung liefert. Die vorgestellte Integration erläutert dabei die Randbedingungen und gibt eine Orientierung, wie der Transfer aus den Modellen der Entwicklung gelingt. Zur Illustration wurde in dieser Arbeit beispielhaft die Anwendung an einem Wälzlagerprüfstand erläutert.

## 7 Danksagung

Die Autoren danken Prof. Dr.-Ing. D. Zimmer, Dr.-Ing. C. Lessmeier und dem Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (KAT) der Universität Paderborn für die Bereitstellung der Zustandsüberwachungsdaten.

## 8 Literatur

- [1] A. Avižienis, J.-C. Laprie, B. Randell und C. Landwehr, „Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing“, IEEE transactions on dependable and secure computing, Jg. 1, Nr. 1, S. 11–33, 2004.
- [2] J. Hentze, T. Kaul, I. Graessler und W. Sextro, „Integrated Modeling of Behavior and Reliability in System Development“ in DS 87-4 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada, 2017.
- [3] W. Sextro, T. Meyer, T. Kaul und J. K. Kimotho, „Entwicklung verlässlicher, intelligenter Systeme: Herausforderungen und Chancen“ in VDI-Berichte 2307, Leonberg, 2017, S. 17–30.
- [4] O. Gassmann, „Geschäftsmodelle entwickeln: 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Generator.“ München: Hanser, 2013.
- [5] R. Ematinger, „Von der Industrie 4.0 zum Geschäftsmodell 4.0: Chancen der digitalen Transformation.“ Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.
- [6] W. Hodapp, „Die Bedeutung einer zustandsorientierten Instandhaltung – Einsatz und Nutzen in der Investitionsgüterindustrie“ in VDI-Buch, Betriebliche Instandhaltung, J. Reichel, G. Müller und J. Mandelartz, Hg., Berlin: Springer, 2009, S. 135–149.
- [7] J. Gausemeier, F. J. Rammig, W. Schäfer und W. Sextro, „Dependability of self-optimizing mechatronic systems.“ Springer, 2014.
- [8] R. Kothamasu, S. H. Huang und W. H. VerDuin, „System health monitoring and prognostics-a review of current paradigms and practices“ in Handbook of Maintenance Management and Engineering, Springer, 2009, S. 337–362.
- [9] T. Kuhn, „Digitaler Zwilling“, Informatik Spektrum, Jg. 40, Nr. 5, S. 440–444, 2017.
- [10] R. Stuecka, „Digitaler Zwilling in der Produktion: Von der digitalen Planung bis zum physischen Produkt und zurück: Zukunft Industrien“, IBM, Online, 2017. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/dede/blogs/think/-2017/04/21/digital-twin/>. Zugriff am: Dez. 11 2018.
- [11] S. Boschert und R. Rosen, „Digital Twin - The Simulation Aspect“ in Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers, P. Hehenberger und D. Bradly, Hg., Springer, Cham, 2016, S. 59–74.
- [12] M. Grieves und J. Vickers, „Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems“ in Transdisciplinary perspectives on complex systems, Springer, 2017, S. 85–113.
- [13] M. Sallaba, A. Gentner und R. Esser, „Grenzenlos vernetzt: Smarte Digitalisierung durch IoT, Digitakl Twins und die Supra-Plattform“, Deloitte Monitor, 2017. [Online] Verfügbar unter: [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/TMT\\_Digital\\_Twins\\_Studie\\_Deloitte.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/TMT_Digital_Twins_Studie_Deloitte.pdf). Zugriff am: Dez. 11 2018.
- [14] T. Kaul, T. Meyer und W. Sextro, „Integrated Model for Dynamics and Reliability of Intelligent Mechatronic Systems“ in European Safety and Reliability Conference (ESREL2015), 2015.
- [15] C. Lessmeier, J. K. Kimotho, D. Zimmer und W. Sextro, „Condition Monitoring of Bearing Damage in Electromechanical Drive Systems by Using Motor Current Signals of Electric Motors: A Benchmark Data Set for Data-Driven Classification“ in Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2016.
- [16] T. Kaul, T. Meyer und W. Sextro, „Formulation of reliability-related objective functions for design of intelligent mechatronic systems“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, Jg. 231, Nr. 4, S. 390–399, 2017.
- [17] I. Gräßler: Competitive Engineering in the Age of Industry 4.0 and Beyond. In: Proceedings of TMCE. Las Palmas de Gran Canaria, 2018.
- [18] I. Gräßler, „A new V-Model for interdisciplinary product engineering“, Engineering for a changing world : 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 11-15, 2017
- [19] D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin und T. M. Shortell, “Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities”, 4. Aufl. Wiley, 2015.
- [20] J. K. Kimotho, „Development and performance evaluation of prognostic approaches for technical systems“. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2016.
- [21] ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering - System life cycle processes, 2015.
- [22] J. Pearl, “Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference.” Elsevier, 1987.