

Tietjen, T.; Egbert, L.; Zitnikov, A.; Thoben, K.-D. (BIK, Universität Bremen), Klein, A. (DESMA Schuhmaschinen GmbH)

Sensorüberwachter Zustand von ausfallkritischen Komponenten einer Einspritzeinheit

Bei technischen Komponenten, die in übergeordneten Systemen zum Einsatz kommen, wie z.B. einer Schuhmaschine im Direktansohlverfahren, sind immer wieder ungeplante Störungen im Betriebsablauf zu beobachten. Zusätzliche Stillstandszeiten, Fehlerdiagnose und der Austausch defekter Bauteile, Wiederinbetriebnahme mit entsprechenden Anlaufprozessen etc. sind die Folge. Diese Unsicherheiten bzgl. des tatsächlichen Zustands der Komponenten mit einer noch zu erwartenden Restlebensdauer werden oftmals begegnet mit frühzeitig durchzuführenden Wartungszyklen, was aber bedeutet, dass die technisch mögliche Nutzungsdauer häufig nicht ausgeschöpft wird und im Prinzip noch verwendbare Komponenten werden vorzeitig einer stofflichen Verwertung bzw. einer Entsorgung zugeführt. Weiterhin sind viele Geschäftsmodelle nicht auf eine Weiter-/Wiederverwendung von verschleißbehafteten Bauteilen ausgerichtet, d.h. für einen Teil der Beteiligten ist es lukrativer, neue Komponenten zu verwenden als vorhandene weiter zu nutzen (keine „Win-win-Situation“ bei Weiternutzung). Hierauf aufbauend wurde das BMBF-Projekt „*LongLife - Neue Geschäftsmodelle für die Weiternutzung technischer Systeme basierend auf einer einfachen, dezentralen Zustandsbestimmung und Prognose der Restnutzungsdauer*“ initiiert. Dieses Verbundvorhaben ist Teil der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe“ (ReziProK) und wird gemeinsam mit den Verbundpartnern DESMA Schuhmaschinen GmbH, Aimpulse Intelligent Systems GmbH, Encoway GmbH, Cosynth GmbH & Co. KG sowie der Universität Bremen / BIK Institut für integrierte Produktentwicklung durchgeführt.

Modellansatz zur Bestimmung der Restnutzungsdauer

Industrie 4.0, cyber-physische Systeme, Internet der Dinge, Condition Monitoring, Künstliche Intelligenz (KI) stehen als Synonym für Aktivitäten, die in den letzten Jahren die Produkt- und Prozessentwicklung geprägt haben. Die Entwicklung von hierauf aufbauenden Systemen steht im Kontext von Effektivität und Effizienz bei der Produkt- und Prozessgestaltung und adressiert einen Mehrwert für den Kunden durch bessere Auslastungen, verbesserte Servicedienstleistungen, höhere Verfügbarkeit etc. Grundvoraussetzung ist hierbei immer eine Vernetzung bzw. Integration notwendiger informationstechnischer Komponenten, um beispielsweise über Sensorik einen Betriebszustand erfassen zu können. Digitale Daten stehen aber nicht durchgängig in Bezug auf die verschiedenen Industrie- und Konsumgüter zur Verfügung. Mit Ausnahme von Systemen, die bereits für die grundlegenden Anwendungen eine digitale Verbindung zum Internet benötigen (Computer, SPS, CMS etc.), gibt es gerade bei Investitionsgütern sehr große Unterschiede. Die geografische Lage mit der Verfügbarkeit geeigneter Verbindungen, Datensicherheit sowie das Kosten-/Nutzenverhältnis stehen einer kontinuierlichen Datenverbindung, welche gleichzeitig eine Datensteuerung bzw. -überwachung bedeuten kann, gegenüber.

Den geschilderten Herausforderungen soll im Projekt mit einer Prognose der verbleibenden Restlebensdauer begegnet werden, die auf einer temporären Erfassung spezieller Zustandsdaten der Komponente basiert. Der Ablauf einer Prognose setzt sich immer aus unterschiedlichen Arbeitsschritten zusammen, die chronologisch angeordnet werden können (s. Abb. 1). Grundsätzlich handelt es sich immer um einen Soll-/Ist-Vergleich im Rahmen einer Zustandsdiagnose. Auslegungsdaten und Kenntnisse über den betrieblichen Einsatz werden Informationen gegenübergestellt, die aus einer Zustandsüberwachung und einer Zustandsanalyse abgeleitet werden.

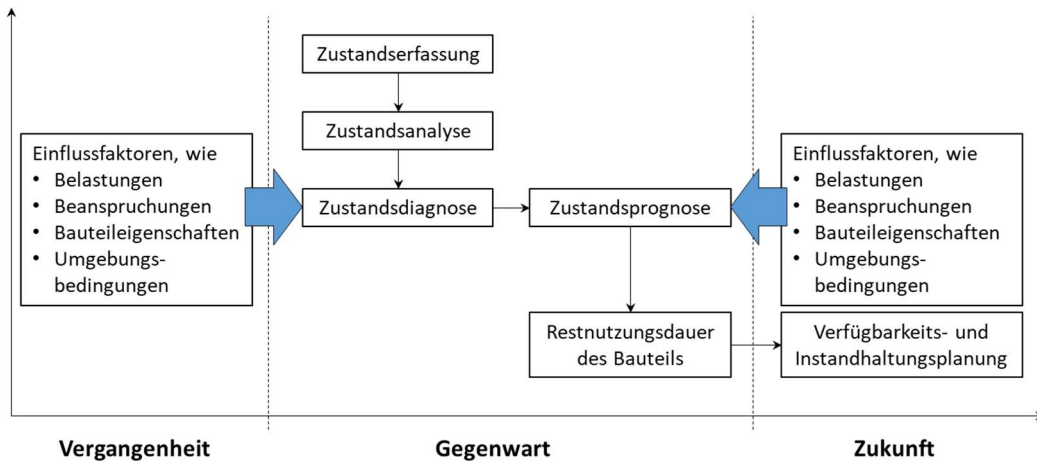


Abb. 1: Ablauf einer Prognose nach [Bandow und Holzmüller 2010]

Grundlage des im Verbundvorhaben verfolgten Ansatzes bildet das Zusammenführen unterschiedlicher Datenquellen. In Anlehnung an die Schadensakkumulation erfolgt die Bestimmung einer Restnutzungsdauer über allgemeingültig gruppierte Abnutzungsarten. Ausgehend von der rechnerischen Bestimmung der Wöhlerkurven (s. Abschnitt Betriebsfestigkeit und Bruchmechanik) auf Basis der Belastungsgrößen sowie den entsprechenden Werkstoffkennwerten erfolgt eine Zuordnung von Kenngrößen für Verschleiß, Korrosion, Materialermüdung und Alterung, die jeweils für sich als Anteil für die Abnutzung in die Prognose eingehen.

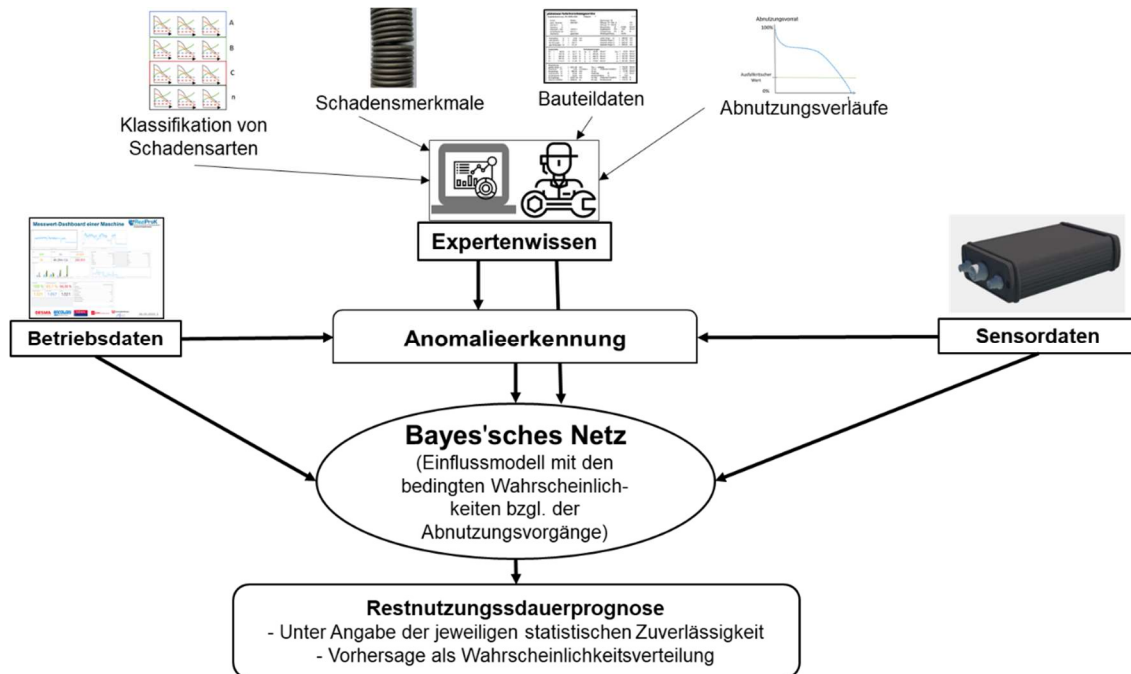


Abb. 2: Modellansatz zur Bestimmung der Restnutzungsdauer

Die Vorhersage der Restlebensdauer erfolgt als Wahrscheinlichkeitsverteilung durch ein probabilistisches Einflussmodell in Form eines Bayes'schen Netzes [Ertl 2016]. Die Netzstruktur wurde auf Basis der abgebildeten Quellen

(s. Abb. 2) für implizites und explizites Wissen modelliert. Hierbei handelt es sich um zwei Begriffe, die häufig im Kontext vom Wissensmanagement verwendet werden. Das implizite Wissen stellt hierbei das Erfahrungswissen einzelner Personen dar, ist in den Köpfen der Mitarbeiter und schwer greifbar, speicherbar und verteilbar. Dem gegenüber ist das explizite Wissen ein dokumentiertes Wissen, dass für andere auch greifbar ist, wie z.B. in Form von Wartungsanleitungen und Zeichnungen.

Über die Knoten werden die Zusammenhänge und bedingten Wahrscheinlichkeiten bzgl. der Abnutzungsvorgänge an kritischen Bauteilen abgebildet. Ergänzt durch Eingabedaten aus Sensormesswerten und den vorherrschenden betrieblichen Belastungen wird die Prognose erstellt. Eine Vorverarbeitung der erfassten Daten findet teilweise außerhalb der Bayes'schen Netze in Form einer Anomalieerkennung statt. Die Ergebnisse sind dann Eingangsgrößen des Netzes.

Damit lassen sich bei einer vorzugebenden Ausfallwahrscheinlichkeit Prognosen zu einem beliebigen Zeitpunkt t erstellen. Zu dem Zeitpunkt der Zwischenprüfungen wird der aktuelle Bauteilzustand auf Basis der bis dahin gesammelten Bauteildaten analysiert. Die Prognose des weiteren Verlaufs der Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteils wird auf Basis der aktuellen Zustandsbewertung, der Betriebsdaten und der gespeicherten historischen Sensordaten erstellt. Hierüber lässt sich dann eine Einschätzung des weiteren Nutzungspotenzials erstellen.

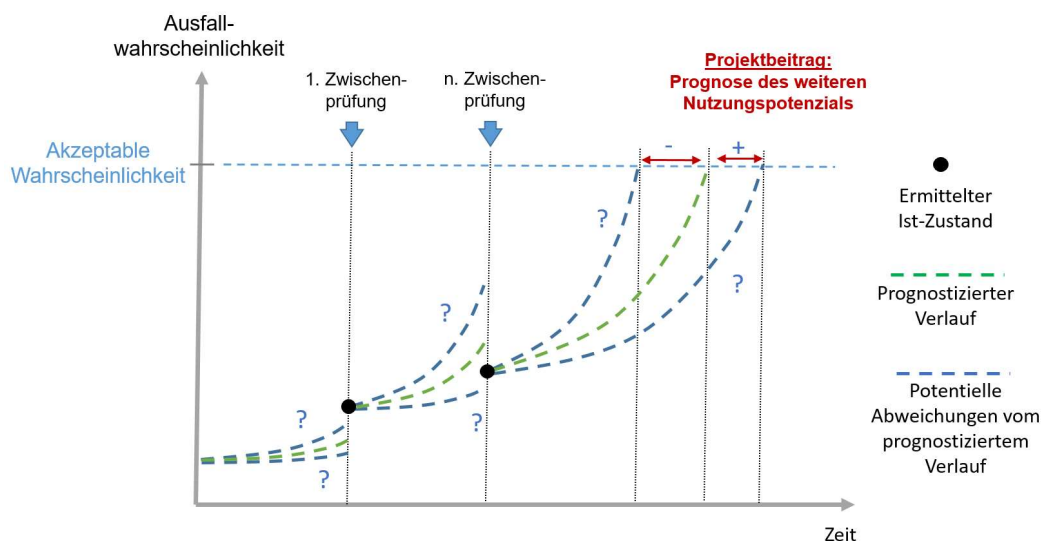


Abb. 3: Idealisierte Prognose des weiteren Potenzials hinsichtlich einer weiteren Nutzung

Abnutzung und Alterungsverhalten von Komponenten

Jedes Bauteil weist während der Betriebsphase eine bestimmte Gebrauchs- und Funktionsfähigkeit auf. Diese Fähigkeiten nehmen in der Regel während der Betriebsphase ab und in der Literatur [DIN 31051 2012, Ritter 2011] wird dieses als Abnutzungsvorrat bezeichnet. Vor der ersten Beanspruchung verfügt ein Bauteil über einen Abnutzungsvorrat von 100 %, der mit der Dauer, Häufigkeit und Stärke der auftretenden Belastungen abnimmt. Dieser Abnutzungsvorrat reduziert sich im Verlauf der Betriebsphase und kann aber durch verschiedene Maßnahmen wiederhergestellt bzw. verzögert werden, diese werden nach DIN 31051 als Instandsetzungsmaßnahmen zusammengefasst. Unterteilt werden diese dann in Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Abb. 4 zeigt

den qualitativen Verlauf mit dem Abbau dieses Vorrats über die Zeit. Dargestellt sind nur Beispiele für mögliche Verläufe.

Instandhaltung während einer Betriebsphase ist nach [DIN 31051 2012] die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen, die dabei helfen, die Gebrauchs- und Funktionsfähigkeit zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Bei der Betrachtung des Alterungsverhaltens interessiert jedoch häufig nicht nur das Verhalten eines Bauteils über eine gesamte Betriebsphase, sondern besonders zu einem festgelegten Zeitpunkt t der aktuelle Zustand. Um dieses Verhalten vorhersehbar zu gestalten, wird im Maschinen- und Anlagenbau zunehmend auf ein proaktives Agieren durch Monitoring gesetzt. Geeignete Sensorik in Kombination mit IT-Infrastruktur überwacht Systemkomponenten im Betrieb und unter der Bezeichnung *Predictive Maintenance* werden heute Systeme eingesetzt, deren Ziel darin besteht, die Nutzungsdauer von technischen Systemen zu maximieren. Einzelne Bauteilzustände werden hier erfasst und bewertet, wodurch Instandhaltungsmaßnahmen bereits frühzeitig geplant und Bauteile rechtzeitig vor ihrem Ausfall ausgetauscht werden können.

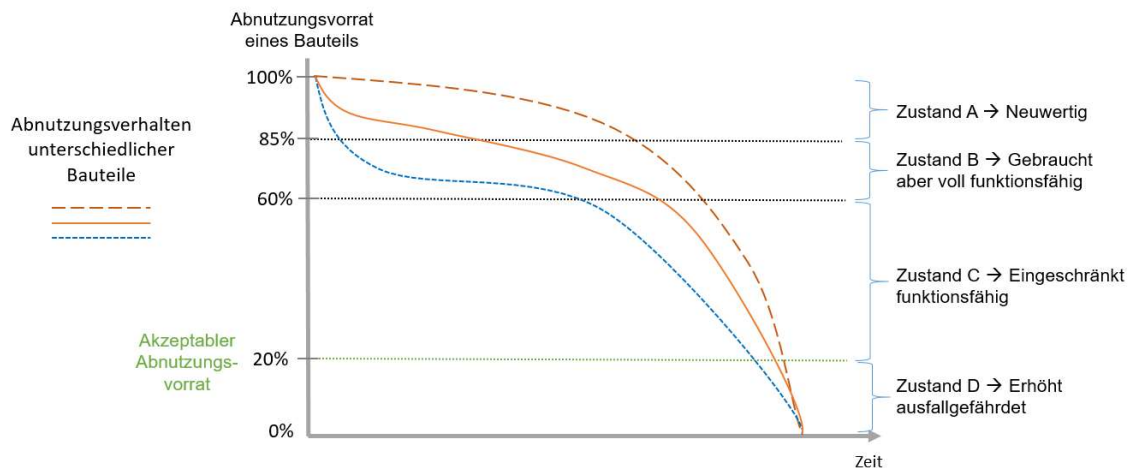


Abb. 4: Abnutzungsverhalten von Bauteilen [nach Ritter 2011]

Anwendungsfall Spindellagerung einer Reaktionsgießeinheit (RGE)

Überprüft werden soll dieser Ansatz an einer Reaktionsgießeinheit (RGE), welche u.a. eine Mischschnecke samt Spindel und zugehöriger Lagerung beinhaltet (s. Abb. 5 und Abb. 6). Innerhalb der RGE wird mit Hilfe der Mischschnecke in einer Mischkammer Polyol mit Isocyanat vermischt, um ein reaktionsfähiges und innerhalb einer Schuhsohlenkavität aufschäumendes Gemisch zu erhalten. Hierbei wurde die Spindellagerung als kritisches Bauteil identifiziert, da durch ihren Ausfall oder Beeinträchtigungen der angestammten Funktionsweise Maschinen- und in der Folge auch Produktionsstillstandzeiten entstehen. Die Mischschnecke selbst ist formschlüssig mit der Spindel verbunden und sie wird ca. alle 30 min gewechselt, da sich an ihr verklebte PU-Reste ansammeln und diese auch nicht durchgängig durch die prozessbedingten „Reinigungsschüsse“ (hierunter ist der Einspritzvorgang ohne PU-Material zu verstehen) beseitigen lassen.



Abb. 5: Gehäuse mit der Spindellagerung sowie die Mischschnecke der Einspritzeinheit

Die betrachtete Einspritzeinheit der DESMA-Schuhmaschinen wird in unterschiedlichen Maschinen verbaut und aktuell wird der Zustand durch die Anwender / Kunden qualitativ eingeschätzt und kommuniziert. Insbesondere wird hierbei durch das Fachwissen des Bedienpersonals dokumentiert, ob beispielsweise ein ungewohntes Verhalten, wie Schwingungen und Störgrößen, festgestellt wurden.

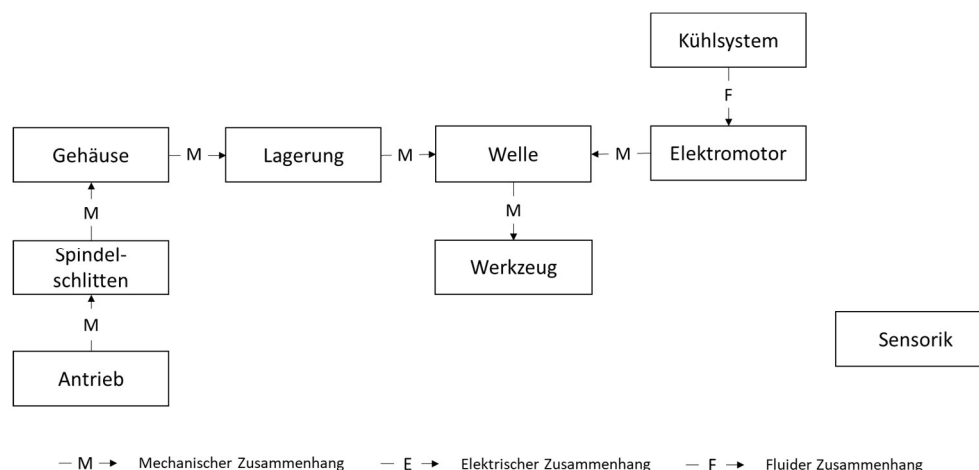


Abb. 6: Funktionale Struktur des Spindeltriebs

Aus Tests und Auswertungen von Reparaturaufträgen ist bekannt, dass die Spindeln mit den verbauten Hybrid-Wälzlagern im Durchschnitt 5.000 Betriebsstunden im Einsatz sind, bevor hier ein Wechsel bzw. eine Reparatur ansteht. Aktuell werden pro Monat zwei bis vier Spindeln neu oder generalüberholt als Ersatzteile ausgeliefert.

Generell wird die Standzeit einer Spindel durch die Zahl der sogenannten „Schüsse“ bestimmt (Einspritzvorgang in eine Schuhform). Zudem hängt die Standzeit davon ab, welchen zusätzlichen Belastungen die Komponenten ausgesetzt wurden und welche Umgebungsbedingungen vorherrschen. Zusammenzustellen sind deshalb diese Zustandsbeschreibungen sowie Betriebsdaten wie Drehzahl, Betriebsstunden und Belastungsgrößen.

Für die Spindel inkl. der Wälzlager wurden verschiedene Reparaturaufträge ausgewertet. In Tabelle 1 ist eine Auswahl hieraus zusammengefasst um zu verdeutlichen, welche Streuungen bei den Betriebszeiten auftreten. Ergänzend muss dabei beachtet werden, dass der Zustand der einzelnen demontierten Spindeln nicht zwingend gleich



gewesen sein muss. Zudem sind keine neuen, sondern neuwertige überarbeitete Spindeln in der Tabelle aufgeführt. Die Betriebszeit seit der Inbetriebnahme wurde nicht erfasst. Aus den angegebenen Tagen zwischen den Reparaturen konnten aber überschlägig die Betriebstage abgeleitet werden (Durchschnittlich dauert eine Reparatur 25 Tage). Weiterhin wird seitens DESMA mit durchschnittlichen Einsatzzeiten von 286 Betriebstagen pro Jahr bei den Betreibern der Schuhmaschinen kalkuliert. Hieraus konnte eine grob bemessene rechnerische Betriebszeit bestimmt werden. Die Spindeln befanden sich danach alle im Bereich der Betriebsfestigkeit. Mögliche Anrisse (Bruchfestigkeit) hätten zu einer Ersatzbeschaffung geführt, da eine Reparatur nicht möglich wäre. Ergänzend ist noch festzuhalten, dass die verbauten Hybrid-Schräggugellager [GMN 2010] bei einer Reparatur immer erneuert werden. Der Zustand in Bezug auf eine Reparatur wird hierbei nicht erfasst.

Spaltenweise wurde neben der Bestimmung der einzelnen Betriebstage jeweils auch eine Addition der einzelnen Reparaturen vorgenommen (Tabelle 1). Ähnlichkeiten waren hier aber ebenso wenig festzustellen, wie bei den Betriebszeiten nach einer Reparatur.

Tabelle 1: Auswertung ausgewählter Reparaturaufträge bei der GMN-Spindel (inkl. Wälzlager) (Quelle DESMA)

Lfd.-Nr.	Auswertez Zeitraum	Tage zwischen 1. und 2. Reparatur	Betriebstage zwischen 1.+2. Reparatur.	Tage zwischen 2. und 3. Reparatur	Betriebstage zwischen 2.+3. Reparatur.	Tage zwischen 3. und 4. Reparatur	Betriebstage zwischen 3.+4. Reparatur.	Betriebstage (gesamt), nach 1. Reparatur.	Betriebstage (gesamt), nach 1.+2. Reparatur.	Betriebstage (gesamt), nach 1.-3. Reparatur.
1	2015 - 2020	2124	1637					1637		
2	2017 - 2020	1138	868					868		
3	2020 - 2021	142	91					91		
4	2017 - 2021	644	483	493	365				848	
5	2019 - 2021	735	554					554		
6	2016 - 2021	755	569	623	466	356	258			1293
7	2019 - 2021	575	429					429		
8	2017 - 2021	291	207	923	700				907	
9	2017 - 2021	1433	1098					1098		
10	2015 - 2019	328	236	281	200	1083	825			1261
11	2016 - 2020	1394	1068	173	115				1183	
12	2018 - 2020	373	271	285	203	133	84			558
13	2015 - 2020	1333	1020	473	349				1369	
14	2015 - 2020	1798	1383					1383		
15	2016 - 2020	915	694	556	414				1108	
16	2017 - 2018	590	441					441		

Die Abstände (Zeiträume) zwischen den einzelnen Reparaturaufträgen sind sehr unterschiedlich. Die Daten lassen keine Schlussfolgerung über die Anzahl der Schichten und damit den Betriebsstunden pro Tag zu. Die Auslastung und die unternehmensspezifischen Betriebsmodelle (1 Schicht ... 3 Schichten) haben aber einen maßgeblichen Einfluss auf die Standzeit der Spindel, inkl. der Wälzlager, da die Anzahl der Lastzyklen dadurch variiert. Weitere Abweichungen können durch verschiedene Betriebsparameter entstanden sein, die jeweils von der Mischschnecke ausgehen. Eine frühzeitige Reparatur, beispielsweise aufgrund einer aktuellen Auftragslage oder auch terminlich fest geplante Servicearbeiten könnten beispielsweise ebenfalls einen Anteil an der Streubreite haben.

Bekanntermaßen führen Schädigungen an Bauteilen und Komponenten, zu denen die Hybrid-Schräggugellager zählen, zu einem verkürzten Einsatz. Die vorgegebene Funktion kann nicht mehr oder zur noch teilweise erfüllt werden und der Zeitpunkt solcher Ausfälle erfolgt zu unterschiedlichen Zeiten. Eine Schadensbegutachtung und eine zumeist anstehende Reparatur sind die Folge. In der Regel wird bei einer Reparatur die Spindel selbst gereinigt und vermessen, damit die zu erneuernden Hybrid-Wälzlager passgenau montiert werden können. Erst wenn

sich die defekten Lager nicht mehr zerstörungsfrei (in Bezug auf die Spindel) demontieren lassen, wird diese ebenfalls verworfen. Damit nun frühzeitig eingeschätzt werden kann, ob sich ein Ausfall abzeichnet, muss eine Einschätzung über den Zustand der betrachteten Spindellagerung erfolgen.

Die Spindel selbst ist nach den Gesetzmäßigkeiten der Betriebsfestigkeit als dauerhaft zu bezeichnen. Exemplarisch soll einmal eine überschlägige Abschätzung den Zusammenhang zwischen den Auslegungsdaten / Betriebsdaten der Spindel und der nach der Betriebsfestigkeit für den Dauerfestigkeitsbereich relevanten Lastspielzahl verdeutlichen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Schuhmaschine durchschnittlich pro Schicht 450 min im Einsatz befindet. Alle 18 s wird an einem Schaft eine Schuhsohle angespritzt und mit einer Effizienz von 85 % ergeben sich daraus 1.275 Materialschüsse (Schuhe). Auf jeden Materialschuss erfolgt ein Reinigungsschuss. Da zusätzlich nach jeweils ca. acht Schuhen ein Farbwechsel ansteht, kommen noch zusätzliche 160 Material- und Reinigungsschüsse hinzu.

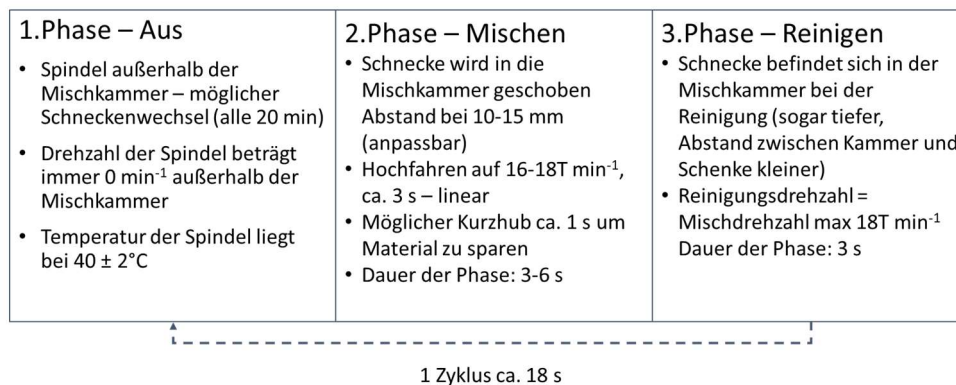


Abb. 7: Prozessbeschreibung des Einspritzvorgangs

Somit ergeben sich durchschnittlich

2.870 Schüsse pro Schicht.

Die Anzahl der Schichten variieren zwischen einer und drei Schichten pro Tag, was letztendlich bei 286 Betriebs- tagen pro Jahr zu den nachstehenden Zahlen führt.

Ein-Schicht-Betrieb:

2.870 Schüsse/Schicht · 1 Schicht/Tag · 286 Tage/Jahr => rund 820.000 Schüsse (Schuhe) pro Jahr.

Drei-Schicht-Betrieb:

2.870 Schüsse/Schicht · 3 Schichten/Tag · 286 Tage/Jahr => rund 2.460.000 Schüsse (Schuhe) pro Jahr.

Die Schüsse sind gleichzusetzen mit der Lastspielzahl. Nach den Regeln der Betriebsfestigkeit wird von einer dauerhaftesten Auslegung von Metallbauteilen gesprochen, wenn diese eine Lastspielzahl von $2 \cdot 10^6$ bis 10^7 (Stahl) ausfallfrei ertragen können. Dieser Bereich stellt den Übergang von der Zeit- zur Dauerfestigkeit dar. Für einen 3-Schicht-Betrieb der RGE bedeutet dies, dass eine dauerhaft ausgelegte Spindel ca. 1– 4 Jahre eingesetzt werden kann.

Analog kann über die Betriebsdaten aber auch die Lebensdauer der verwendeten Hybrid-Schräggugellager abgeschätzt werden. Verbaut sind hier GMN-Lager [GMN 2010] vom Typ

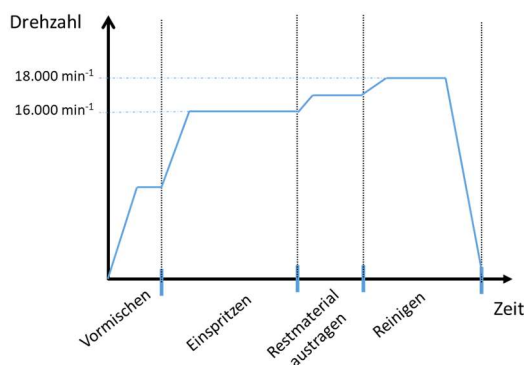
- HYS 6010 18GRAD TA A7
- HYS 61910 E TA A7 (2 Stk.)

Tabelle 2: Lagerdaten [GMN 2010]

HYS 6010 - Sonderausführung	HYS 61910
<ul style="list-style-type: none"> • max. Betriebstemperatur: 150°C – begrenzt durch den Stahl • max. Drehzahl: 16.500 und 19.500 1/min • dyn. Traglast: 26.500 – 28.000 N 	<ul style="list-style-type: none"> • max. Betriebstemperatur: 120°C – begrenzt durch den TXM-Käfig • max. Drehzahl: 18.000 1/min • dyn. Traglast: 14.500 N

Allgemein gilt, dass die gewünschte Drehzahl in der Mischphase immer in 3 s angefahren wird und im Bereich 12.000 – 18.000 min⁻¹ liegt. Die Mischdrehzahlen und Mischzeiten variieren dabei je nach verwendetem PU-System. Die Reinigungsdrehzahl liegt meistens höher als die Mischdrehzahl und kann ebenfalls max. 18.000min⁻¹ betragen.

Ausgelegt sind die Wälzlager auf ca. 5.000 Betriebsstunden. Aus den bereits bei der überschlägigen Abschätzung der Spindel verwendeten Zyklenzahl sowie der durchschnittlichen Betriebszeit pro Schicht ergibt sich eine durchschnittliche Dauer für einen Zyklus von 18 s, der für das Mischen und Reinigen angesetzt werden kann. Dies ist jedoch nicht durchgängig korrekt, da zusätzliche Reinigungsschüsse jeweils nach acht Schuhen durchgeführt werden und somit sind es genau genommen zwei Prozesse, die beim Einspritzvorgang ablaufen. Da es sich bei der Beschreibung aber um eine grobe Abschätzung handelt, ist diese Vereinfachung ausreichend. Ergänzend noch der Hinweis, dass die Drehzahl nur auf null abfällt, wenn ein Schneckenwechsel ansteht.



1-Schicht-Betrieb: 7,5 Std. (450 min)

1 Zyklus = 18 s
(basierend auf 2.710 Zyklen/Schicht)

Annahmen:

1. Einspritzen = 6 s
2. Kurzhub (Restmaterial austragen) = 2 s
3. Reinigen = 4 s
4. Mundstück reinigen = 1 s
5. Wartezeit auf nächsten Schuss = 5 s

$$\eta_m = \frac{n_1}{0,3} + \frac{n_2}{0,1} + \frac{n_3}{0,2} + \frac{n_4}{0,05} + \frac{n_5}{0,3}$$

Abb. 8: Drehzahlkollektiv beim Prozess des Einspritzvorgangs

Für die 5.000 Betriebsstunden bedeutet dieses, dass mit der Belastungszeit von 18 s die Wälzlager

≈ 1.000.000 Belastungszyklen

standhalten müssen.

Der 1-Schicht-Betrieb wurde grob mit 800.000 Zyklen abgeschätzt. Das heißt in diesem Fall, dass die Lager ca. 1 Jahr halten müssten. Dem gegenüber muss bei einem 3-Schicht-Betrieb (~ 2.500.000 Zyklen) damit geplant werden, dass bereits nach 115 Betriebstagen ein Austausch notwendig ist.

Betriebsfestigkeit und Bruchmechanik

Technische Systeme basieren auf dem Zusammenspiel ihrer Bauteile, die über ihre Nutzungsphase verschiedene Abnutzungen erfahren und die sich gegenseitig beeinflussen können. Im Betrieb wirken auf ein Bauteil eine oder mehrere Belastungen (Kräfte, Momente), die konstant oder zeitlich veränderlich sein können und auch andere Störgrößen wie z. B. Temperaturschwankungen ein. Diese Belastungen führen wiederum zu Beanspruchungen im Bauteil und sie müssen im Gleichgewicht zu einander stehen, um keine Bauteilschädigungen hervorzurufen. Ein Bauteilversagen ist in der überwiegenden Anzahl von Fällen auf dynamisch wirkende Belastungen (Kräfte, Momente, Temperaturschwankungen) zurückzuführen.

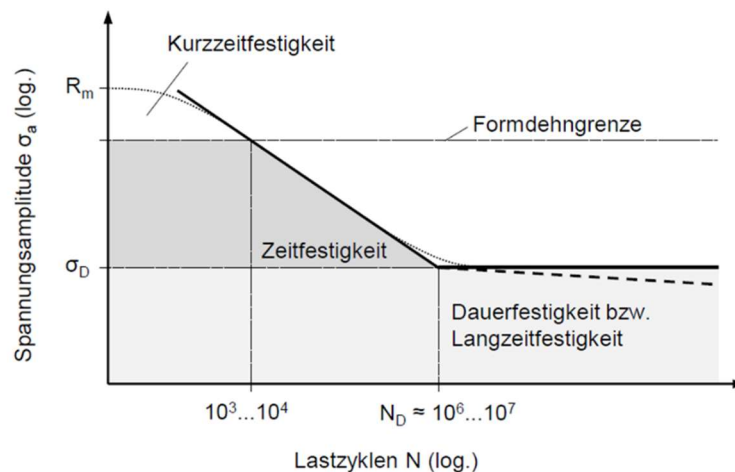


Abb. 9: Schematische Wöhlerkurve mit der Zuordnung der Bereiche von Zeit- und Dauerfestigkeit [Götz und Eulitz 2020]

Ein Ansatz für einen sicheren Betrieb ist die Bauteilauslegung nach Gesichtspunkten der Betriebsfestigkeit [Müller und Esderts 2007]. Hierbei wird ausgehend von den Kennwerten eines verwendeten Werkstoffes rechnerisch ermittelt, ob die Grenzwerte einer Beanspruchung die maximal zulässigen Werte übersteigen [Radaj und Vormwald 2007]. Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Werkstoffes sind beispielsweise Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze R_e zu entnehmen und im Sinne des allgemeinen Maximalspannungsnachweises würde bereits ein einmaliges Überschreiten dieser Bezugsgrößen ein Versagen des Bauteils bedeuten [Haibach 2006; Sander 2018; Götz und Eulitz 2020]. Die Dauerfestigkeit als Bemessungsgröße liefert einen Beanspruchungsgrenzwert, der bei einer schwingenden (dynamischen) Beanspruchung beliebig oft ohne eine Schädigung des Bauteils ertragbar ist. Eine Schwingbeanspruchung oberhalb der Dauerfestigkeit führt erst nach einer endlichen Anzahl von Zyklen zum Bruch. Dieser Bruch tritt dabei umso eher ein, je höher eine Beanspruchung ist. Ein im Maschinenbau etabliertes Prüfverfahren über Dauerschwingversuche wird nach DIN 50100-2016 beschrieben. Die Norm umfasst die Versuchsdurchführung, die -auswertung sowie die Dokumentation von lastgerechten Versuchen im Zeit- und Dauer-

festigkeitsbereich. Der Nachweis erfolgt über Wöhlerversuche [DIN 50100 2016; Haibach 2006; Radaj und Vormwald 2007; Sander 2018; Götz und Eulitz 2020], bei denen das Verhalten von Bauteilen (Probenkörper) bis hin zur Rissbildung über die Schwingfestigkeit untersucht wird. In einem Wöhlerdiagramm wird der Zusammenhang zwischen einer konstanten Lastamplitude und der ertragbaren Schwingspielzahl bis zum Versagen des Bauteils abgebildet.

Die rechnerische Dimensionierung in Form eines Lebensdauernachweises für dynamisch beanspruchte Bauteile steht in Abhängigkeit der Belastungs-, Werkstoff- und Konstruktionsdaten. Im Gegensatz zu den Konstruktions- und Belastungsdaten, die während der Betriebsphase im Normalfall unverändert bleiben, verändert sich die Werkstoffstruktur dynamisch belasteter Bauteile im Lauf der Nutzung. Der Werkstoff ermüdet und es kommt zum Versagen [von Bommel 2001].

Die im Experiment anhand von Probenkörpern ermittelten Festigkeitswerte mit regelmäßig wiederkehrenden Belastungen entsprechen jedoch selten den Beanspruchungen realer Bauteile. Technische Kerben, Materialfehler, Oberflächeneinflüsse und Korrosion etc. werden bei den standardisierten Versuchen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt und eine Auslegung von Bauteilen erfolgt mit entsprechenden Erfahrungswerten und Korrekturfaktoren nach den in Regelwerken (DIN, VDI etc.) beschriebenen Abläufen mit der Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten. Alternativ stehen natürlich auch verschiedene numerische Ansätze, wie die Finite-Element-Methode (FEM), zur Verfügung. Am Ende einer Entwicklungsphase wird aber überwiegend immer noch der experimentelle Nachweis mit der Verifizierung der Werkstoffeigenschaften am fertigen Bauteil durchgeführt. Ergänzt wird dieses heute durch die in den letzten Jahren stark weiterentwickelten Hard- und Softwaresysteme, mit denen eine Simulation am virtuellen Prototyp durchgeführt werden kann.

Eine Alternative zur experimentellen Bestimmung der Wöhlerkurve, die zeit- und kostenintensiv ist, ist die überschlägige Berechnung synthetischer bzw. künstlicher Wöhlerlinien mit Hilfe einfacher Werkstoffkennwerte. Wird ein Bauteil nur mit einer konstanten Amplitude beansprucht, kann die zu erwartende Lebensdauer direkt aus der Wöhlerkennlinie mit dem gleichen Spannungsverhältnis und der festgelegten Ausfallwahrscheinlichkeit abgelesen werden. Dieses wird auch als einstufige Beanspruchung bezeichnet [Haibach 2006; Radaj und Vormwald 2007; Götz und Eulitz 2020]. Eine mehrstufige Beanspruchung, wie sie beispielsweise in den meisten Anwendungsfällen einer Maschine auftritt, beinhaltet Belastungen unterschiedlicher Größen und Häufigkeit. Hier kann dann die Lebensdauer nicht mehr direkt aus der Wöhlerlinie ermittelt werden, da diese nur für einstufige Beanspruchungen gilt. In diesen Fällen wird von einer *Schadensakkumulation* (Summierung) gesprochen. Die Akkumulation einer Schädigung im Bauteil ist nicht durchgängig messbar, weil die Schädigung keine eindeutige Messgröße darstellt. Die rechnerische Schadensakkumulation erfolgt deshalb über Hypothesen, wie die Miner-Regel (Abb. 10). Es werden aber auch bereits Ansätze verfolgt, wie unter Einbeziehung der Versuchsplanung eine Schadensakkumulation durchgeführt werden kann [Siemon 2006]. Die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Miner [Haibach 2006; Radaj und Vormwald 2007; Sander 2018; Götz und Eulitz 2020] beschreibt einen einfachen und heute noch oft eingesetzten Ansatz. Grundlage der Schadensakkumulation nach Miner ist, dass die Lebensdauer über einen Vergleich der auftretenden Beanspruchungen (Spannungskollektiv) zu den Beanspruchungen aus der Wöhlerkurve bestimmt wird. Der Ansatz stellt keine physikalisch exakte Berechnung dar und die Anwendung wird daher auch treffender mit Lebensdauerabschätzung statt Lebensdauerberechnung bezeichnet [Götz und Eulitz 2020].

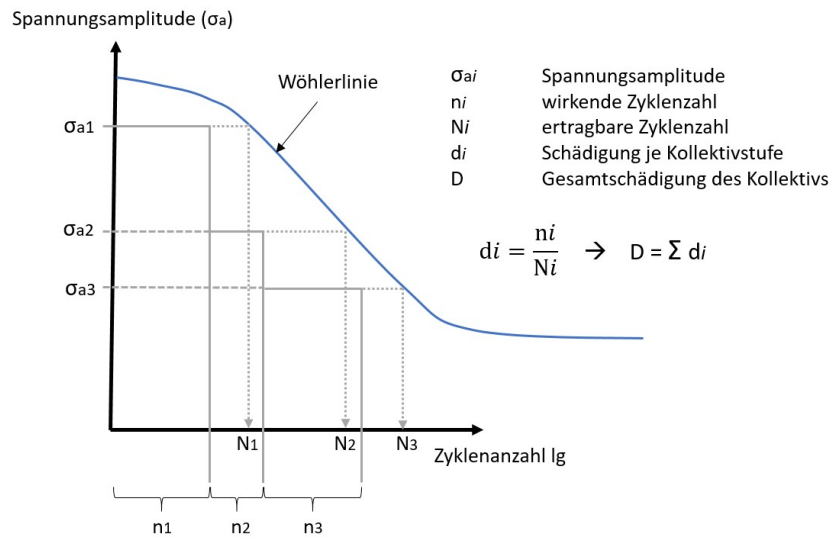


Abb. 10: Schematische Darstellung der linearen Schadensakkumulation nach der Miner-Regel [nach Einbock 2021]

Der Grundgedanke der linearen Schadensakkumulation ist, dass eine schwingende Beanspruchung mit jedem Lastzyklus eine Schädigung d_i in das Bauteil einbringt, die sich mit jedem weiteren Lastzyklus weiter aufsummiert [Götz und Eulitz 2020].

Beim Bruch (100% Schaden) eines Bauteils hat dieses die Lebensdauer N_L erreicht. Kommt es letztendlich zu einem Schaden (Bruchmechanik), wird in der Regel über eine Fehlerdiagnose versucht, die Schädigungsmechanismen über ihre Erscheinungsformen zu analysieren und zu verstehen. Schwingbeanspruchte Bauteile können durch Schwingbruch oder auch schon durch einen Schwinganriss versagen, ein Gewaltbruch kann durch Überlastung entstehen usw. Hierüber gibt es verschiedene Standardliteratur [Schmidt-Thomas 2015; Neidel und Engel 2012; Broichhausen 1985], die dieses Vorgehen ausführlich beschreibt und entsprechende Schlussfolgerungen für Änderungen einer Konstruktion aufzeigen.

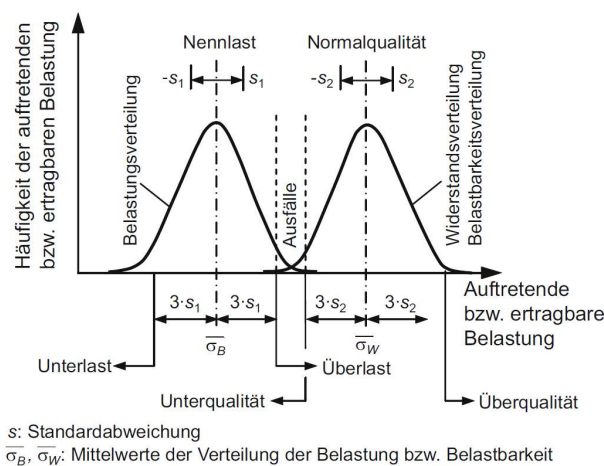


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Belastung und Belastbarkeit eines Bauteils [Bertsche und Lechner 2004]

Bei Kenntnis des Belastungskollektivs und der zulässigen Werkstoffbeanspruchung in Form eines Wöhlerdiagramms kann mit Hilfe einer Schadensakkumulationshypothese eine Lebensdauervorhersage für ein Bauteil erfolgen. Dabei ist aber zu beachten, dass diese Vorhersage nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erfolgen kann, da sowohl auftretende Belastungskollektive als auch ertragbare Beanspruchungen in Form von Wöhlerkurven Zufallsgrößen darstellen. Die bekannten Schadensakkumulationshypothesen basieren auf empirische Daten und nicht auf werkstoffmechanischen Gesetzen. Darüber hinaus unterliegen sie einer großen Streuung. [Bertsche und Lechner 2004]

Bei den meisten Bauteilen sind die auftretenden Belastungen und die Belastbarkeit statistisch verteilt (s. Abb. 11). Die Belastungen werden durch die Lastkollektive und Umgebungseinflüsse bestimmt, während die Belastbarkeit durch den Werkstoff und die Fertigungsqualität festgelegt wird. Durch Kenntnis über die Verteilung der Belastung und Belastbarkeit können Aussagen über die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen auf statistischer Basis getroffen werden. [Bertsche und Lechner 2004]

Bei der Produktentwicklung wird angestrebt, eine hohe und definierte Lebensdauer zu erzielen. Dabei ist die Kenntnis aller potentiellen Ursachen für Bauteilversagen erforderlich. Diese können aber auch in Bedienungs- oder Qualitätsfehlern bestehen oder auch Abweichungen zu vorher nicht bekannten Betriebsbedingungen sein, die bei der Bauteilauslegung nicht bekannt waren. Auch hieraus resultieren Abweichungen bei einer erwarteten Lebensdauer, die sich in der Gesamtheit nach den Gesetzmäßigkeiten der Mechanik und Festigkeitslehre rechnerisch nicht bestimmen lässt.

Für eine praktische Lebensdauervorhersage wird deshalb auf ein ausgewiesenes Verhältnis zwischen Feldversuchen, Prüfstandsversuchen und Berechnungen verwiesen. Ebenfalls wird der Auswertung und Bewertung erfasseter Daten ein hoher Stellenwert beigemessen, um letztendlich ein wirkungsvolles Werkzeug darstellen zu können. Ziel einer Produktentwicklung ist im Sinne der Zuverlässigkeit, Produkte so zu entwickeln, dass sie unter vorgegebenen Belastungen die geforderte Lebensdauer erreichen. Ermüdungsausfälle, Alterungsausfälle, Verschleißausfälle und auch Ausfälle verursacht durch Umwelteinflüsse, wie z. B. Korrosion etc. führen zu verkürzten Lebensdauererwartungen, denen mit geeigneten Strategien oder auch durch die Anwendung von Methoden und Werkzeugen begegnet werden muss. Diese können Lebensdauerberechnungen (basierend den Belastungen und der Belastbarkeit von Bauteilen) sein, wie auch Instandhaltungsmaßnahmen und sensortechnische Überwachungen von Betriebszuständen. Die Lebensdauerberechnung ist wegen der verschiedenen Unsicherheiten bei der Vorhersage der Betriebsbeanspruchungen und der zumeist ungenauen linearen Schadensakkumulationshypothese einer großen Streuung unterworfen. Die Datentechnik bietet heute aber zunehmend Lösungen für die Erfassung relevanter Betriebsparameter an und in Kombination mit den Grundlagen der Lebensdauerberechnung soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Ansatz aufgezeigt werden, wie eine praxisgerechte Zustandsbeschreibung mit der Angabe einer Restnutzungsdauer erfolgen kann. Hierauf aufbauend lassen sich dann Instandhaltungsmaßnahmen genauso ableiten wie neue Geschäftsmodelle, da sich mit einem Prognosesystem ein Serviceangebot verbessern lässt und darüber hinaus auch neue Möglichkeiten erschließen lassen.

Bestimmung der Lebensdauer von den verbauten Maschinenelementen bei der Spindellagerung

Die Lebensdauer eines technischen Bauteils entspricht dem Zeitraum, in welchem das Bauteil seine ihm zugewiesene Funktion innerhalb eines technischen Systems erfüllt. Aus der Mechanik ist bekannt, dass die Lebensdauer eines Bauteils, welche mit der Erstinbetriebnahme beginnt und dem Versagen oder auch vorzeitigem Austausch

endet, eine weitere Unterteilung erfährt. Die klassische Betriebsfestigkeit definiert als Lebensdauer die Betriebsphase hin bis zu einem ersten technischen Anriss. Es schließt sich die Restlebensdauer an, die gleichzusetzen ist mit der Rissfortschrittsphase und das endgültige Versagen bis zum Bruch beschreibt. Dieses Verhalten wird in der klassischen Bruchmechanik behandelt. Die Gesamtlebensdauer eines Bauteils setzt sich entsprechend aus der Lebensdauer sowie der Restlebensdauer zusammen [Sander 2018]. Ebenfalls hat die Lebensdauer(-berechnung) von Maschinenelementen in der Konstruktionstechnik einen hohen Stellenwert. Im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit von Bauteilen gehört die Auslegung von Maschinen, Baugruppen und Maschinenelementen zu den wesentlichen Aufgaben eines Konstrukteurs. Die Berechnung von Sicherheitsbeiwerten, einer Lebensdauer und Aussagen über die Zuverlässigkeit erfolgen dabei nach entsprechenden Auslegungsmethoden, die in Normenwerken und Fachliteratur beschrieben werden. Lebensdauerberechnungen sind insbesondere für Wälzlagerungen bekannt. Im Gegensatz zu vielen anderen Maschinenelemente, wie Passfedern, Achsen und Wellen, Zug-/Druckfedern etc., bestehen Wälzlager aus verschiedenen Einzelkomponenten. Aufgrund des Fehlens von Dauerfestigkeitsschaubildern musste hier ein anderer Weg beschritten werden. Das genormte Berechnungsverfahren für dynamisch beanspruchte Wälzlager beruht auf der Werkstoffermüdung (Pitting-Bildung) als Ausfallursache. Zugrunde liegt hierbei die bereits genannte Schadensakkumulationshypothese, nach der eine äquivalente Lagerbelastung bestimmt wird. Des Weiteren geht die dynamische Tragzahl, die aus Langzeitversuchen ermittelt und seitens der Lagerhersteller in Katalogen zur Verfügung gestellt wird, in die Berechnung der Lebensdauer ein.

Die Zuverlässigkeit eines Wälzlagers oder einer anderen Komponente ist eine Eigenschaft, die angibt, wie verlässlich eine zugewiesene Funktion erfüllt wird. Sie unterliegt einem stochastischen Prozess und kann qualitativ oder auch quantitativ beschrieben werden. Die Norm ISO 281 (Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer) definiert eine Lebensdauer, die von 90% der unter gleichen Betriebsbedingungen geprüften Wälzlager erreicht wird. Das heißt im Umkehrschluss, dass mit einer 10%igen Ausfallwahrscheinlichkeit kalkuliert werden muss. [Schaeffler 2013; GMN 2010]

Im Maschinen- und Anlagenbau wird, sobald ein Bauteil bereits Belastungen erfahren hat, allgemein von einer verbliebenen Lebensdauer gesprochen. Deren Erfassung ist ein wesentlicher Bestandteil für eine vorausschauende Instandhaltungsplanung, da Bauteilausfälle häufig zu Ausfällen der ihnen übergeordneten Maschinen bzw. Anlagen führen, oder deren Funktionalität einschränken. Im Sinne dieses Beitrags und zur Unterscheidung der Definitionen aus der Mechanik wird der Begriff *Restnutzungsdauer* verwendet, der das Potenzial beschreibt, welches noch bei zu betrachteten Komponenten vorliegt. Im Sinne einer bestmöglichen, ressourcenschonenden Instandhaltung sollen sowohl ungeplante Ausfälle als auch nicht zwingend erforderliche frühe Auswechselungen der Komponenten vermieden werden. Hierfür muss eine möglichst genaue Prognose erfolgen, anhand derer der vorteilhafteste Austauschzeitpunkt bestimmt werden kann. Dieser Zeitpunkt tritt dann ein, wenn basierend auf der Analyse der Abnutzungserscheinungen inklusive der Materialermüdung am Bauteil, die Ausfallwahrscheinlichkeit einen zuvor definierten, kritischen Wert überschritten hat.

Klassifizierung von Schädigungen und deren Einfluss auf die Restnutzungsdauer

Aufbauend auf den Kenntnissen aus Konstruktion und Betrieb wurde eine Klassifizierung von Abnutzungsarten entwickelt und angewendet, wobei jeder Klasse eine Schadensbeschreibung, ein Schadensbild, Schadensmechanismen und Merkmale zugeordnet wurden (s. Tabelle 3). Dies bildet die Basis für die Herleitung der erforderlichen

Sensorik und die Berechnung der Faktoren für die Bestimmung der Restnutzungsdauer, welche auf die erfassten Zustandsdaten angewendet wird.

Die auf die RGE (Reaktionsgießeinheit) wirkenden Störeinflüsse können unterschiedliche Ursachen und Abhängigkeiten aufweisen. Zyklusabhängige Störeinflüsse entstehen beispielsweise durch die unterschiedlichen Belastungen beim Misch- und Einspritzprozess. Darüber hinaus gibt es weitere Störgrößen, die anhand unterschiedlicher Merkmale erkannt werden können, die teilweise eine gegenseitige Abhängigkeit aufweisen. Das Beispiel in Abb. 12 soll dieses verdeutlichen:

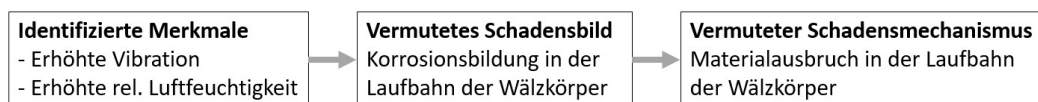


Abb. 12: Beispiel einer Schadenskette

Die Tabelle 3 beinhaltet eine ausführliche Übersicht über verschiedene Abnutzungsarten und die Beschreibung ihrer Schadensprozesse für die betrachtete Baugruppe Spindellagerung.

Tabelle 3: Klassifizierung möglicher Schadensbilder bei der Baugruppe Spindellagerung

Bauteilübergreifend			Bauteil - bzw. Anwendungsfallspezifisch	
Abnutzungsart	Schaden	Schadensbild	Schadensmechanismus	Merkmale
Verschleiß	Abrasion	Rissbildung, Rillenbildung, Pitting	Schwingende Belastung, hohe Punktlast	Temperatur, Vibration (Körperschall), Geräusche (LuftschaU)
	Adhäsion	Abscherung von Randschichtteilchen	Haftende Oberflächen durch hohe Flächenpressung	
	Oberflächen- zerrüttung	Mikrorisse unter der Oberfläche	Wechselnde Spannungen im Werkstoffgefüge	
	Tribooxydation	Materialausbruch	Zerstörung von chem. Reaktionsschichten	
Material- ermüdung	Mikrorisse unter der Oberfläche	Ermüdungsbruch, Pitting	Wechselnde Spannungen im Werkstoffgefüge	Lastzyklenanzahl, Beanspruchung, Vibration (Körperschall), Geräusche (LuftschaU)
Korrosion	Lochfraß	Pitting, Materialausbruch	Einwirken von Feuchtigkeit auf ungeschützte Materialoberflächen	Verfärbung der Oberfläche, Vibration (Körperschall), Geräusche (LuftschaU) Rel. Luftfeuchtigkeit
	Flächenkorrosion			
Alterung	Veränderung des Werkstoffgefüges			

Ableitung der erforderlichen Sensorik zur Ermittlung der Restnutzungsdauer

Die Sensoren für die Messwerterfassung werden anhand der Merkmale der verschiedenen Abnutzungsarten ausgewählt (s. Tabelle 3). Dabei muss stets die technische Umsetzbarkeit betrachtet werden, die darüber entscheidet, ob ein Abnutzungsvorgang direkt oder indirekt über korrelierende Messwerte kontrolliert wird. Weiterhin ist zu untersuchen, inwieweit eine konstruktive Umsetzung möglich ist. Beispielsweise müssen die Sensoren zur Überwachung der Wälzlager-temperatur in möglichst geringer Distanz zu diesen angebracht werden, um verfälschende Einflüsse durch größere Abstände zur Messwertquelle zu minimieren.

Die Abb. 13 zeigt schematische Darstellungen eines Wälzlagers und der Spindel inkl. der Mischschnecke. Angegeben wurden Messgrößen, die mithilfe von Sensorik aufgenommen werden können sowie relevante Betriebsdaten.

Verdeutlicht werden soll die Identifizierung geeigneter Sensorik am Beispiel der Schädigung durch Korrosion. Während des Betriebs kann dieses weder anhand von Begutachtung durch Bedienpersonal, noch durch visuelle Verfahren erfasst werden. Eine Schadensbewertung kann deshalb nur indirekt erfolgen.

Zu erwarten ist, dass sich Kennwerte mit steigendem Materialabtrag durch Korrosion verändern, da die Laufbahn der Wälzkörper unregelmäßiger wird, wodurch es zu erhöhter Reibung und Unwucht durch das Überrollen von Unebenheiten kommt [Kaesche 2011]. Hierbei können Sensoren für Vibration und Akustik physisch messbare Ergebnisse liefern, die auf eine solche Veränderung hinweisen. Da für Korrosionsbildung die Luftfeuchtigkeit in der Umgebung von großer Bedeutung ist, kann mithilfe eines Luftfeuchtigkeitssensors eine erhöhte Feuchtigkeit detektiert werden, welche in Zusammenhang mit den Vibrations- und Akustikwerten auf eine Korrosionsschädigung hinweisen.

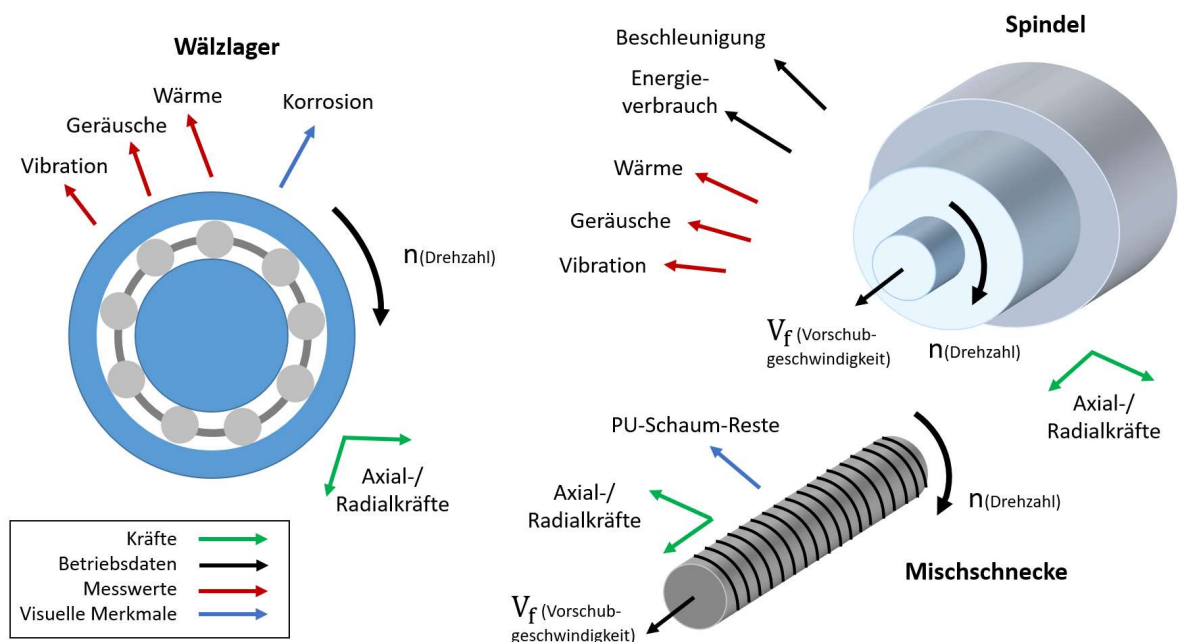


Abb. 13: Eigenschaftsparameter am Wälzlager und der Spindel (inkl. der Mischschnecke)

Ansätze zur Bestimmung der zu reduzierenden Lastzyklen aufgrund erfasster Schädigungen

Wie bereits aufgeführt, existiert ein in Normen festgelegtes Verfahren zur Bestimmung der Lebensdauer für Wälzlager. Lastkollektive, Drehzahlkollektive, Temperatur etc. gehen dabei als Parameter bzw. Faktoren in die entsprechenden Gleichungen ein. Für eine Ermittlung der Restnutzungsdauer von Lagern, die bereits im Betrieb Belastungen und dadurch Abnutzung (Schädigungen) erfahren haben, bedarf es jedoch der Beachtung weiterer Korrekturfaktoren.

Hierzu wurden für eine Bewertung der Abnutzungserscheinungen an Wälzlagern die Abnutzungsarten aus Tabelle 3 analysiert und im Hinblick auf ihren Einfluss auf eine Reduzierung der Nutzungsdauer quantifiziert.

Es ist jedoch nicht immer möglich, eine annähernd genaue Quantifizierung einer Schadensausprägung analytisch zu beschreiben. Hier müssen dann entsprechende Erfahrungswerte vorliegen, um beispielsweise über eine Anomalieerkennung ein bestimmtes, quantifiziertes Schadensbild zuordnen zu können. Hierfür kann eine Klassifikation der Schadensbilder durchgeführt werden, wobei jeder Klasse ein bestimmter Korrekturwert zugewiesen wird. Wesentlich ist jedoch zunächst, dass über eine erfasste Veränderung belegbar wird, dass sich eine Schädigung abzeichnet. Ebenfalls kann Expertenwissen dabei helfen, eine Sachlage bzgl. einer Schädigung zu identifizieren und so einen Beitrag zur Beschreibung des Abnutzungsgrads leisten.

Die Angabe der Restnutzungsdauer erfolgt über die Anzahl der verbliebenden Lastspiele. Über entsprechende Zuordnungen zu Betriebszeiten lassen sich hieraus dann auch relativ einfach Zeiten bestimmen, zu denen dann Serviceleistungen eingeleitet werden können (sollten). Hierfür wird die Lastspielzahl des neuwertigen Bauteils um die geminderten Lastspielzahlen der Abnutzungsarten verringert. Die ursprünglich ausgelegte Lastspielzahl unter bestimmten Belastungen im neuwertigen Zustand lässt sich aus der Wöhlerlinie für einen Werkstoff oder auch einem Bauteil entnehmen. Dieses ist mit den ausführlich beschriebenen Streuungen verbunden.

Bei der Angabe der Restnutzungsdauer ist es wichtig darauf zu achten, dass das Ergebnis gewissen Unsicherheiten unterliegt und keine absolute Zuverlässigkeit vorherrschen kann. Dies liegt darin begründet, dass es sich sowohl bei den Korrekturfaktoren als auch beim ausgelegten Lastspielzahl um statistische Größen handelt, die bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterliegen.

$$N_L = N_{L \text{ Neuwertig}} \text{ vs. } N_{L \text{ Verschleiß}} \text{ vs. } N_{L \text{ Korrosion}} \text{ vs. } N_{L \text{ Mat.-Ermüdung}} \text{ vs. } N_{L \text{ Alterung}}$$

Abb. 14: Zusammensetzung der Restnutzungsdauer über die Erfassung geclusterter Abnutzungsanteile

Minderung der Lastspielzahl durch Verschleiß

Die Abnutzungsart Verschleiß lässt sich in vier Schadensbilder aufteilen, u. a. die Abrasion, welche den Materialabtrag an der Werkstoffoberfläche durch die Rauheitsspitzen zweier Reibungspartner beschreibt. Die Auswirkungen sind im Falle von Wälzlagern u. a. die Riss-, Rillen- oder Grübchenbildung (Pitting) im Innen- oder Außenring des Lagers. Eine weitere Schadensart ist die Oberflächenzerrüttung, bei der durch wechselnde mechanische Spannungen Mikrorisse in den Werkstoffoberflächen entstehen. Dies geschieht zum einen durch das ständige überrollen der Laufrillen durch die Wälzkörper auf. Gegebenenfalls erfolgen zusätzliche Belastungen durch Unwuchten

im Prozessablauf der Reaktionsgießeinheit (RGE), hervorgerufen durch verhärtete PU-Schaumreste an der Spindelschnecke. Diese können zu zusätzlichen Belastungen, beim Vermengen der PU-Komponenten in der Mischkammer und anschließenden Einschießen in die Schuhsohlenform kommt, führen.

Die Quantifizierung der Schadensbilder erfolgt über die Bewertung der Geometrie des Schadens, d. h. Länge und Tiefe der Risse, Rillen und Grübchen in den Lagerbauteilen. Zusätzlich spielen die anliegenden Spannungen im Lager eine wichtige Rolle. Wirken höhere Kräfte im Lager wird das Risswachstum oder die Pitting-Bildung stärker vorangetrieben, wodurch der Ausfallzeitpunkt schneller bzw. nach einer geringeren Anzahl an Lastzyklen erreicht wird. Umgekehrt führt eine fortgeschrittene Schadensgeometrie im Lager bereits bei niedrigeren Spannungen zum Ausfall. Abb. 15 stellt beispielhaft dar, wie ausgehend von der Pitting-Tiefe und der anliegenden Spannung im Lager ein Korrekturfaktor bestimmt wird, welcher die restliche ertragbar Schwingspielzahl des Lagers herabsetzt.

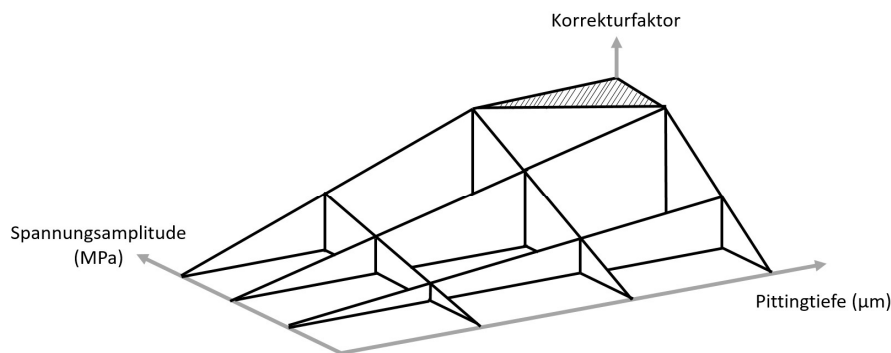


Abb. 15: Ermittlung des Korrekturfaktors bei Verschleißbeanspruchung am Beispiel der Pitting-Tiefe
[nach Schlottmann und Schnegas 2016]

Für die Berechnung der Anzahl der abzuziehenden Lastzyklen in Abhängigkeit vom Verschleißfortschritt bedarf es weiterer Untersuchungen ausgebauter Wälzlager, anhand derer die verschleißbedingten Schadensbilder weiter analysiert werden können. Die Lager werden in verschleißfreiem Zustand eingebaut, erfahren jedoch bereits beim ersten Lastzyklus erste Abnutzungen. Der Korrekturfaktor steigt folglich ab der ersten Belastung an. Anhand von Testläufen, bei denen eine Überwachung der betrieblichen Belastungen und Veränderungen der Vibrations- und Akustikwerte erfolgt, sollen die anfallenden Schadensbilder verdeutlicht und die Korrekturfaktoren bestimmt werden. Hierbei werden Wälzlager untersucht, die unterschiedlich viele Lastzyklen durchlaufen haben, wodurch sich Daten zu unterschiedlichen Bauteilzuständen erfassen lassen.

Die verschleißbedingte Minderung der Lastspielzahl erfolgt durch die Einbringung der Korrekturfaktoren sämtlicher Verschleißarten und -schadensbilder. Neben der in Abb. 15 dargestellten Ermittlung des Korrekturfaktors für Pitting-Bildung bedarf es folglich weiterer Korrekturfaktoren für Riss- und Rillenbildung, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und Tribooxydation. [Czichos und Habig 2020]

Minderung der Lastspielzahl durch Korrosion

Im Allgemeinen spielt eine entscheidende Rolle bei der Abnutzung von Lagern die Korrosion durch Feuchtigkeit (Rost), welche die Wöhlerlinie zu niedrigeren Lastspielzahlen verschiebt [Neidel et al. 2012]. Durch Abrasion oder

Ermüdung kann der Korrosionsschutz an der Oberfläche der Bauteile eines Lagers zerstört werden. Ist dies erfolgt, kann es bei einwirkender Feuchtigkeit zu Rostbildung kommen. Diese tritt zumeist unregelmäßig auf den Laufflächen der Wälzkörper am Innen- und Außenring auf. Die Rostnarben erleichtern den abrasiven Verschleiß und die Brucheinleitung, weshalb es zu vorzeitigem Bauteilversagen kommt. Folglich muss für die Restnutzungsdauerberechnung eine Überwachung und Bewertung der Korrosion am Lager erfolgen. Dies kann nach Schlottmann und Schnegas über die Höhe der Korrosionsschicht (h_k) an der Bauteiloberfläche bestimmt werden. Die Korrosionsbeanspruchung (B_{Korr}) setzt sich hierbei aus den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) und den im Lager wirkenden, korrosionsfördernden Kräften zusammen. In Hinblick auf die Restnutzungsdauerformel wird bei der Korrosion die Korrosionstiefe als ausschlaggebender Faktor für die Reduzierung der Nutzungsdauer verwendet.

Für die Berechnung der Anzahl der abzuziehenden Lastzyklen in Abhängigkeit zur Korrosionstiefe bedarf es weiterer Untersuchungen ausgebaute Wälzlager, anhand derer die Korrosionsbildung analysiert wird. Da die Lager in neuwertigem Zustand ohne Korrosion eingebaut werden, kann bei einer Zunahme von Vibration und Akustik über die Einsatzdauer und unter bestimmten Umgebungseinflüssen von einer steigenden Korrosionsbelastung ausgegangen werden. Die Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit sowie der Temperatur ist in möglichst geringer Distanz zum Lager zu erfassen. Anhand dieser kann auf eine Korrosionsbelastung geschlossen werden. Basierend auf den Messwerten wird ein bestimmtes Schadensbild angenommen welches eine bestimmte Korrosionstiefe abbildet, die wiederum den Anteil der zu reduzierenden Lastzyklen bestimmt.

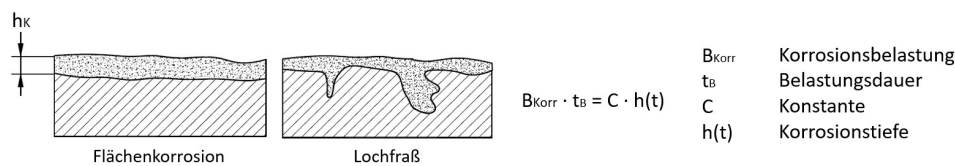
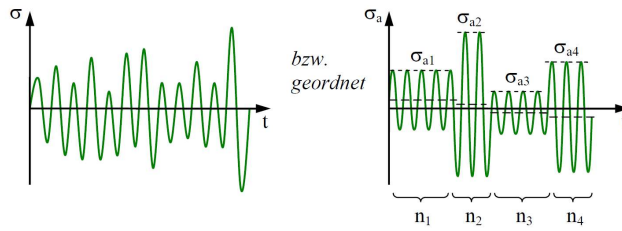


Abb. 16: Analytischer Ansatz zur Berücksichtigung einer Korrosionsbeanspruchung [Schlottmann und Schnegas 2016]

Minderung der Lastspielzahl durch Materialermüdung

Die Abnutzung durch Materialermüdung erfolgt bei Belastungen unterhalb der Festigkeitswerte des Bauteils, aufgrund von zeitlich veränderlichen Beanspruchungen. Die Materialermüdung erfolgt als Funktion von Beanspruchung und Lastspielzahl, und kann für einstufige Belastungen in einem Wöhlerdiagramm abgebildet werden. Da durch die Wöhlerlinie jeder Spannungsamplitude eine bestimmte, maximal ertragbare Lastspielzahl zugeordnet wird, wird hieraus der Korrekturfaktor $N_{L, \text{Materialermüdung}}$ ermittelt. Für diesen Fall besteht die Berechnung darin, die bereits erfolgten Lastspiele von der maximalen Lastspielzahl abzuziehen. Hierfür ist keine Sensorik oder Datentechnik, sondern lediglich ein Zyklenzähler erforderlich sowie Kenntnisse über die auftretenden Belastungen.

Bei einer mehrstufigen Belastung (s. Abb. 17) mit unterschiedlichen Spannungsamplituden und Mittelspannungen über verschiedene Schwingspielzahlen ergibt sich die Abnutzung durch die kumulierte Summe der Schädigungen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Schädigung durch eine Spannungsamplitude proportional mit der Anzahl ihrer Schwingspiele zunimmt [Joensson 2016].



n_1 : Schwingspiel-Anzahl mit Amplitude σ_{a1} und Mittelspannung σ_{m1}
 n_2 : mit σ_{a2} und σ_{m2}

Abb. 17: Beispiel eines mehrstufigen Lastkollektivs [Joensson 2016]

Um die Bauteilabnutzung zu bestimmen, müssen die einzelnen Teilschädigungen zusammengetragen werden. Nach dem oben beschriebenen Ansatz von Miner kann für diese kumulierten Lastkollektive eine Lebensdauerlinie erstellt werden, die aus sog. „Lebensdauer-Punkten“ gebildet wird. Ein Lebensdauer-Punkt stellt die maximal ertragbare Schwingspielzahl dar, welche das Bauteil bei einer bestimmten, mehrstufigen Belastung bis zum Bruch maximal erträgt. Die „Lebensdauer-Punkten“ lassen sich folgendermaßen berechnen und in das Bauteil-Wöhlerdiagramm eintragen [Joensson 2016]:

$$N_L = \frac{\sum n_i}{\sum \frac{n_i}{N_i}}$$

N_L = Lebensdauer
 n_i = anfallende Schwingspiele
 N_i = ertragbare Schwingspielzahl der Stufe i, mit Spannungsamplitude σ_{a_i} aus der Wöhlerlinie

Das Ergebnis N_L wird der höchsten Spannungsamplitude zugeordnet, weshalb der „Lebensdauer-Punkt“ auf dieser Spannungsamplitude liegt. Da es sich um ein Zusammenwirken verschiedener Spannungsamplituden handelt, weicht der Wert von der Wöhlerlinie ab. Die ertragbare Lastspielzahl des Lebensdauer-Punktes liegt zwischen den maximalen Lastspielen der Spannungsamplituden, die Teil der mehrstufigen Belastung sind. Dies liegt daran, dass die Kombination der unterschiedlichen Schädigungen zu einer neuen Anzahl an ertragbaren Lastspielen im Bauteil führt. Werden die beteiligten Spannungsamplituden der mehrstufigen Belastung proportional verkleinert oder vergrößert, entstehen weitere Lebensdauer-Punkte, welche die Lebensdauerlinie abbilden.

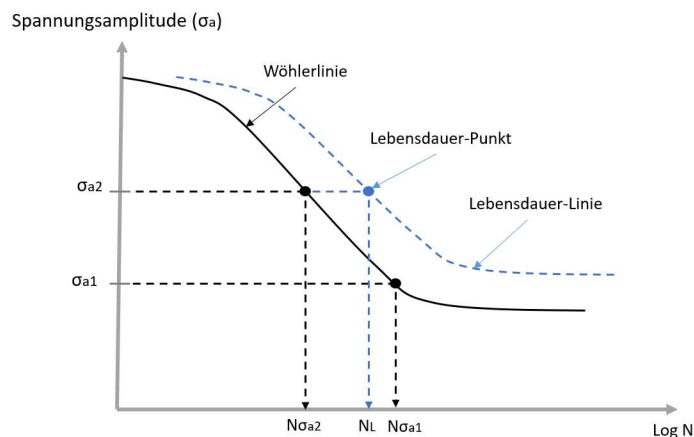


Abb. 18: Lebensdauerlinie eines mehrstufiger Lastkollektivs [nach Joensson 2016]

Minderung der Lastspielzahl durch Alterung des Materials

Beim Alterungsprozess handelt es sich um zeitbedingte Veränderungen im Werkstoffgefüge auf molekularer Ebene [Hornbogen et al. 2019]. Die dabei ablaufenden, chemischen Prozesse sind hochkomplex und erfordern zumeist spezielle Untersuchungen und Langzeittests. Die vorherrschenden Prozesse variieren zudem stark in Abhängigkeit vom Material und den Umgebungsbedingungen. In der Regel handelt es sich um Ausscheidungsprozesse, die Metalle z.B. weniger zäh, sondern härter und spröde werden lassen.

Im Kontext der Modellbeschreibung soll diese Minderung durch eine anwendungsspezifische Einflussgröße indirekt beschrieben werden. Beispielsweise kann aus Erfahrungswerten geschädigter Bauteile eine Funktion über die Zeit hergeleitet und hierauf aufbauend ein entsprechender Korrekturfaktor bestimmt werden. Durch die Zeitabhängigkeit der Schädigung kann bei der Einbringung des Korrekturfaktors bereits der weitere Fortschritt der Alterung über die prognostizierte verbleibende Betriebszeit berücksichtigt werden.

Das Bayes'sche Netz als Bestandteil des vorgestellten Prognoseansatzes

Der vorgestellte Ansatz zur Prognose der Restnutzungsdauer vereint datengesteuerte und physikalische Modelle zu einem hybriden Modellansatz. Zu den Werkzeugen für datengesteuerte Modelle gehören unter anderem probabilistische Methoden, zu denen das Bayes'sche Netz zählt. Eine Vorhersage wird dabei als probabilistisch statt als deterministisch bezeichnet, wenn sie eine Reihe von Wahrscheinlichkeiten zu allen möglichen Zukunftsszenarien enthält und sich nicht nur auf ein mögliches Ergebnis, das als „Vorhersage“ dargestellt wird, beschränkt. Probabilistische Vorhersagen sind von Bedeutung, wenn sich die Ungewissheit nicht eingrenzen lässt, was praktisch bei jedem komplexen System der Fall ist.

Die physikalischen Modelle, die das Systemverhalten und die entsprechenden Charakteristiken von Ausfallmechanismen abbilden, sind aufgrund der statistischen Streuung und den wechselseitigen Abhängigkeiten möglicher Abnutzungserscheinungen, Messwerten und Lastspielzahlreduzierungen mit Unsicherheiten verbunden. Die Statistik ist Bestandteil der Entscheidungsgrundlage. Es werden jedoch große Mengen von Daten für die Bearbeitung benötigt und die Verarbeitung dieser großen Datenmengen stellt wiederum den Anwender vor Herausforderungen. Bayes'sche Netze erlauben die Abbildung von bedingten Wahrscheinlichkeiten, die letztendlich zur Entscheidungsfindung beitragen.

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen sind informationstechnische Konzepte, die in den letzten Jahren zunehmend im Kontext von Vorhersagemodellen, Condition Monitoring und ähnlichen Anwendungen eingesetzt werden. Insbesondere bei Vorhersagen mit großen Unsicherheiten und Streuungen der erfassten Daten, ermöglicht KI genauere Aussagen zu überwachten Ereignissen. KI-Techniken ermöglichen die Abbildung von Entscheidungsstrukturen in Algorithmen, wodurch eine hohe Vollständigkeit der Variablen und Genauigkeit bei der Prognoseerstellung erzielt wird.

Im Allgemeinen werden mit dem Begriff des Maschinellen Lernens Methoden zusammengefasst, bei denen mithilfe von Lernprozessen Zusammenhänge bestehender Datensätze erkannt werden, um darauf aufbauend Vorhersagen zu treffen. Grundsätzlich lassen sich drei Arten des Maschinellen Lernens unterscheiden: das überwachte Lernen, das unüberwachte Lernen und das verstärkende Lernen [Buxmann, Schmidt 2021; Matzka 2021].

Beim überwachten Lernen geht es darum, Zielgrößen basierend auf Informationen über Eingangsgrößen abzuschätzen. Werkzeuge sind hier beispielsweise neuronale Netze oder mathematische Verfahren der Mustererkennung. Bei einigen Fragestellungen ist das überwachte Lernen nicht anwendbar, insbesondere, wenn mit fehlenden Daten oder unsicheren Informationen auf Zielgrößen geschlossen werden soll. Dieses trifft auch auf den Anwendungsfall der Spindellagerung zu, sowie im Allgemeinen auf temporär überwachte Systeme, bei denen zum einen die Historie nicht bekannt ist und zum anderen eine Vielzahl an lebensdauerreduzierenden Ereignissen eintreten können. Dennoch wird auch hier angestrebt, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser einzelnen Ereignisse zu treffen. Ein Bayes'sches Netz wird damit zum Bestandteil eines Expertensystems, welches komplexe Interaktionen von unsicheren Informationen verarbeitet, wie beispielsweise bei dem Ansatz zur Bestimmung einer Restnutzungsdauer. Ein Bayes'sches Netz stellt die Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen und deren Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit zueinander dar. Hierdurch wird das Ziehen von Schlussfolgerungen (die sogenannte „Inferenz“) unter der Betrachtung von bedingten Wahrscheinlichkeiten und ggf. aktuellen Beobachtungen („Evidenzen“) ermöglicht. Deshalb werden Bayes'sche Netze mit großen Erfolg in vielen Diagnose- und Expertensystemen eingesetzt [Ertel 2016].

Die mathematische Grundlage hierfür wird durch den Satz von Bayes gebildet:

<p><u>Satz von Bayes</u></p> $P(A B) = \frac{P(B A) * P(A)}{P(B)}$
--

$P(A|B)$ Wahrscheinlichkeit für Ereignis A,
unter der Bedingung das B eingetreten ist

$P(B|A)$ Wahrscheinlichkeit für Ereignis B,
unter der Bedingung das A eingetreten ist

$P(A)$ Wahrscheinlichkeit für Ereignis A

$P(B)$ Wahrscheinlichkeit für Ereignis B

Die Struktur eines Bayes'schen Netzes ist ein gerichteter Graph. Die Knoten des Graphen repräsentieren je eine Variable. Die gerichteten Kanten beschreiben jeweils einen direkten stochastischen Einfluss einer Variablen auf eine andere Variable. Jeder Knoten enthält dabei eine Tabelle (Conditional Probability Table), welche die bedingten Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Knotenvariablen bzgl. ihrer direkten Einflussvariablen definiert. Die Topologie des Graphen spiegelt somit (bedingte) stochastische Unabhängigkeitsannahmen wider. Jede Variable ist nur von ihren direkten Einflüssen abhängig. Sind diese Einflüsse durch Messung/Beobachtung bekannt, sind demnach alle anderen Variablen stochastisch ohne Einfluss, was die Modellierung wesentlich vereinfacht. [Ertel 2016]

In Bezug auf den Anwendungsfall *Spindellagerung* soll das nachfolgende Beispiel die Vorgehensweise verdeutlichen. Das Ziel des Bayes'schen Netzes besteht darin, den Abnutzungsgrad des überwachten Bauteils als bedingte Wahrscheinlichkeit zu ermitteln. Die Parameter der obersten Knoten des Netzes werden durch Eingangswerte (Betriebs- und Sensordaten, Anomalieerkennung) bestimmt. Die Struktur im Netz wird basierend auf dem Expertenwissen modelliert, in dem die Zusammenhänge beschrieben werden.

Den Parametern *Gelaufene Lastzyklen* und *Vibrationsmesswert* werden Eingangsdaten zugeordnet, die aus den angegebenen Quellen abgeleitet bzw. erfasst wurden. Aus dem Expertenwissen ist bekannt, dass diese Parameter Einfluss auf den abrasiven Verschleiß haben. Im Knoten für die Klassifikation werden die wechselseitigen Abhängigkeiten für Lastzyklenzahl und Vibration und die daraus resultierenden Wahrscheinlichkeiten für abrasiven Verschleiß hinterlegt. Die Struktur im Netz gibt nun vor, dass die Lastzyklenzahl und der Vibrationswert in den Knoten für die Klassifikation eingehen, der daraufhin die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgibt. Hierbei

wird eine Tabelle erstellt, in der für verschiedene Ausmaße von abrasiven Verschleiß die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten, bedingt durch die Inputdaten, angegeben werden. Bei niedrigen Werten für gelaufene Lastzyklen und Vibration ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass kein oder nur geringer abrasiver Verschleiß vorliegt. Liegen jedoch höhere Werte der Inputdaten vor, steigt auch die Wahrscheinlichkeit für eine höhere Abnutzung durch Abrasion.

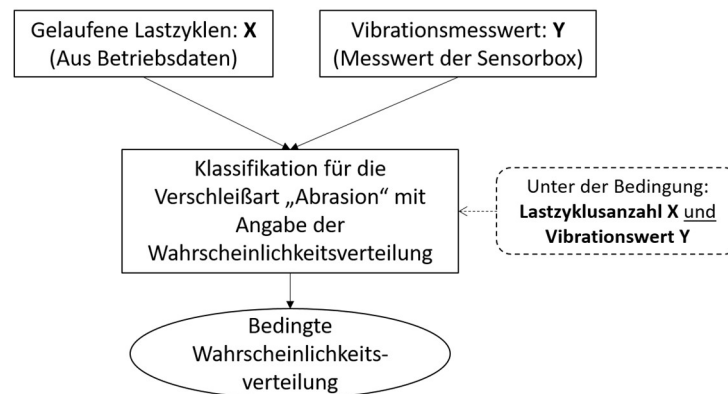


Abb. 19: Funktion des Bayes'schen Netzes

Informationstechnische Umsetzung bei der Überwachung der Spindellagerung

Das vorgestellte Konzept wurde für den Anwendungsfall angewendet und aus den Erkenntnissen möglicher Fehler und deren Ursachen wurde ein technischer Entwurf für eine sensorgesteuerte Datenerhebung realisiert. Berücksichtigt wurde hierbei Sensorik für Beschleunigung, Temperatur sowie Luftqualität. Ein externer Temperaturfühler ermöglicht zusätzlich die Erfassung der Umgebungstemperatur in unmittelbarer Nähe zum betrachteten Untersuchungsgegenstand. Des Weiteren wurde für die Konnektivität der Sensorbox Ethernet (Industriestandard) verwendet. Diese Schnittstelle ermöglicht die Anbindung der Box an ein üblicherweise vorhandenes Netzwerk, über das bereits Betriebsdaten der DESMA-Maschinen (Shopfloor-System) übertragen werden.

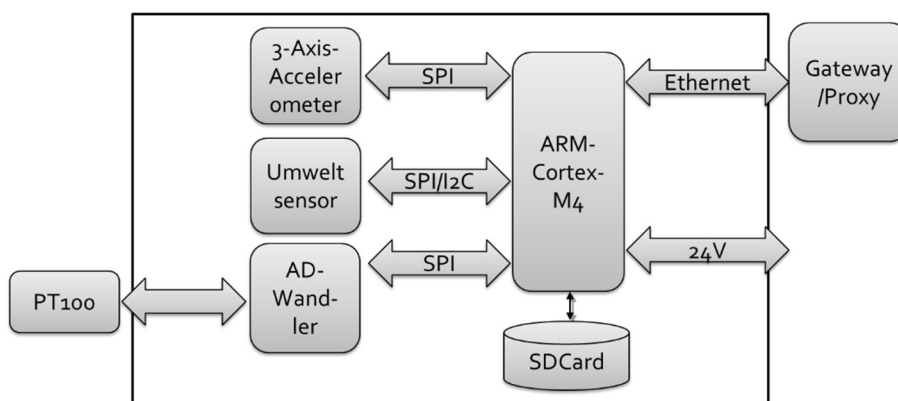


Abb. 20: LongLife Sensor LLMS1

Umgesetzt wurde das Konzept mit dem FreeRTOS Betriebssystem [Asche 2016], welches eine echtzeitfähige Datenverarbeitung zulässt. Die Datenerfassung erfolgt periodisch und kann an den Anwendungsfall angepasst werden. Weiter besteht die Möglichkeit, die erfassten Daten auf einer SD-Karte, lokal zu speichern.

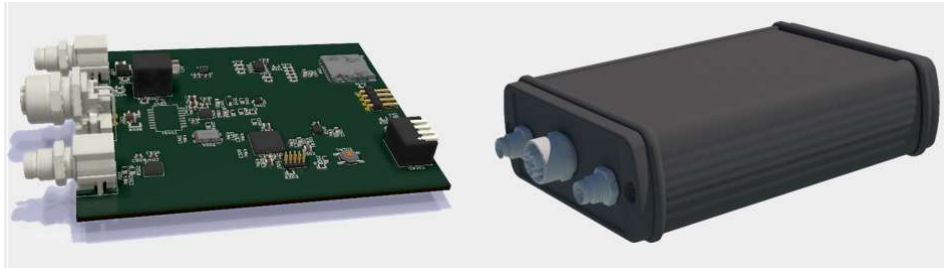


Abb. 21: Designentwurf des LongLife Sensors

Die bereits erfassten Maschinenbetriebsdaten werden über das Internet in die DESMA-Cloud übertragen. Diese bereits vorhandene IT-Infrastruktur wurde analysiert, um eine Anbindung der LongLife-Sensorbox an die Smart-Shopfloor-Plattform zu realisieren. Das Ziel hierbei ist, keine unterschiedlichen parallelen Strukturen zu planen und auch mögliche Synergien zu nutzen. In Abb. 22 wird die Einbindung der LongLife Sensorbox in die vorhandene Struktur dargestellt. Die erfassten Daten, Sensorbox und Betriebsdaten, werden als JSON-File in die DESMA-Cloud übertragen. Ein NTP-Server gibt die aktuellen Zeitstempel vor, sodass die erfassten Daten synchronisiert werden können. Für den Datenaustausch wurden REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) nach dem Open-API-Standard definiert und umgesetzt.

Die so geschaffene Infrastruktur lässt somit die Option offen, die Longlife Sensorbox als weitere Anwendung an die DESMA-Cloud anzubinden. So kann erreicht werden, dass über eine Weiche parallel zum bestehenden Smart Shopfloor die bisher eingehenden Betriebsdaten ergänzt werden.

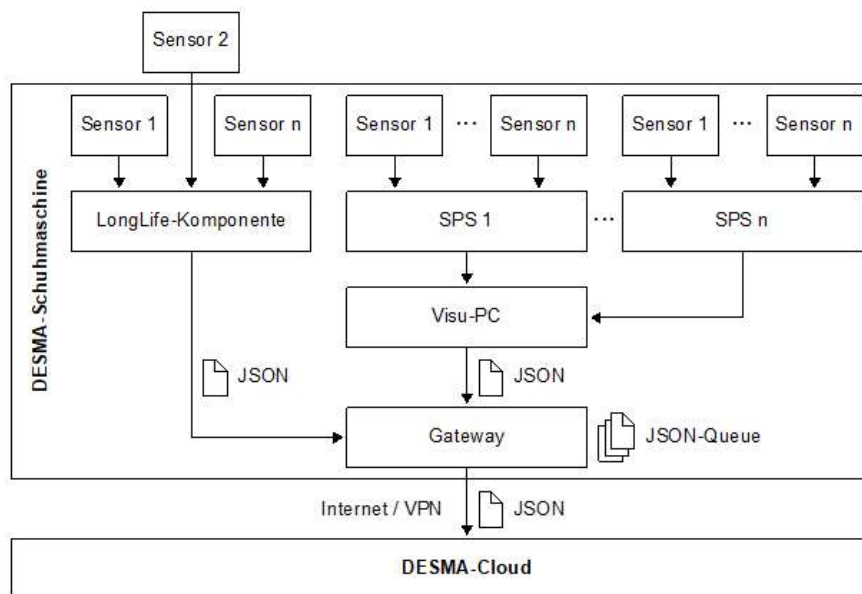


Abb. 22: Anbindung mit projektspezifischen Sensoren

Abgeschlossen wird die datentechnische Umsetzung mit der Realisierung einer *LongLife Engine*. Deren Aufgabe ist einerseits das Entgegennehmen des Datenstroms, die Analyse der Daten und die Anreicherung des Datenstroms mit abgeleiteten Prognosen. Andererseits soll durch diese Anwendung die Bewertung, also die Erkennung von Ereignissen auf der Basis der Prognosen visualisiert werden. Im LongLife-Kontext kann dieses beispielsweise bedeuten, dass ein Schwellenwert für die zu erwartende Restnutzungsdauer einer Komponente unterschritten wurde. Es kann auch ein Hinweis gegeben werden, dass die Restnutzungsdauer verlängert werden kann, wenn die Maschinenauslastung reduziert wird.

Fazit

Die Erfassung von Betriebs-, Maschinen- und Umgebungsdaten bietet neue Möglichkeiten für eine verbesserte Instandhaltungsplanung, welche zuverlässigere Prozesse ermöglicht. Durch eine Restnutzungsdauerbestimmung kann die Funktionalität von Bauteile/Komponenten besser ausgeschöpft werden, wodurch Ressourcen und Kosten gespart werden. Die geschaffene Datenbasis in Verbindung mit einer kontinuierlichen Erfassung von Bauteilzuständen kann des Weiteren dazu genutzt werden, präventiv Wartungs- und ggfls. Austauschmaßnahmen exakter vorherzusagen, notwendige Ersatzkomponenten rechtzeitig an den Einsatzort zu liefern und den Serviceeinsatz zu planen. Ausgetauschte Bauteile können dann abschließend daraufhin geprüft werden, ob sie in weniger anspruchsvollen Anwendungen und / oder im Rahmen anderweitiger gesetzlicher Vorgaben zur Verbauung neuwertiger Bauteile erneut genutzt werden können. Hierdurch soll auch für gebrauchte Bauteile eine sicher zu prognostizierende Nutzungsdauer ermittelt werden können.

Für den hier vorgestellten Ansatz sind detaillierte Kenntnisse bzgl. der Abnutzungsprozesse in den betroffenen Bauteilen notwendig. Hierüber lässt sich eine geeignete Sensorik bestimmen, mit der direkt oder indirekt die relevanten bzw. korrelierenden Messwerte erfasst werden können, die auf Abnutzungen hinweisen. Darüber hinaus sind für jeden Anwendungsfall Systemkonfigurationen erforderlich, da die zu überwachenden Systeme jeweils spezifische Ausprägungen und Merkmale aufweisen, die eine Anpassung des vorgestellten Modells notwendig machen. Beispielsweise muss das verwendete probabilistische Einflussmodell in Form eines Bayes'schen Netzes, in Abhängigkeit von den im Anwendungsfall benötigten Sensordaten, angepasst werden. Zudem bedarf es einer datentechnischen Anbindung, historischer Messdaten und einer Quantifizierung von Abnutzungsvorgängen, um eine möglichst genaue Restnutzungsdauerprognose erstellen zu können.

Literatur

Asche, R. R. (2016). *Embedded Controller. Grundlagen und praktische Umsetzung für industrielle Anwendungen*. Springer Vieweg Verlag

Bandow, G.; Holzmüller, H. H. (Hrsg.) (2010). „Das ist gar kein Modell“. *Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. Gabler Research Verlag

Bertsche, B.; Lechner, G. (2004). *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. 3., überarb. und erw. Auflage. Springer Verlag

- Broichhausen, J. (1985). Schadenskunde, Analyse und Vermeidung von Schäden in Konstruktion, Fertigung und Betrieb. 1. Auflage. Carl Hanser Verlag
- Buxmann, P.; Schmidt, H. (Hrsg.) 2021. Künstliche Intelligenz. Mit Algorithmen zum wirtschaftlichen Erfolg. 2. akt. und erw. Auflage. Springer Gabler Verlag
- Czichos, H.; Habig, K.-H. (2020). Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 5. Auflage. Springer Vieweg Verlag
- Daigeneau, R. (2011). Service Design Patterns: Fundamental Design Solutions for SOAP/WSDL and RESTful Web Services. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison-Wesley Verlag
- DIN 31051 (2012). Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag
- DIN 50100 (2016). Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Beuth Verlag
- Einbock, S. (2021). Schadensakkumulation: Erklärung und Empfehlung der Miner-Regel. <https://www.einbock-akademie.de/schadensakkumulation-erklaerung-und-empfehlung-der-miner-regeln/>. Einbock Akademie UG Herr Dr.-Ing. Stefan Einbock. Vaihingen
- Ertel, W. (2016). Grundkurs Künstliche Intelligenz. 4. Auflage. Springer Vieweg Verlag
- Frochte, J. (2019). Maschinelles Lernen - Grundlagen und Algorithmen in Python. 2. Auflage. Hanser Verlag
- GMN (2010). Produktkatalog Hochpräzisionskugellager. GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG. Nürnberg
- Götz, S.; Eulitz, K.-G. (2020). Betriebsfestigkeit. Bauteile sicher auslegen. Springer Vieweg Verlag
- Haibach, E. (2006). Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3. korr. und erg. Auflage. Springer Verlag
- Hornbogen, E.; Warlimont, H.; Skrotzki, B. (2019). Metalle. Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen. 7. akt. und überarb. Auflage. Springer Vieweg Verlag
- ifaa (2019). Shopfloor-Management. Potenziale mit einfachen Mitteln erschließen. ifaa - Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V. Springer Vieweg Verlag
- Joensson (2016). Vorlesungs-Skript: Betriebsfestigkeit. Vorlesung im 3. Fachsemester des Masterstudienganges Maschinenbau. Prof. Dr. Dieter Joensson. HTW Berlin Fachbereich Ingenieurwissenschaften Technik und Leben
- Kaesche, H. (2011). Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. 3. neu bearb. u. erw. Auflage. Springer Verlag
- Matzka, S. (2021). Künstliche Intelligenz in den Ingenieurwissenschaften. Maschinelles Lernen verstehen und bewerten. Springer Vieweg Verlag
- Neidel, A.; Engel, L. et al. (2012). Handbuch Metallschäden. REM-Atlas und Fallbeispiele zur Ursachenanalyse und Vermeidung. 2. überarb. Auflage. Carl Hanser Verlag
- Radaj, D.; Vormwald, M. (2007). Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. 3. Auflage. Springer Verlag

Ritter, F. (2011). Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertationsschrift TU Darmstadt

Sander, M. (2018). Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen. Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage. 2. akt. und erw. Auflage. Springer Vieweg Verlag

Schaeffler (2013). Wälzlagerschäden. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Schweinfurt

Schlottmann, D.; Schnegas, H. (2016). Auslegung von Konstruktionselementen. Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinenbau. 3. Auflage. Springer Vieweg Verlag

Schmidt-Thomas, K. G. (2015). Integrierte Schadenanalyse. Technikgestaltung und das System des Versagens. 3. Auflage. Springer Vieweg Verlag

Siemon, A. (2006). Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung. Dissertationsschrift Universität Kassel

von Bommel, P. (2001). Lebensdauervorhersage anhand der Prüfung definiert vorgeschädigter, dynamisch hochbelasteter Bauteile. Dissertationsschrift TU Aachen

Wächter, M.; Müller, C.; Esderts, A. (2017). Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie. Springer Vieweg Verlag