

# Beitrag einer nutzungsabhängigen Instandhaltung zur Planung von Leistungsverfügbarkeit

Contribution of a use-dependent maintenance to the planning of performance availability

Maximilian Austerjost, Tobias Hegmanns, Axel Kuhn

Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, TU Dortmund

**S**tets darauf bedacht, die Anlagen- und Maschinenverfügbarkeit bei möglichst geringem Ressourceneinsatz zu gewährleisten, wird die Rolle der Instandhaltung als unternehmerischer Wertschöpfungsfaktor immer bedeutsamer. Voraussetzung für eine Nutzbarmachung bestehender Potentiale sind neue Werkzeuge und Ansätze, deren Umsetzung eine effiziente Sicherstellung von Verfügbarkeit ermöglicht. Vor diesem Hintergrund wurde im Teilprojekt C3 des DFG Paketantrags 672 ein Konzept zur nutzungsabhängigen Instandhaltung entwickelt. Auf Grundlage des bestehenden Zusammenhangs von Nutzung und Abnutzung risikobehafteter Bauteile intralogistischer Systeme können damit die durch zukünftige Systemlasten hervorgerufenen Beanspruchungen antizipiert werden. Instandhaltungsmaßnahmen und technische Verfügbarkeiten werden dadurch anforderungsge- recht und ressourcenoptimal planbar.

[Schlüsselwörter: Instandhaltung, Condition Monitoring, Abnutzungsvorrat, Wissensbasis]

**C**onstant focus on ensuring machine availability with minimal resource-input increases the significance of maintenance as a value added factor in companies. Pre-requisite for the utilization of existing potentials are new tools and rudiments which efficiently ensure availability in realization and execution. The sub-project C3 in the DFG package application 672 has, in the light of the above, developed a use-dependent maintenance concept. On the basis of the existing connection between utilization and wear of risky components in intralogistic systems it is possible to anticipate future system load caused stress. Maintenance means and technical availabilities will thus become demand based and resource optimal predictable.

[Keywords: Maintenance, Condition Monitoring, Wear margin, Knowledge Base]

## 1 BEDEUTUNGSZUWACHS DER INSTANDHALTUNG

Moderne Wertschöpfungsketten zeichnen sich immer mehr durch eine globale Vernetzung, eine hohe Anpassungsfähigkeit und die Eigenschaft zur Herstellung maßgeschneiderter Produktlösungen aus. Die partizipierenden Unternehmen sind gezwungen, ihre Reaktions- und Durchlaufzeiten sowie ihre Prozesssicherheit adäquat zu gestalten, um wettbewerbsfähig zu sein. Für die betriebenen Maschinen- und Anlagensysteme ergeben sich daraus stetig wachsende Anforderungen hinsichtlich Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, die es mit minimalem Ressourceneinsatz zu erreichen gilt. Vor diesem Hintergrund nimmt die betriebliche Instandhaltung eine zunehmend wichtigere Rolle für den Erfolg eines Unternehmens ein. Neben einer Sicherung der erforderlichen Produktivität gewähren Investitionen in eine strategische Instandhaltung eine deutliche Kompensation von Ausfallkosten. Insbesondere die Auswahl der optimalen Instandhaltungsstrategie ist für den effizienten Betrieb moderner Anlagen von großer Bedeutung.

### 1.1 STRATEGIEALTERNATIVEN IN DER INSTANDHALTUNG

Die vorrangig etablierten Strategien unterscheiden sich stark in ihrer Wirkungsweise und zielen auf verschiedene Anwendungsbereiche ab: Bei der reaktiven Instandhaltung wird kein nennenswerter Aufwand für Inspektion und Wartung betrieben. Der Ausfall eines Bauteils bzw. einer Maschine wird abgewartet und dann werden Maßnahmen zur Instandsetzung oder Störungsbehebung ergriffen. Ausfälle erfolgen hier ungeplant. Nur bei redundanten Maschinen und Produktionsprozessen mit geringer Bedeutung sollte die reaktive Instandhaltung zur Anwendung kommen. Die präventive Instandhaltung versteht sich als zeitbasierte Strategie, bei der Bauteile oder Baugruppen nach Erreichen einer definierten Lebensdauer, unabhängig von

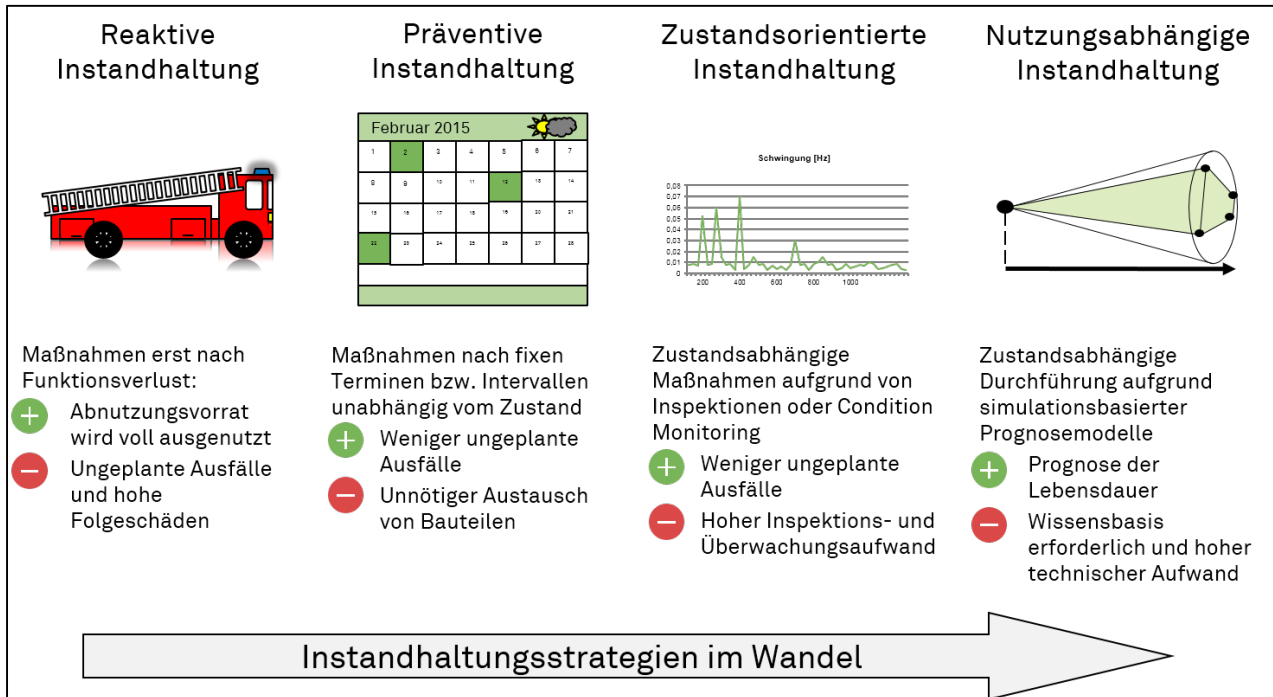


Abbildung 1. Gegenüberstellung von Instandhaltungsstrategien in Anlehnung an [Mat13]

ihrem tatsächlichen Zustand, eine Instandhaltungsmaßnahme erfahren. Ungeplante Ausfälle finden hier seltener statt. Dafür kann es zum unnötigen und daher unwirtschaftlichen Austausch von Bauteilen bzw. Baugruppen kommen. Die präventive Instandhaltung ist insbesondere bei sicherheits- und umweltbeeinflussenden Komponenten sinnvoll. Als weitere Strategie hat sich die zustandsorientierte Instandhaltung etabliert. Notwendige Maßnahmen orientieren sich hier möglichst nur am konkreten Zustand des Instandhaltungsobjekts. Mit Hilfe von Überwachungs- und Diagnosesystemen werden, je nach Aufnahmeverfahren, Abweichungen von geforderten Beobachtungswerten erkannt. Erforderliche Anpassungsmaßnahmen können direkt initiiert werden. Die kontinuierliche Zustandsüberwachung ist unter dem Begriff „Condition Monitoring“ bekannt. Hier kommen zwei Formen zum Einsatz: Entweder findet die Überwachung mittels tragbarer Datensammler oder über festinstallierte Systeme statt, die Messdaten online übermitteln können. In beiden Fällen ist ein hoher Inspektions-, Überwachungs- und Investitionsaufwand notwendig. Darüber hinaus sind meist manuelle Analysen der Messdaten erforderlich. Aufgrund vielfältiger Wechselwirkungen ist eine ausschließlich maschinelle Auswertung bisher noch nicht realisiert. Die Einschätzung der Störungsauswirkungen obliegt damit dem menschlichen Instandhalter, da die nutzungsbedingten Verschleißfolgen nicht bestimmt werden können. Eine entsprechende Vorhersage wird insbesondere durch die Dynamik von Systembelastungen erschwert. Abweichende Wirkungsweisen verschiedener Belastungen verhindern eine adäquate Antizipation. Die Ableitung eines konkreten Ausfallzeitpunkts und eine einhergehende Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen sind damit nicht möglich [Mat13].

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept der nutzungsabhängigen Instandhaltung erweitert diesen Ansatz um eine prognosebasierte Vorausrechnung zukünftiger Maschinen- oder Bauteilzustände.

## 1.2 INSTANDHALTUNG UND INDUSTRIE 4.0

Eine Befragung unter 240 Führungskräften aus produzierenden Unternehmen hat ergeben, dass die Instandhaltung heute eine sehr hohe Bedeutung hat (97,6 % Zustimmung). [KSS06].



Abbildung 2. Bedeutungszuwachs in der Instandhaltung in Anlehnung an [KSS06]

Der Bedeutung der Unternehmensfunktion Instandhaltung wird insbesondere für die Zukunft ein starker Zuwachs prognostiziert. Als Gründe für die Bedeutungszunahme nennen die Befragten gestiegene Anforderungen an Sicherheit und Kosten sowie eine erhöhte technische Komplexität [KSS06]. Diese Angaben gewinnen vor dem Hintergrund einer vierten industriellen Revolution nochmals drastisch an Gewicht.

Eingebettete Systeme, deren Zusammensetzung auf Errungenschaften in Elektronik und Software basiert, sind aktuell ein maßgebender Innovationstreiber der deutschen Industrie. Es findet eine immer stärkere Vernetzung dieser Systeme statt. Dies geschieht untereinander und mit dem Internet, wodurch die physische Welt und die virtuelle Welt zu einem Internet der Dinge und Dienste verschmelzen. Es entstehen Cyber-Physical-Systems (CPS), die als Wegbereiter einer vollkommen vernetzten Welt gesehen werden, in der jedwede Produkte und Gerätschaften befähigt werden, über herkömmliche Anwendungsgrenzen hinaus in Interaktion zu treten. Dabei werden Informationen der physischen Welt über Sensoren netzwerkorientiert verfügbar gemacht, um mit Hilfe von Aktoren direkt zu reagieren [GP14]. Die Integration von CPS und die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste lassen sich in Bezug auf Produktion und Logistik als vierte industrielle Revolution verstehen. Nach Mechanisierung, Elektrifizierung und Informatisierung verspricht man sich von der Umsetzung einer Industrie 4.0 enorme Wertschöpfungspotentiale. Mit der Industrie 4.0 sollen insbesondere Herausforderungen wie Flexibilisierung, Ressourcenproduktivität und -effizienz sowie einer optimierten Entscheidungsfindung begegnet werden [Aca13]. Systeme, die in einem entsprechenden Konsens eingesetzt werden, verfügen über eine Reihe kennzeichnender Merkmale wie z.B. eine gesteigerte Komponentenvielzahl und Komplexität, einen hohen Automatisierungsgrad sowie eine technische und organisatorische Verkettung [Mat13].

Das Hauptaugenmerk der Instandhaltung lag in der Vergangenheit stets auf der Sicherung von Verfügbarkeit und Anlagenzuverlässigkeit. Im Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen gehen die Ansprüche an die Instandhaltung jedoch weit über diese beiden Aspekte hinaus. Ihr Stellenwert wird sich zukünftig drastisch steigern. Produktionsumgebungen zeichnen sich durch einen immer höheren Vernetzungsgrad aus. Hier liegen immer größere Abhängigkeiten vor, weshalb sich Ausfälle gegenseitig beeinflussen. Im Einklang automatisierte Maschinen und Anlagen erfordern angepasste Instandhaltungsleistungen, die in sehr kurzen Zeitabschnitten umgesetzt werden können. Aber auch in den angestrebten dezentralen Organisationsformen wird die Instandhaltung eine große Rolle spielen: Im Falle eines Ausfalls wird hier flexibel auf andere Ressourcen zurückgegriffen. Die Gesamtpomformance soll dabei erhalten bleiben. Hierfür ist es unabdingbar, dass ein Überblick über die einzelnen Verfügbarkeiten und Anforderungen besteht, um stets die bestmögliche Effizienz zu

realisieren. Instandhaltungsgetriebene Kriterien wie Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Qualität wirken als wichtige Stellgrößen, um anforderungsgerecht geeignete Produktionselemente zu klassifizieren und sie ggf. für die erforderlichen Aufgaben zu befähigen. Des Weiteren ist zukünftig mit einer Steigerung der Störanfälligkeit durch die erhöhte Komponentenvielzahl in Maschinen und Anlagen zu rechnen. Damit geht einher, dass die Suche nach Fehlern aufgrund der Komplexität weiter erschwert wird [Mat13].

Die Systeme der Industrie 4.0 verfügen demnach über neue Schwachstellen und Abnutzungsformen, denen nur mit einer an diese Bedingungen angepassten Instandhaltung begegnet werden kann. Diese sollte über die gleichen Attribute, wie Vernetzung, Dezentralisierung und Intelligenz, verfügen, um den spezifischen Bedürfnissen gerecht zu werden. Die Instandhaltung nimmt die Funktion eines Erfolgsfaktors ein, da die Wertschöpfungspotentiale, die man sich aus Industrie 4.0 verspricht, nur durch sie realisierbar werden. Zusätzlich bietet die Instandhaltung ein breites Feld für die Anwendung der neuen Technologien und Systeme, wodurch ihre Bedeutung für die Zukunft nochmals zunimmt. Ein beispielhaftes Anwendungsfeld ist die Vermeidung ungeplanter Stillstände bei Intralogistiksystemen durch nutzungsabgängige Instandhaltung.

### 1.3 INSTANDHALTUNG IN DER INTRALOGISTIK

Die Intralogistik- und Fördertechnik stellt nach der Antriebstechnik die größte Fachbranche im deutschen Maschinen- und Anlagenbau dar. Den Erfolg verdankt die Branche neben dem guten Inlandsgeschäft ihrer Position als Exportweltmeister [VDMA13]. Eine besondere Herausforderung für die Hersteller intralogistischer Erzeugnisse besteht darin, die Verfügbarkeit ihrer Produkte zu sichern. Da die zu verrichtenden intralogistischen Dienstleistungen nicht auf Vorrat produziert werden können, sind hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit essentielle Erfolgsvoraussetzungen. Hieraus resultiert eine erhebliche Abhängigkeit von etwaigen Instandhaltungsmaßnahmen. Es besteht ein großer Bedarf an innovativen und technisch maßgebenden Lösungen, um den Wirtschaftsfaktor Intralogistik zu sichern. Insbesondere vor dem Hintergrund der Ressourcenverknappung sowie eines gestiegenen Kosten- und Umweltbewusstseins werden der Intralogistik erhebliche Optimierungspotentiale unterstellt [KBK<sup>+</sup>08].

## 2 GRUNDLAGEN DER NUTZUNGSABHÄNGIGEN INSTANDHALTUNG

Im Teilprojekt C3 „Werkzeuge zur nutzungsabhängigen Planung und Durchführung der Instandhaltung von Intralogistiksystemen“ des DFG-Paketantrags 672 wird ein zielorientiertes Instandhaltungskonzept entwickelt, das den Ansprüchen intralogistischer Systeme gerecht wird und die Möglichkeiten der Industrie 4.0 für sich nutzt. Es soll eine

nutzungsabhängige Instandhaltung für Intralogistiksysteme ermöglicht werden. Als Fundament des Konzepts dient die Modellierung und Analyse des Abnutzungsvorrats technischer Erzeugnisse. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sämtliche Instandhaltungseinheiten (Systeme, Baugruppen, Bauteile etc.) über einen definierten Vorrat an Funktionserfüllungen verfügen. Diese innewohnende Kapazität an Funktionserfüllungen ist bei der erstmaligen Inbetriebnahme maximal und wird Abnutzungsvorrat genannt [DIN31051]. Der Abnutzungsvorrat reduziert sich im Zeitverlauf der Nutzung einer Einheit und lässt sich als Abbaukurve darstellen. Je nach Nutzungsintensität wird der Abnutzungsvorrat unterschiedlich schnell reduziert. Durch die Einführung festgelegter oder vereinbarter Mindestwerte für den Abnutzungsvorrat entsteht ein Grenzwert. Dieser Grenzwert markiert das Ende der Funktionsfähigkeit einer Einheit [Wen13]. Instandhaltungsmaßnahmen sollten sich im Idealfall am Abnutzungsvorrat orientieren. Durch eine Fokussierung auf den Zusammenhang zwischen Nutzung und Abnutzung kann ressourcen- und verfügbareitsoptimal instandgehalten werden. Die eingangs beschriebenen etablierten Instandhaltungsstrategien richten sich jedoch nur bedingt an diesem Zusammenhang aus. Die reaktive wie auch die präventive Strategie gehen mit erheblichen Ressourcenverbräuchen einher. Bei der reaktiven Strategie wird der systeminhärente Abnutzungsvorrat über den Grenzwert hinaus abgebaut, sodass Folgekosten anfallen, die dem vier- bis fünffachen der Instandhaltungskosten entsprechen. Bei der präventiven zeitorientierten Instandhaltung wird der systeminhärente Abnutzungsvorrat nur unzureichend ausgeschöpft [KSS06]. Lediglich die zustandsorientierte Instandhaltung weist mit Hilfe von Überwachungsverfahren den Ansatz einer Nutzungsorientierung auf. Hier wird mit hohem manuellem Aufwand die Ressourcenverschwendung minimiert, indem sich Instandhaltungsmaßnahmen am aktuellen Zustand orientieren.

Die nutzungsabhängige Instandhaltung versteht sich als wissens- und prognosebasierte Weiterentwicklung der zustandsorientierten Strategie. Auf Grundlage eines mathematisch beschreibbaren Verlaufs des Abnutzungsvorrats orientieren sich sämtliche Instandhaltungsmaßnahmen an der tatsächlichen Nutzung einer Einheit.

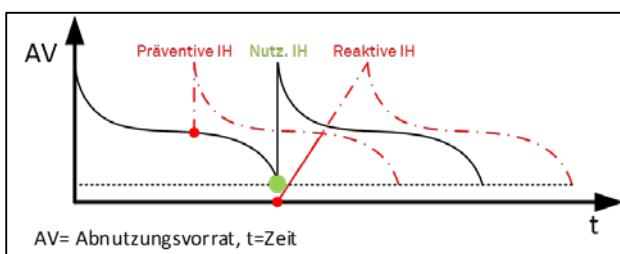


Abbildung 3. Modell des Abnutzungsvorrats in Anlehnung an [DIN31051]

Dabei werden nicht nur zurückliegende oder aktuelle Belastungen berücksichtigt, sondern auch Belastungen, die zukünftig einwirken werden. Instandhaltungsmaßnahmen können dynamisch und bedarfsgerecht im Voraus geplant und angepasst werden. Die Verfügbarkeit eines Systems lässt sich mit Hilfe der nutzungsabhängigen Instandhaltung bei minimalem Ressourceneinsatz koordinieren.

Um die Beschreibbarkeit und Prognose des Abnutzungsvorrats zu realisieren, findet mit Hilfe von Condition Monitoring der Aufbau einer übergeordneten Wissensbasis statt. Diese Basis ist Voraussetzung für die nutzungsabhängige Instandhaltung.

### 3 AUFBAU EINER WISSENSBASIS DURCH CONDITION MONITORING

Um den Abnutzungsvorrat einer Einheit zu bestimmen, seinen Verlauf zu prognostizieren und schließlich die Zeitpunkte für erforderliche Instandhaltungsmaßnahmen zu erkennen, ist der Aufbau einer übergeordneten Wissensbasis erforderlich. Diese umfasst die per Condition Monitoring erfassten Nutzungsinformationen und Nutzungsverhältnisse insbesondere für die kritischen Einheiten technischer Systeme. Der Zusammenhang von Nutzung und Abnutzung wird beschreibbar und kann auf die Einheiten umgesetzt werden. Ein Umfeld, in dem sämtliche Bedingungen für die nutzungsabhängige Instandhaltung und die entsprechende Wissensbasis vorhanden sind, ist das Logistics Condition Monitoring-Technologies Laboratory (LoCoMo-TechLab) des Lehrstuhls für Unternehmenslogistik an der Technischen Universität Dortmund. Unterschiedliche Intralogistiksysteme wie ein Automatisches Kleinteilelager, MultiShuttle-Systeme, ein fahrerloses Transportfahrzeug, sowie ein Vertikalförderer und diverse Rollenförderer wurden hier mit modernen Condition Monitoring Technologien ausgestattet. Es kommen Schwingungssensoren, Thermographiekameras, Druckluftsensoren und Strommesser zum Einsatz. Sämtliche Informationen zur Umsetzung einer nutzungsabhängigen Instandhaltung können hier gesammelt und ausgewertet werden. So finden bspw. Schwingungsanalysen statt, bei denen die Schwingungsbilder kritischer Komponenten wie



Abbildung 4. LoCoMo-TechLab

Lager und Getriebe der elektrischen Antriebe untersucht werden

Was im LoCoMo-TechLab unter Laborbedingungen bereits umgesetzt werden kann, kann durch die Entwicklungen der Industrie 4.0 zu einem umfangreichen und konsolidierten Wissensnetzwerk ausgebaut werden. So könnten zukünftig Nutzer und Hersteller intralogistischer Systeme ihre per Condition Monitoring gesammelten Nutzungs- und Abnutzungsinformationen zu einer vernetzten Wissensbasis ausbauen. Vorstellbar ist ein Szenario, in dem die permanente Sammlung und Einbringung von Informationen durch diverse Anspruchsgruppen wie Hersteller, Betreiber und Servicedienstleister die Identifikation der Abhängigkeiten verschiedenster Einflussfaktoren auf den Abnutzungsvorrat einer Instandhaltungseinheit ermöglicht.

#### 4 KONZEPT ZUR NUTZUNGSABHÄNGIGEN INSTANDHALTUNG INTRALOGISTISCHER SYSTEME

Das Konzept zur nutzungsabhängigen Instandhaltung nutzt die beschriebene Wissensbasis, um eine Verfügbarkeits- und Instandhaltungsplanung zu realisieren. Obwohl das Konzept mit dem Fokus auf intralogistische Systeme entwickelt wurde, ist die obliegende Vorgehensweise allgemeingültig und kann bei geringen Anpassungen bspw. auch für Produktionssysteme eingesetzt werden.

Der Aufbau des Konzepts ist in Abbildung fünf dargestellt. Es basiert auf einer sechsstufigen Vorgehensweise,

die ein parametrisches Modell des Abnutzungsverhaltens generiert und darauf aufbauend dann eine Prognose des Abnutzungsverhaltens ermöglicht, um Instandhaltungs- und Verfügbarkeitsplanungen durchzuführen. Während des ersten Schrittes, der Zustandserfassung, werden Möglichkeiten zur Datenaufnahme für relevante Einflussfaktoren ermittelt. Einflussfaktoren sind hier als auf den Verschleiß einer Instandhaltungseinheit einwirkende Wirkmechanismen zu verstehen. Verschiedene Einflussfaktoren werden ins Kalkül gezogen und auf ihre Relevanz bezüglich ihrer Verschleißbedeutung untersucht. Beispielhafte Einflussfaktoren für ein Intralogistiksystem sind das Gewicht von Materialflussobjekten, die Anzahl der Materialflussobjekte und die Dauer der Belastung. Für Werkzeugmaschinen ergeben sich teilweise abweichende Faktoren wie die Schnittgeschwindigkeit und spezifische Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffes. Voraussetzung für eine Berücksichtigung im Konzept der nutzungsabhängigen Instandhaltung ist stets die Messbarkeit eines Einflussfaktors. Der zweite Schritt umfasst die Zustandsanalyse. Hier erfolgt mit Hilfe factorspezifischer Messverfahren die Ermittlung der Ausprägung je Einflussfaktor. Der dritte Schritt schließt die Generierung des parametrischen Modells des Abnutzungsverhaltens ab, indem eine Zustandsdiagnose durchgeführt wird. Auf Grundlage von Vergangenheitsdaten je Einflussfaktor wird die Historie, die dem aktuellen Zustand innewohnt, hinzugezogen. Quelle ist hier die beschriebene Wissensbasis, aus der Erfahrungswerte für Belastung, Beanspruchung und Kompo-

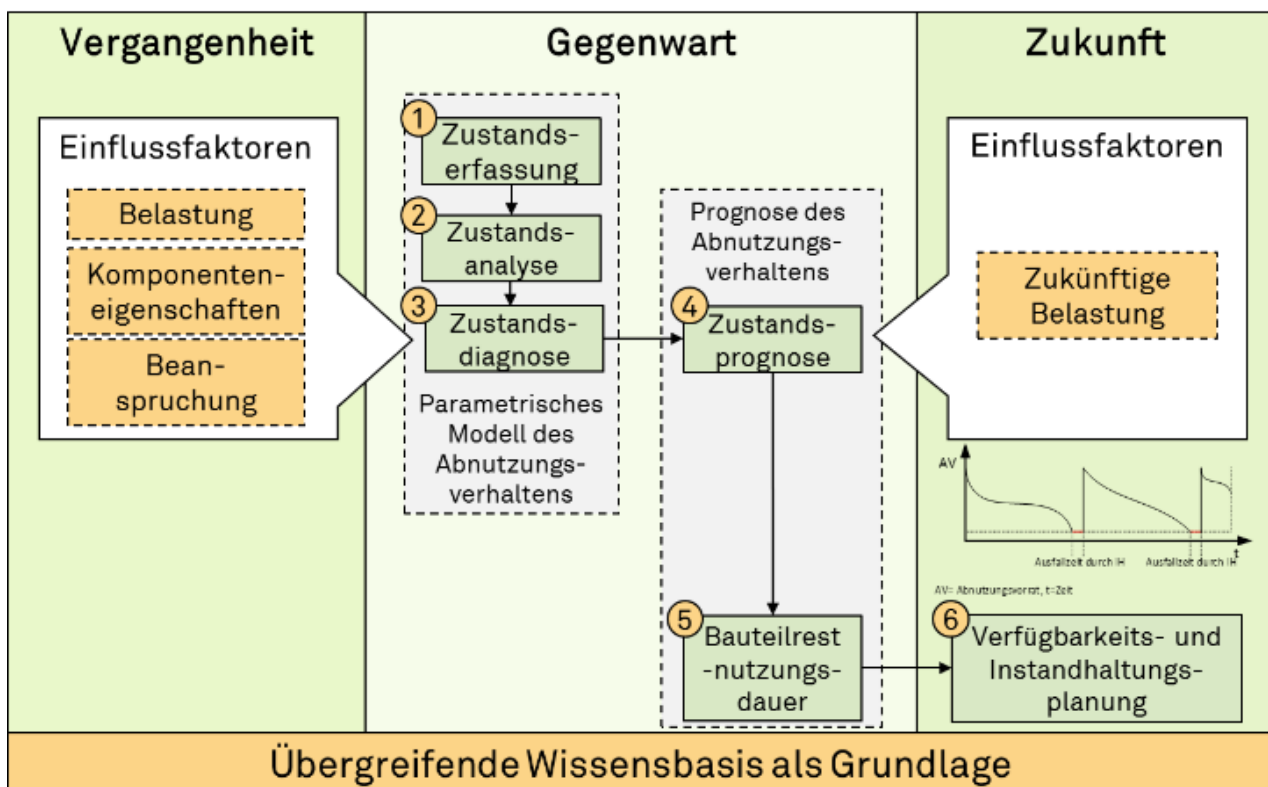


Abbildung 5. Konzept zur nutzungsabhängigen Instandhaltung in Anlehnung an Wenzel [Wen13]

nenteneigenschaft in die Diagnose eingehen. Das nun verfügbare parametrische Modell des Abnutzungsverhaltens wird ab Schritt vier zur Prognose des Abnutzungsverhaltens genutzt. Auf der Grundlage zukünftiger Belastungen, diese ergeben sich beispielsweise aus anstehenden Materialflussaufträgen für ein System, wird die Abnutzung einer Instandhaltungseinheit durch das Modell antizipiert. Hieraus lässt sich im fünften Konzeptschritt näherungsweise die Restnutzungsdauer einer Einheit bestimmen, um darauf aufbauend im sechsten Schritt adäquate Instandhaltungsmaßnahmen festzulegen und folglich die Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu planen.

#### 4.1 PARAMETRISCHES MODELL DES ABNUTZUNGSVERHALTENS

Je nach technischem System gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die auf die Abnutzung einwirken. Um eine adäquate Aussagekraft des Modells zur Bestimmung des Abnutzungsverhaltens zu erreichen, müssen trotz unterschiedlicher Relevanz verschiedenste Faktoren und deren Abhängigkeiten untereinander berücksichtigt werden. Um den komplexen Zusammenhängen gerecht zu werden, bildet die multivariate Regression den geeigneten Rahmen, um das Abnutzungsverhalten verschiedener Systeme als parametrisches Modell abbilden zu können. Forschungsfelder mit identischen Modellanforderungen wie die Fehlerfrüherkennung, Maschinendiagnose und Zuverlässigkeitsprognose haben die Regression in ihrer Eignung bestätigt [Ach08] [Hir06]. Das Regressionsmodell des Abnutzungsverhaltens für die Instandhaltungseinheiten eines Rollenförderers kann beispielsweise das Gewicht des Förderguts und die Anzahl der Materialflussobjekte umfassen, um das Kriterium Lebensdauer zu bestimmen. Für die Modellbildung werden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Kombinationen der beiden Prädiktoren bis zum Ende der Lebensdauer spezifischer kritischer Einheiten durchgeführt.

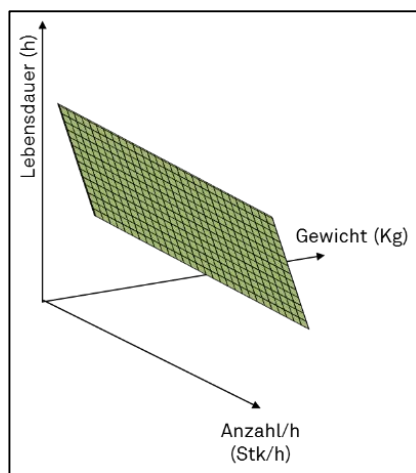


Abbildung 6. Regressionsmodell des Abnutzungsverhaltens

Für jede Kombination liegen damit Regressionskonstanten und Regressionskoeffizienten vor, auf deren

Grundlage die Lebensdauer zukünftiger Gewicht/Durchsatz-Kombinationen prognostiziert werden kann. Eine sukzessive Erweiterung der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren kann die Aussagekraft weiter steigern.

Die Beschreibung des Modells zeigt nochmals deutlich, welchen Stellenwert die Wissensbasis im Rahmen des Konzepts einnimmt. Die Bereitstellung von Versuchsdaten aus vertraulichen Quellen nimmt oberste Priorität für die praktische Umsetzung ein.

#### 4.2 PROGNOSE DES ABNUTZUNGSVERHALTENS

Wenn die Lebensdauer für zukünftige Systemlastdaten durch das Regressionsmodell prognostiziert werden soll, gelingt dies lediglich für eine definierte Lastkombination. In der Realität obliegen technische Systeme jedoch vielen unterschiedlichen Systemlasten, die sich in ihrem Einfluss auf die Lebensdauer stark unterscheiden können. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Auswirkungen verschiedener Lasten auf die Lebensdauer zu verknüpfen und sukzessive fortschreiben zu können. Das entwickelte Modell zur Abnutzungsprognose berücksichtigt diese Anforderung durch die Formulierung von Nutzungsszenarien. Nutzungsszenarien stellen hier definierte Zeitscheiben mit spezifischer Systemlast dar. Den Szenarien können die Konstanten und die Koeffizienten aus der Regression zugeordnet werden. Dauer und Spezifikationen eines Szenarios können dabei aus angebotenen Planungswerkzeugen entnommen werden und bspw. Aufträgen oder Arbeitsschichten entsprechen.

Die Verknüpfung der Nutzungsszenarien lässt sich durch das eingangs beschriebene Modell des Abnutzungsvorrats erklären: Mit jedem Szenario geht eine Reduktion der Lebensdauer einer betrachteten Einheit einher. Diese entspricht verständlicherweise auch einem Abbau des Abnutzungsvorrats. Da die Lebensdauer bei durchgehender Lasteinwirkung sowie die Dauer eines Nutzungsszenarios bekannt sind, lässt sich die Reduktion der Lebensdauer als prozentualer Abbau des Abnutzungsvorrats beschreiben. Wenn die Lebensdauer bei einer bestimmten Systemlast für ein definiertes Bauteil 40 Stunden beträgt, entspricht der Abbau des Abnutzungsvorrats bei einer einstündigen Wirkung des Nutzungsszenarios 2,5 Prozent. Sobald sich das Nutzungsszenario ändert, dient der verbleibende Abnutzungsvorrats als rechnerischer Ausgangspunkt des neuen Szenarios. Durch die Verknüpfung der Szenarien ergibt sich der Zeitpunkt, an dem der Abnutzungsvorrats aufgebraucht ist. Abbildung sieben stellt den beschriebenen Sachverhalt dar.

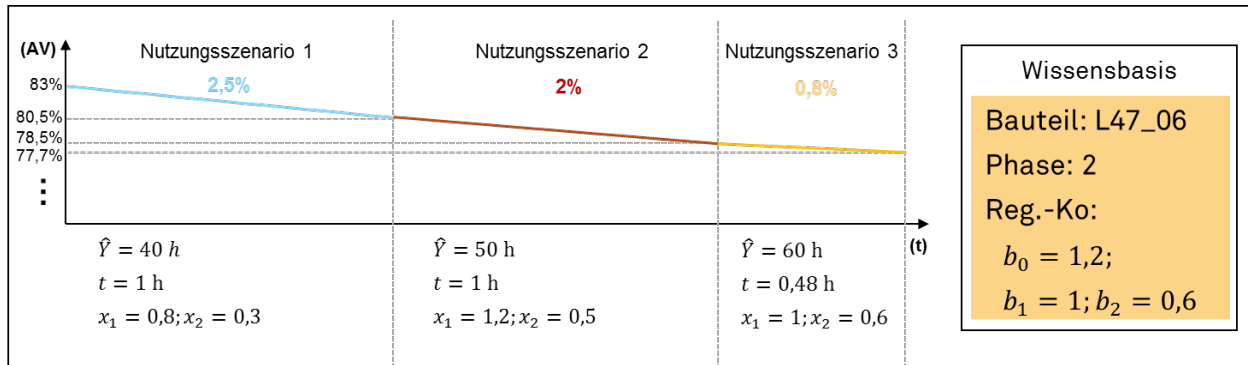


Abbildung 7. Modell zur Abnutzungsprognose

Neben der Lebensdauer ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieser Lebensdauer von besonderem Interesse für die Instandhaltungsplanung. Aus diesem Grund gilt es, innerhalb der Wissensbasis auch die Prognosegenauigkeit einzubinden. Dies könnte bspw. auf Basis von Erfahrungswerten bzgl. der Abweichungen vom errechneten Ausfallzeitpunkt geschehen. In jedem Fall gilt es, stochastische Effekte stärker für die Planung zu berücksichtigen.

## 5 BEITRAG ZUR PLANUNG VON LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Das beschriebene Konzept ermöglicht eine planbare Instandhaltung. Konkrete Instandhaltungsmaßnahmen finden damit so selten wie möglich aber so häufig wie nötig statt. Im Idealfall finden durch die Prognosefähigkeit nur noch instandhaltungsbedingte „Nichtverfügbarkeiten“ statt. Damit ist man in der Lage, die technische Verfügbarkeit für definierte Zeiträume zu bestimmen, indem die geplanten, instandhaltungsbedingten Ausfallzeiten durch das beschriebene Verfahren ermittelt werden. Die sich ergebende Verfügbarkeit kann dann im Weiteren für die Untersuchung und Planung der Leistungsverfügbarkeit des entsprechenden Zeitraums hinzugezogen werden. Die Leistungsverfügbarkeit wird als „anforderungs- und termingerechter Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen“ verstanden [VDI4486]. Werkzeuge zur simulativen Absicherung dieses Leistungsversprechens gleichen die Leistungsverfügbarkeit fortlaufend mit zukünftigen Systemlasten und den damit einhergehenden technischen Verfügbarkeiten ab. Durch den Aufbau entsprechender Schnittstellen zwischen dem Konzept zur nutzungsabhängigen Instandhaltung und der Simulation von Leistungsverfügbarkeit kann folglich eine erfolgreiche Einhaltung von Leistungsversprechen realisiert werden.

## 6 FAZIT

Das entwickelte Konzept stellt für die Instandhaltungsforschung insbesondere im Kontext der Intralogistik

ein Rahmenwerk für zukünftige Bestrebungen dar. Die mathematischen und formalen Ausführungen versprechen einen neuen Grad an Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit durch Instandhaltung. Wenn die Konzeptetablierung auf Gesamtsystemebene oder sogar auf Systemverbände übertragen werden kann, gelingt der Instandhaltung die Bereitstellung enormer Kostenreduktionen. Hierzu bedarf es jedoch einer weiteren Konkretisierung und Formulierung des Konzepts. Die mathematischen Hintergründe müssen in ein IT-gestütztes Werkzeug integriert werden. Entsprechende Schnittstellen zur Wissensbasis und zu vor- und nachgelagerten Softwarewerkzeugen müssen aufgebaut werden. Darüber hinaus müssen die Anwendungsvoraussetzungen für eine universale Einsetzbarkeit überprüft werden. Diese ist zwar konzeptbedingt gegeben, jedoch obliegen bspw. Elektronikkomponenten anderen Verschleißbedingungen als mechanisch belastete Bauteile. Es gilt die konzeptbedingte Verschiedenartigkeit von Bauteilen und Gesamtsystemen zu klären und etwaige Anpassungen am Konzept vorzunehmen.

Es wird deutlich, dass nur durch ein koordiniertes und technisch organisiertes Wissensmanagement eine entsprechende Instandhaltungsform erreicht werden kann. Die Wissensbasis kann als Herz des hier beschriebenen Konzepts zur nutzungsabhängigen Instandhaltung verstanden werden. Diese gilt es mit fortschreitender Entwicklung der Industrie 4.0 weiter zu definieren und die technische sowie organisatorische Realisierung voran zu treiben.

## 7 DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Teilprojekts C3 „Werkzeuge zur nutzungsabhängigen Planung und Durchführung der Instandhaltung von Logistiksystemen“ des Paketantrags PAK 672 „Leistungsverfügbarkeit - Logistics on Demand“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

## LITERATUR

- [Aca13] Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [Ach08] Achermann, David: *Modelling, Simulation and Optimization of Maintenance Strategies under Consideration of Logistic Processes*. Zürich: Dissertation, 2008.
- [DIN31051] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [GP14] Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung (2. Auflage)*. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [Hir06] Hirschmann, Joachim.: *Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik*, Stuttgart: Dissertation, Jost-Jetter Verlag, 2006.
- [KBK+08] Kuhn, Axel; Bandow, Gerhard; Kohlmann, Britta; Wenzel, Sebastian: *Zuverlässigkeit von Intralogistiksystemen – Überdimensionierung vs. Nutzungabhängige Instandhaltung*. In: Tagungsband zum 7 Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung (AKIDA), 2008, S.269-276.
- [KSS06] Kuhn, Axel; Schuh, Günter; Stahl, Beate: *Nachhaltige Instandhaltung – Trends, Potenziale und Handlungsfelder Nachhaltiger Instandhaltung*. Frankfurt: VDMA Verlag, 2006.
- [Mat13] Matyas, Kurt: *Instandhaltungslogistik – Qualität und Produktivität steigern*-. Wien: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [VDI4486] VDI Richtlinie 4486: *Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [VDMA13] VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: *Zahlenkompass 2012/2013*, Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 2013.
- [Wen13] Wenzel, Sebastian D.: *Nutzungsabhängige Instandhaltung intralogistischer Systeme*. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2013.

---

**Maximilian Austerjost, M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Unternehmenslogistik an der Technischen Universität Dortmund. Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Maschinenbau an der Fachhochschule Südwestfalen in Meschede und der Universität Paderborn.

Adresse: Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, Leonhard-Euler-Str. 5, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 755 5765, E-Mail: austerjost@lfo.tu-dortmund.de

**Dr.-Ing. Tobias Hegmanns** ist stellvertretender Leiter des Lehrstuhls für Unternehmenslogistik der Technischen Universität Dortmund und akademischer Direktor des Institutsbereichs Unternehmenslogistik am Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik in Dortmund.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 9743-417, E-Mail: hegmanns@lfo.tu-dortmund.de

**Prof. i. R. Dr.-Ing. Axel Kuhn** ist ehemaliger Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Fabrikorganisation (jetzt: Unternehmenslogistik) und als Senior Scientist der TU Dortmund an verschiedenen Forschungsvorhaben beteiligt.