TECHNISCHE UNIVERSITÄT
HAMBURG-HARBURG

Prüfungsausschuss für Diplom - Ingenieure

Grundlagenforschung zur Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen

Diplomarbeit

Prüfer:
Prof. Dr.-Ing. Uwe Starossek

Verfasser:
cand.-Ing. Jens Kesenheimer
Bergiusstraße 4, 22765 Hamburg

Beginn der Arbeit: 22.01.2003
Abgabetermin: 16.04.2003

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Grundlagen 4

2.1 Problemstellung 4
2.2 Abschätzung des Restnutzungs-Potentials 5
2.3 Gründe für eine Restnutzung 7
2.4 Komponenten einer WEA 8
2.5 Belastung einer WEA 9

3 Allgemeine Betrachtung zur Nutzungsdauer 11

3.1 Definition der Begriffe 13
3.2 Ermüdung und Betriebsfestigkeit 14
3.3 Ermittlung der „nominellen“ Lebensdauer 16
3.3.1 Untersuchungen an Laborproben 16
3.3.2 Untersuchungen auf dem Prüfstand 17
3.3.3 Betriebsuntersuchungen 18
3.4 Rechnerischer Nachweis der Betriebsfestigkeit 18
3.4.1 Einwirkungsmodell 19
3.4.2 Systemmodell 19
3.4.3 Schädigungsmodell 19
3.5 Ermüdungsbasierte Auslegungskonzepte 20

4 Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer einer WEA 21

4.1 Bemessung einer WEA 22
4.1.1 Unsicherheiten bei der Berechnung 25
4.2 Wiederkehrende Prüfung 26

5 Lösungsansätze anderer Branchen 28

5.1 Fehlertoleranz-Konzepte in der Luftfahrt 28
5.2 Beurteilung alter, schwingend beanspruchter Stahl-Bauwerke 34
5.3 Restnutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke 36
5.4 Beurteilung der Restnutzungsdauer von Schleusenantrieben 37
5.5 Ermittlung der Lebensdauer ermüdungsbeanspruchter Stahlbrücken via von Monitoring 38
5.6 Wiederkehrende Hauptuntersuchung bei Kraftfahrzeugen 41
5.7 Schwingungsdiagnostische Überwachung von Turbosätzen 42

6 Sicherheitskonzept für die Restnutzung einer WEA 43

6.1 Bauwerksüberwachung 44
6.1.1 Schadensdefinition 46

6.1.2 Überwachungsstrategie 46
6.1.3 Inspektion 47
6.1.4 Maßnahmenentscheidung 47
6.2 Prognostische Überwachung: Modell – Intervall – Inspektion....48
6.2.1 Bruchmechanik-Modell 48
6.3 Ständige Überwachung: Monitoring – Fehlermeldung – Inspektion 49

7 Sicherheitskonzept für die Restnutzung des Turmes....50

7.1 Dynamische Beanspruchung des Turmes 51
7.2 Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe....51
7.3 Ermüdungsschäden am Turm 53
7.3.1 Schwachstellen am Turm 53
7.3.2 Aufgetretene Ermüdungsschäden am Turm 54
7.3.3 Reparaturmethoden für Ermüdungsrisse 55
7.4 Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer des Turmes 56
7.5 Sicherheitskonzept für die Restnutzung des Turmes....56
7.5.1 Definition des kritischen Schadens 56
7.5.2 Überwachungsstrategie 57
7.5.3 Inspektion 57

8 Zusammenfassung....58

9 Fazit und Ausblick....60

Literaturverzeichnis 63

Darstellungsverzeichnis 68

1 Einleitung

Windenergieanlagen (WEA) unterliegen einer hohen dynamischen Belastung mit stark schwankenden Belastungszuständen. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Nutzungsdauer aller im Kraftfluss befindlichen WEA-Komponenten aus. Grundlage für die Bemessung ist gemäß der in Deutschland gängigen Richtlinien eine Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren. Daraus ergeben sich Lastwechselzahlen größer 10^9. 1991 wurde in Deutschland das Energieeinspeisegesetz eingeführt. Seitdem wächst die Anzahl der aufgestellten WEA verstärkt. Ab 2011 wird demzufolge verstärkt die folgende Frage aufgeworfen: Was soll nach Ablauf der analytisch ermittelten Nutzungsdauer mit den WEA geschehen?

Die Erforschung der Restnutzungsdauer und die Entwicklung von Konstruktions- und Auslegungsrichtlinien, auf deren Basis ein sicherer Weiterbetrieb gewährleistet werden kann, ist daher zwingend erforderlich und wird dazu beitragen, die wirtschaftliche und ökologische Betriebsweise von WEA aufrecht zu erhalten bzw. zu verbessern.

Ziel der Diplomarbeit ist es, eine Grundlage für die Erstellung einer neuen Richtlinie zu bilden. Die Richtlinie soll die Vorgehensweise definieren, wie mit einer WEA nach Ablauf der analytisch ermittelten Nutzungsdauer von 20 Jahren zu verfahren ist. Der Aspekt der Entsorgung wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Windenergiebranche ist noch sehr jung. Deswegen liegen für sie speziell noch keine Erfahrungen mit einer Restnutzung von Anlagen vor. Auch in der Literatur ist sehr wenig bezüglich dieser Themenrichtung zu finden, weil sich die Frage einer Restnutzung bisher noch nicht stellte. Forschungsarbeiten befassen sich ausschließlich mit der Bemessung der Anlagen, nicht aber mit einer Restnutzung.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen vermittelt. Anhand einer Abschätzung des Restnutzungs-Potentials wird die Notwendigkeit für die Erstellung einer „Restnutzungs“-Richtlinie verdeutlicht. Die am Kraftfluss beteiligten Komponenten werden kurz dargestellt. In Kapitel 3 werden allgemeine Betrachtungen zur Nutzungsdauer erläutert. Es wird auf das Phänomen der Werkstoffermüdung eingegangen und die Methoden zum rechnerischen Nachweis der Betriebsfestigkeit werden vorgestellt. Kapitel 4 stellt den Stand der Technik des Sicherheitskonzeptes für die planmäßige Nutzungsdauer einer WEA vor. Die Grundlagen der Bemessung und die darin vorhandenen Unsicherheiten werden erläutert. In Kapitel 5 werden Verfahren anderer Technikbereiche vorgestellt, in denen Betrachtungen zur Betriebsfestigkeit von Bedeutung sind und in denen über wesentlich mehr Erfahrungswerte verfügt wird. In Kapitel 6 wird ein mögliches Sicherheitskonzept für die Restnutzung einer WEA erarbeitet, das in Kapitel 7 beispielhaft auf die bautechnischen Komponente Turm angewandt wird. Dabei wird vertiefend auf das Schädigungsverhalten des Werkstoffes Stahl eingegangen. Bisher aufgetretene Ermüdungsschäden werden gezeigt. Kapitel 8 fasst die Arbeit zusammen. Ein resümierendes und ausblickendes Kapitel 9 schließt die Arbeit ab.

2 Grundlagen

Insgesamt drehen sich in Deutschland ca. 14000 WEA (siehe Bild 2.1). Die gängige DIBt-Richtlinie [DIBt][1] schreibt vor, eine WEA für eine Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren zu bemessen. Noch gibt es in Deutschland keine Anlagen, die seit 20 Jahren im Betrieb sind. Die älteste Anlage, die momentan in Schleswig-Holstein betrieben wird, ist seit 16 Jahren am Netz [Hanssen]. In wenigen Jahren werden aber viele Anlagen ihre planmäßige Nutzungsdauer erreichen und spätestens dann stellt sich die Frage, wie mit diesen Anlagen weiter vorgegangen werden soll. Anfragen von Betreibern für den weiteren Betrieb in der Phase der Restnutzungsdauer liegen bereits vor.

Die zentrale Frage lautet somit: „Wie kann der sichere Weiterbetrieb der WEA im Anschluss an die planmäßige Nutzungsdauer, sprich während der Restnutzungsdauer, gewährleistet werden?“

Die Erforschung der Restnutzungsdauer und die Entwicklung von Konstruktions- und Auslegungsrichtlinien, auf deren Basis ein sicherer Weiterbetrieb gewährleistet werden kann, ist daher zwingend erforderlich und wird dazu beitragen, die wirtschaftliche und ökologische Betriebsweise von WEA aufrecht zu erhalten bzw. zu verbessern.

2.1 Problemstellung

„Wind turbines differ from other technologies by being the largest rotating machinery on earth, and by dealing with relatively slow moving wind flows, but with extremely variable forces. The fundamental aerodynamic and structural dynamic problems are no less complex than in helicopter construction.“ [2] [Soren]

Aufgrund ihrer permanenten dynamischen Beanspruchung sind WEA einer dementsprechenden Materialermüdung und einer mit der Zeit zunehmenden Schädigung ausgesetzt, so dass ihre Nutzungsdauer begrenzt ist. Für die geforderte Nutzungsdauer von 20 Jahren ergeben sich für den Betriebsfestigkeitsnachweis Lastwechselzahlen von 10^9. Natürlich wäre es möglich, für bestimmte Komponenten eine längere Dauer vorzusehen, allerdings wäre das eine Verschwendung, wenn andere, wichtigere Teil schon früher den Dienst quittierten.

[1] Vgl. [DIBt] Abschnitt 8.1: „Die Lebensdauer der Anlage ist mit mindestens 20 Jahren anzunehmen.“

[2] [Soren]: „WEA sind die größten rotierenden Anlagen auf der Welt und unterscheiden sich somit von allen bisherigen Technologien. Sie arbeiten zwar mit relativ langsamen Luftströmungen, sind dabei aber extrem schwankenden Kräften ausgesetzt. Die dabei auftretenden aerodynamischen und struktur-dynamischen Probleme sind nicht weniger komplex als die bei Helikoptern.“

2.2 Abschätzung des Restnutzungs-Potentials

Mit dem Abschätzen des Restnutzungs-Potentials wird die Notwendigkeit für die Erstellung einer „Restnutzungs“-Richtlinie verdeutlicht.

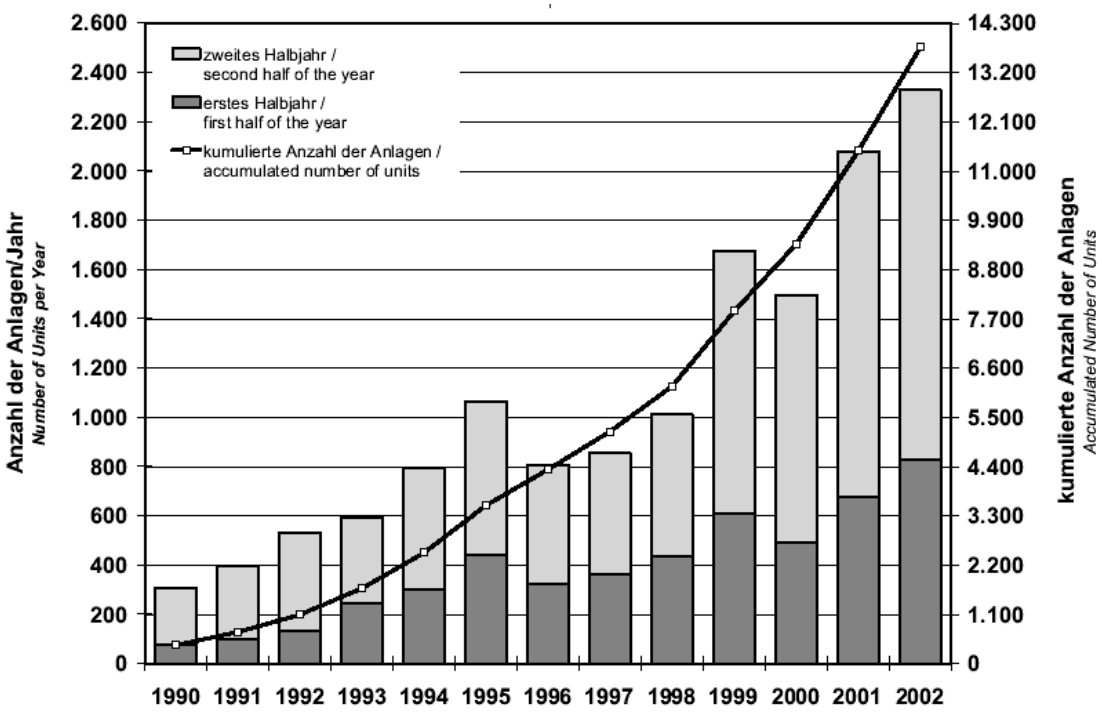


Bild 2.1: Entwicklung der jährlich aufgestellten und kumulierten Anzahl von WEA [DEWI22]

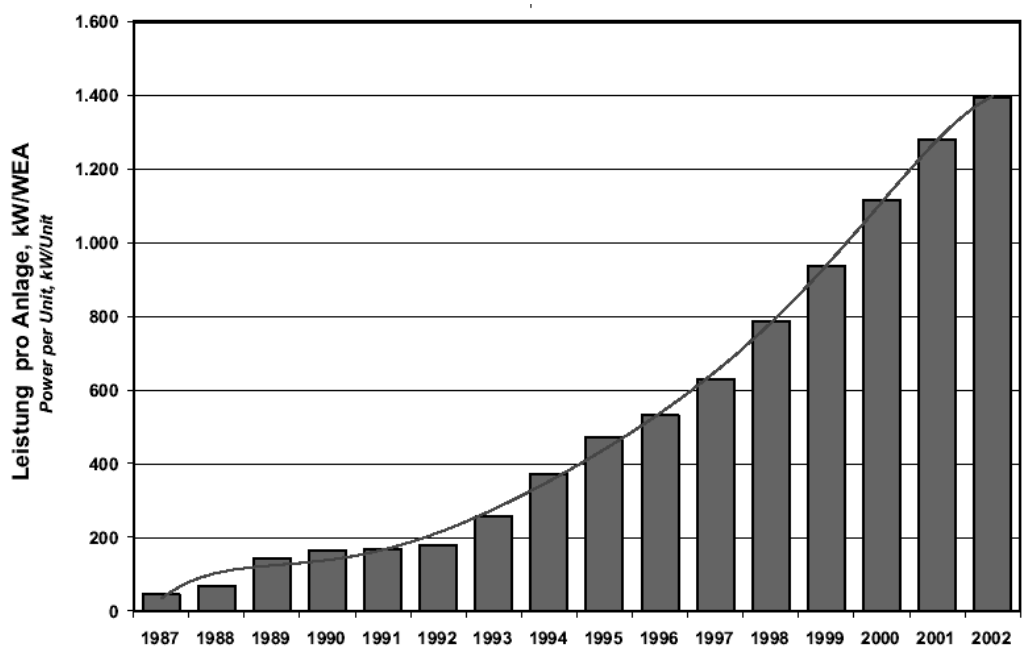


Bild 2.2: Entwicklung der durchschnittlich installierten Leistung pro WEA [DEWI22]

Wurden 1988 noch weniger als 100 WEA errichtet, waren es fünf Jahre später schon annähernd 600. Parallel zu dieser Entwicklung stieg die Anlagengröße. Belief sich die durchschnittliche Leistung einer WEA 1988 noch auf unter 100 kW, beträgt sie heute, 14 Jahre später, ca. 1,4 MW. Rückblickend lässt sich die Entwicklung der WEA grob in fünf Generationen einteilen (siehe Bild 2.3):

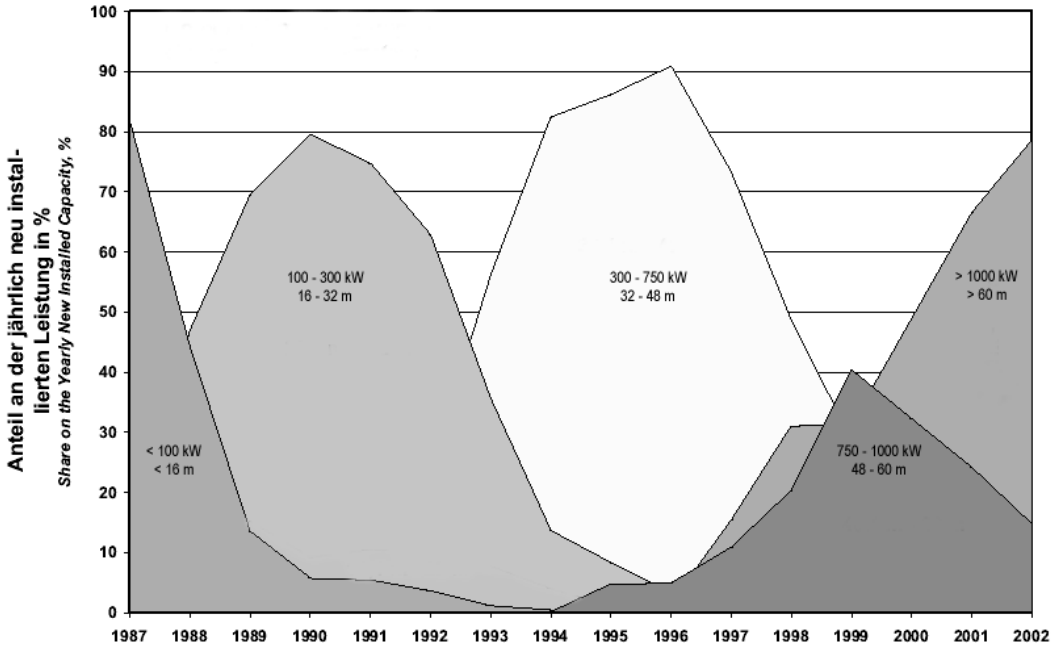


Bild 2.3: Anteil unterschiedlicher Anlagengrößenklassen an der jährlich neu installierten Leistung [DEWI22]

Die Auswertung der Bilder 2.1/2.2/2.3 ergibt die Anzahl der Anlagen, die theoretisch für eine Restnutzung in Frage kommen.

Tabelle 2.1: Abschätzung des Restnutzungs-Potentials

Jahrgang	Leistung in kW	Anlagenanzahl
1987 – 1988	> 100 kW	ca. 150[3]
1988 – 1993	100 – 300 kW	ca. 1950[4]
1993 – 1998	300 – 750 kW	ca. 4500
1998 – 1999	750 – 1000 kW	ca. 1700
1999 – heute	> 1000 kW (bis 5000 kW)	ca. 5900

[3] [DEWI1]
[4] [DEWI5]

Entsprechend der Reihenfolge in Tabelle 2.1 werden die Anfragen der Betreiber bezüglich einer Restnutzung sein, d.h. es wird sich zunächst um Anlagen der Größenordnung bis 300 kW handeln. Das theoretische Potential liegt dabei bei ca. 2100 Anlagen. Die tatsächliche Anzahl an WEA, die länger als 20 Jahre betrieben werden sollen, liegt naturgemäß deutlich darunter. Viele Anlagen werden vorzeitig hauptsächlich aus betriebswirtschaftlichen Gründen vom Netz genommen. Teilweise werden sie durch neue, größere Anlagen ersetzt (Repowering).

2.3 Gründe für eine Restnutzung

Grosses Interesse an einer Restnutzung haben vor allem die Betreiber der WEA. Die Anlagen sind abgeschrieben und es fallen nur noch die laufenden Betriebskosten an. Zwar werden die Wartungs- und Instandsetzungskosten mit dem Alter der Anlage zunehmen, dennoch sinken die Produktionskosten pro kWh.

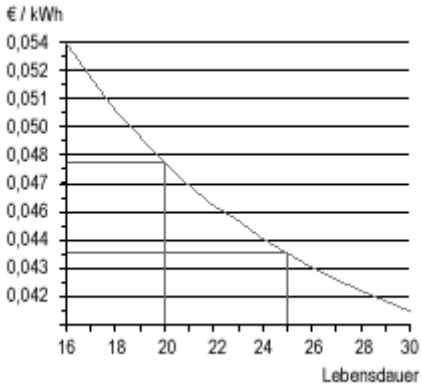


Bild 2.4: Produktionskosten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer [Danish]

Es sind aber nicht nur die betriebswirtschaftlichen Interessen, die für einen Weiterbetrieb der Anlage sprechen. Zuallererst werden die Anlagen aus der Gründerzeit ihre planmäßige Nutzungsdauer erreichen. Private Betreiber haben viel „Herzblut“ in ihre Anlagen investiert, und diese sind zu ihrem Hobby geworden.

Mit der Entwicklung der Windenergiebranche haben sich gleichzeitig die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung von neuen WEA geändert. Gab es in der Anfangszeit fast keinerlei Standortbeschränkungen, dürfen heute neue Anlagen nur noch auf ausgewiesenen Flächen errichtet werden. Derzeit im Betrieb befindliche Anlagen, die nicht auf diesen ausgewiesenen Flächen stehen sind nach heutiger Gesetzgebung bestenfalls durch baugleiche zu ersetzen [Hanssen]. Soll der Standort weiterhin erhalten bleiben, wird der Betreiber auf eine weitere Nutzung der Anlage drängen. Z.B. stehen in Schleswig-Holstein außerhalb von so genannten Eignungsflächen ca. 700 Altanlagen [Jensen].

Ein allgemeines Herstellerinteresse ist nicht zu erwarten, da Neubauten lukrativer wären.

Hinzu kommt, dass eine längere Nutzungsdauer und die damit verbundene Vermeidung einer vorzeitigen Entsorgung das Image der Windenergie-Branche als eine zukunftweisende Technologie mit ökologischer Ausrichtung stärkt.

2.4 Komponenten einer WEA

Dieses Unterkapitel zeigt einen groben, sehr kurz gehaltenen Überblick über die am Kraftfluss beteiligten Komponenten einer WEA. Eine umfassende Übersicht über die Grundlagen einer WEA bietet die Homepage der Danish Wind Industry Association [Danish].

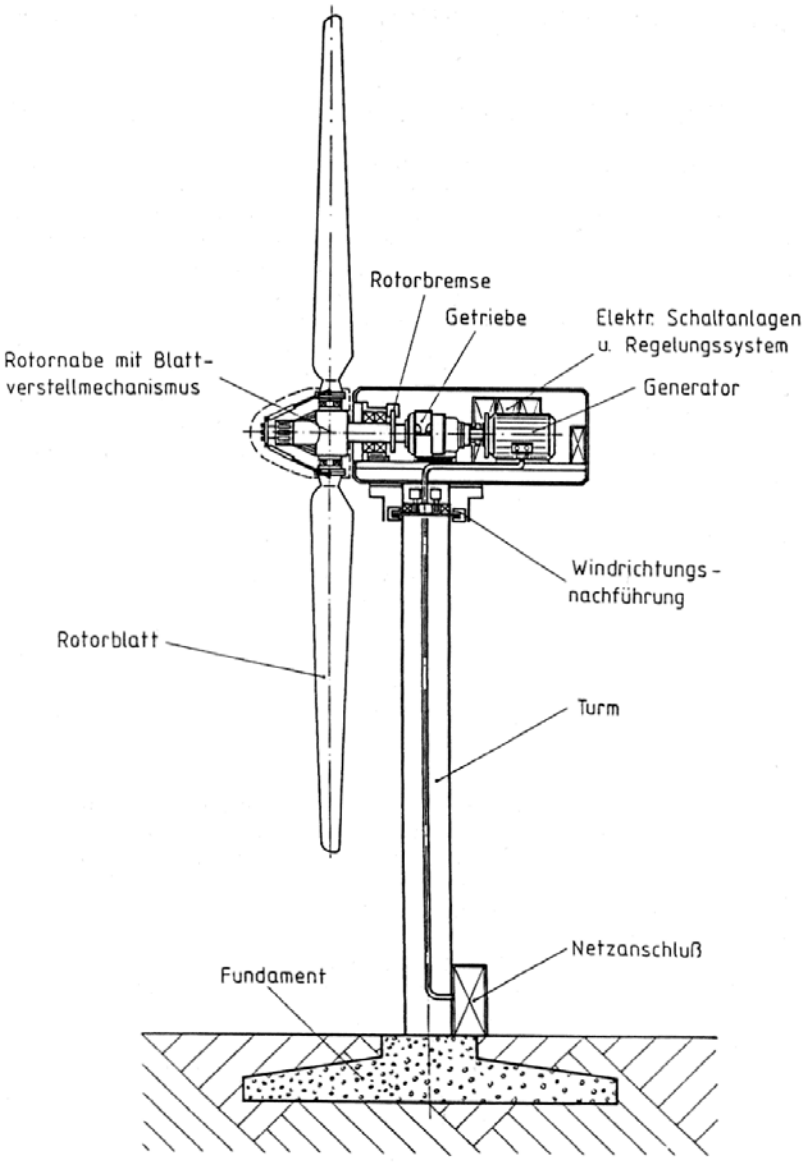


Bild 2.5: Komponenten einer Horizontalachsen-Windenergieanlage [Hau]

Die Rotorblätter fangen den Wind und leiten seine Leistung auf die Nabe. Bei stallgeregelten Anlagen sind die Rotorblätter fest mit der Nabe verbunden, bei pitchgeregelten Anlagen (siehe Bild) können die Winkel der Blätter verstellt werden. Bei 600 kW-Anlagen hat jedes Rotorblatt eine Länge von ca. 20 m

und wird ähnlich wie ein Flugzeugflügel konstruiert. Sie bestehen in der Regel aus Glas-Faser-Verbundwerkstoffen (GFK).

In der Gondel (Maschinenhaus) sind die maschinenbaulichen Komponenten der Anlage untergebracht. Sie ist drehbar auf dem Turm gelagert. Der Azimutantrieb sorgt dafür, dass die Gondel und damit der Rotor immer richtig zum Wind stehen. Die Rotornabe ist mit der langsamlaufenden Antriebswelle des Getriebes verbunden. Bei einer 600 kW-Anlage dreht sich der Rotor relativ langsam, mit ca. 20 bis 30 Umdrehungen pro Minute. Das Getriebe liegt zwischen langsamer Antriebswelle und schneller Abtriebswelle. Es bewirkt, dass die Abtriebswelle ungefähr 50mal schneller als die Antriebswelle läuft. Zum Einsatz kommen Planetengetriebe oder Stirnradgetriebe. Die schnelllaufende Abtriebswelle rotiert mit ungefähr 1.500 Umdrehungen pro Minute und treibt den elektrischen Generator an. Sie ist mit einer mechanischen Scheibenbremse für Notbremsungen ausgerüstet. Als elektrischer Generator wird normalerweise ein Induktionsgenerator oder Asynchrongenerator verwendet. Gefertigt werden die maschinenbaulichen Komponenten aus vergüteten Stählen.

Die elektronische Steuereinheit ist das „Gehirn“ der Anlage. Sie überprüft und steuert ständig das Verhalten der Anlage, wie z.B. Windnachführung, Pitchregelung, Ein- und Ausschaltvorgänge, Notabschaltung. Bei einer Geschwindigkeit von mehr als 25 m/s (50 Knoten) wird die Anlage automatisch abgeschaltet, um Schäden an ihr oder an der Umgebung zu vermeiden.

Der Turm einer WEA trägt die Gondel mitsamt dem Rotor. Normalerweise ist ein hoher Turm von Vorteil, da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt. Eine Anlage mit 600 kW hat eine Turmhöhe von 40 bis 60 m (entspricht der Höhe eines 13-20stöckigen Gebäudes). Stahl-Türme können entweder als Hohlturm oder als Gitterturm ausgeführt werden. Zum Einsatz kommen Baustähle.

Über das Stahlbeton-Fundament werden die Lasten schließlich ins Erdreich geleitet.

2.5 Belastung einer WEA

Zum einen müssen WEA während ihrer gesamten Betriebsdauer extremen Belastungen standhalten können. Das sind starke Böen, die statistisch gesehen einmal in 50 Jahren auftreten. Zum anderen sind WEA ständig sich ändernden Belastungen ausgesetzt, die die gesamte Anlage in Schwingung versetzen. Das gilt besonders dann, wenn sie in Gegenden mit sehr turbulenten Windverhältnissen stehen. In der der planmäßigen Nutzungsdauer erfahren die am Lastfluss beteiligten Komponenten bis zu 10^9 Lastwechsel. In Bauteilen, die einer ständig wechselnden Belastung ausgesetzt sind, können sich nach und nach Risse bilden, bis sie der Belastung nicht mehr standhalten und brechen.

Die Ermüdungsbeanspruchung spielt somit bei allen am Kraftfluss beteiligten Komponenten eine sehr gewichtige Rolle und bestimmt deren endliche Nutzungsdauer. Mit diesem Problemkreis beschäftigt sich die Strukturdynamik. Ingenieure haben mathematische Computermodelle entwickelt, mit denen das Verhalten der WEA während der Nutzungsdauer, normalerweise 20 Jahre, simuliert und analysiert werden kann und die Komponenten bemessen werden können.

Ein historisches Beispiel für die Ermüdungsproblematik bei WEA ist die deutsche Testanlage „Growian“, die nach dreiwöchigem Betrieb stillgelegt werden musste.

3 Allgemeine Betrachtung zur Nutzungsdauer

„Maschinen, Apparate, Fahrzeuge und Bauwerke versucht man ohne unnötigen Aufwand an Werkstoff und Arbeit grundsätzlich so zu bemessen, dass sie den zugemuteten, erwarteten oder möglichen Beanspruchungen auf die Dauer oder für eine vorgesehene Zeit widerstehen. Die Lösung dieser in der Praxis vielfältig abgewandelten Aufgabe gelingt umso sicherer, je klarer die Beanspruchungsverhältnisse erkundet sind, je genauer das Verhalten der Werkstoffe bei solchen Beanspruchungen bekannt ist, je zweckmäßiger die Beanspruchung und die im Werkstoff darstellbare Widerstandsfähigkeit an den entscheidenden Stellen aufeinander abgestimmt wurden und je besser diese Voraussetzungen im fertigen Gegenstand erfüllt sind.“ (M. Pfender aus [Pohl])

Tabelle 3.1: Planmäßige Nutzungsdauer ausgewählter Tragkonstruktionen [Faber]

Temporäre Bauten	< 5 Jahre
Industriebauten	10 – 40 Jahre
Windenergieanlagen	20 – 25 Jahre
Wohnbauten	60 – 80 Jahre
Brücken	~100 Jahre
Staumauern	~150 Jahre

Neuzeitliche Konstruktionen sind Konstruktionen auf Zeit, d.h., sie werden für eine endliche Nutzungsdauer konzipiert. Bei Bauwerken beträgt die planmäßige Nutzungsdauer üblicherweise bis zu 150 Jahren, was aber nicht zwingend bedeutet, dass das Bauwerk abgerissen werden muss, wenn es seine planmäßige Nutzungsdauer erreicht hat. Prinzipiell kann bei entsprechender Instandhaltung jede Konstruktion auf unbestimmte Zeit weiter betrieben werden. Für eine weitere Nutzung, man spricht dann von Restnutzung, muss aber jederzeit eine ausreichende Sicherheit gewährleistet werden. Die heutigen Normungskonzepte sind so ausgelegt, dass bei deren Anwendung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nur eines von einer Million Bauwerken versagen darf (vgl. [Faber]).

Durch die fortwährende Einwirkung steigt die Schädigung jeden Bauteils, bis schließlich ein Versagen des Bauteils eintritt. Die somit endliche Nutzungsdauer von Bauteilen muss bereits bei der Planung mit berücksichtigt werden. Schädigungen werden beispielsweise verursacht durch:

- dynamische Lasten, die zu einer Ermüdung des Werkstoffes führen
- Korrosion, die eine chemische Veränderung des Werkstoffs beinhaltet (Zersetzungsprozess)

- tribologische[5] Einflüsse (bei rotierenden Bauteilen), die Verschleiß mit sich bringen

Infolge zunehmender Schädigung sinkt die Sicherheit der Gesamtkonstruktion, wenn nicht mit Hilfe von Instandhaltungsmaßnahmen diesem Prozess entgegengesteuert wird. Ziel während der gesamten Nutzungsdauer ist die optimale Erfüllung aller Anforderungen, die an das Einzelbauteil und an die Gesamtkonstruktion unter Gewährung der Sicherheit gestellt werden.

Unter Sicherheit wird dabei sowohl die Bauteilsicherheit verstanden (Sicherheit gegen Bruch, unzulässige Verformung, Verschleiß, Korrosion), die Funktionssicherheit (dauernde Verfügbarkeit), die Arbeitssicherheit (Sicherheit für den Menschen) und schließlich die Umweltsicherheit.

Dabei ist zu beachten, dass die Nutzungsdauer und somit auch die Restnutzungsdauer von zahlreichen, untereinander in wechselseitiger Beziehung stehenden Faktoren abhängig ist.

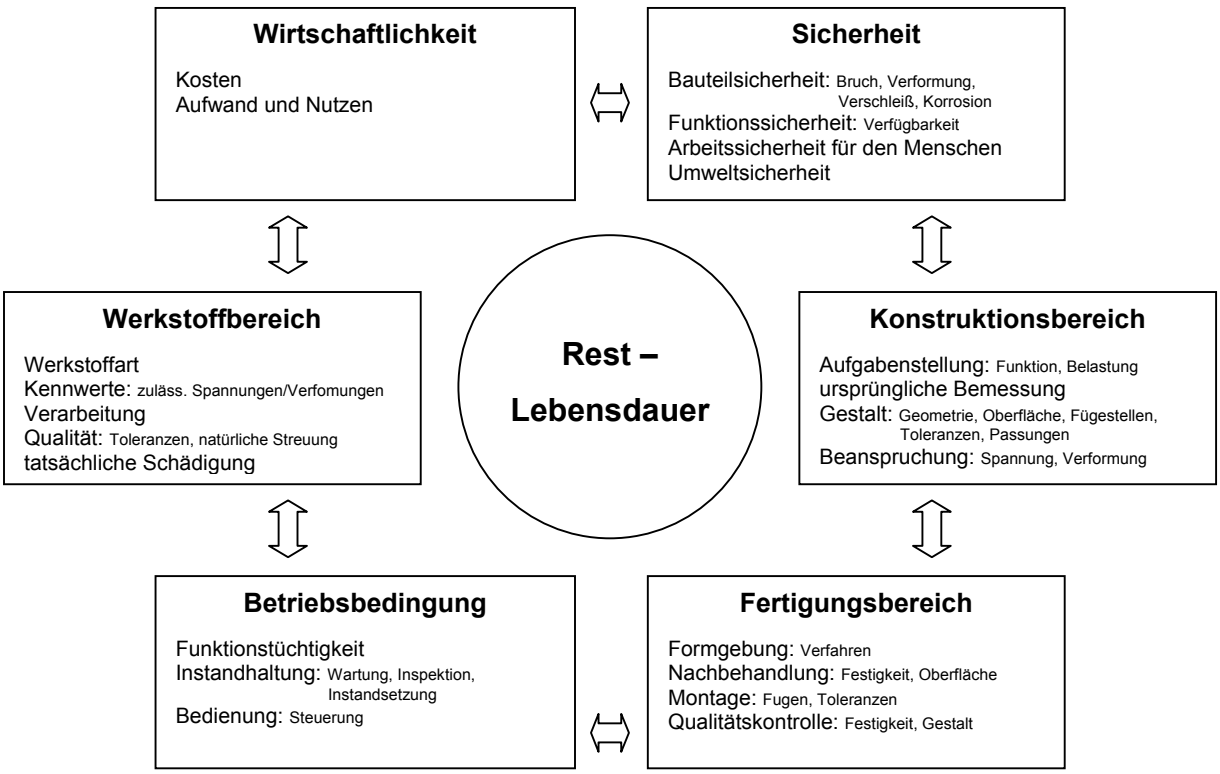


Bild 3.1: Einflussbereiche auf die Restlebensdauer

Für die Lösung des Problems der Restnutzung gilt es, eine optimale Kompromisslösung zur Ausschöpfung der sicherheitstechnisch vertretbaren Nutzungsdauer zu finden. Dies ist deshalb besonders schwierig, weil u. a. sowohl die im Betrieb auftretende Belastung als auch die vorhandene Tragfähigkeit mehr oder minder starken Schwankungen unterworfen ist, so dass bei der Beurteilung der verbleibenden Nutzungsdauer in den meisten Fällen von Annahmen ausgegangen werden muss.

[5] Tribologie: Lehre von Reibung, Verschleiß und Schmierung gegeneinander bewegter Gegenstände

3.1 Definition der Begriffe

Die Nutzungsdauer ist, allgemein betrachtet, die Zeitspanne von der Inbetriebnahme einer technischen Anlage bis zu ihrer planmäßigen Stilllegung. In dieser Zeit soll die Anlage nicht nur möglichst störungsfrei, sondern auch wirtschaftlich arbeiten. In der modernen Technik wird daher in der Regel die planmäßige Nutzungsdauer einer Konstruktion vorgegeben. Soll die Anlage dennoch weiterhin betrieben werden, spricht man von der Restnutzungsdauer.

Die Begriffe Lebensdauer und Nutzungsdauer sind synonym. In der Literatur wird meistens jedoch der Begriff der Lebensdauer benutzt, obwohl der Begriff Nutzungsdauer den Tatbestand besser beschreibt. Für die Begriffe Restlebensdauer und Restnutzungsdauer gilt das gleiche.

Innerhalb dieser Arbeit beschreiben die Begriffe Lebensdauer/Nutzungsdauer das Zeitintervall der ursprünglich geplanten Betriebsdauer eines Bauteils. Bei WEA-Komponenten ist dies das Intervall mit den Intervallgrenzen t = 0 (Inbetriebnahme/Neuzustand) und t = 20 Jahre (planmäßige Nutzungsdauer/Gebrauchtzustand). Mit Restlebensdauer/Restnutzungsdauer wird die darauf folgende Betriebsphase bis zur Stilllegung der Anlage beschrieben, d.h. zu Intervallbeginn der Restnutzungsdauer befindet sich die Anlage im Gebrauchtzustand. Die Gesamtlebensdauer beschreibt das Intervall von der Inbetriebnahme bis zur Ausmusterung der Anlage.

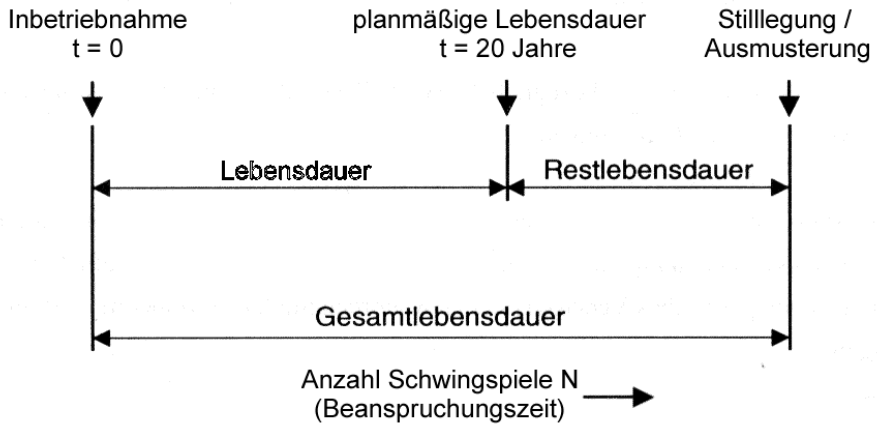


Bild 3.2: Lebensdauerphasen

Bei schwingender Beanspruchung sind die Begriffe der Lebensdauer/Nutzungsdauer etwas anders definiert. Dabei wird die Lebensdauer/Nutzungsdauer definiert als die Einsatzzeit von der Inbetriebnahme bis zum technischen Anriss. Bei einem schwingbeanspruchten Bauteil wird diese Phase zusätzlich in die Abschnitte einer rissfreien Phase und die Rissbildungsphase (dem Intervall von der Entstehung eines Mikroanrisses bis zum technischen Anriss) unterschieden.

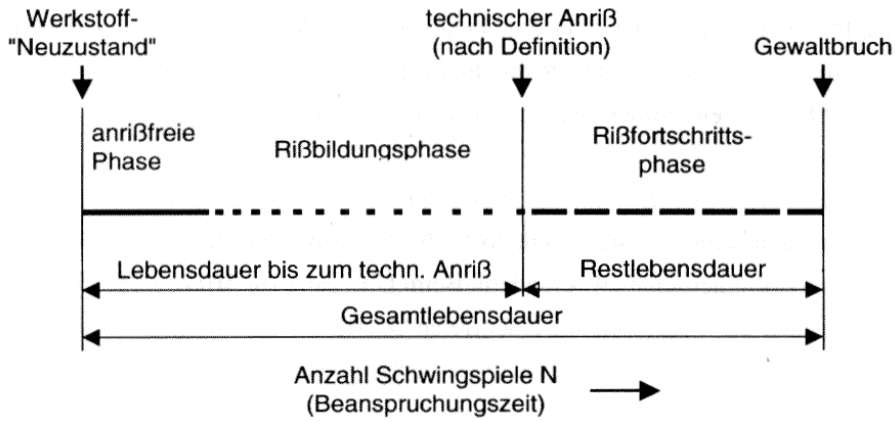


Bild 3.3: Phasen der Werkstoffermüdung [Gudehus]

Im modernen Leichtbau ist zusätzlich die Nutzung des Materialwiderstandes in einer dritten Phase, die der Rissausweitung, d.h. der Zeitspanne zwischen dem technischen Anriss und dem Bruch, von wesentlicher Bedeutung. Typische Beispiele hierfür sind Konstruktionen der Raketentechnik, wo viele Teile nur einmal eingesetzt werden, und der Luftfahrt, wo es insbesondere auf möglichst große Sicherheit und hohe Gewichtsersparnis ankommt. Diese Tendenz tritt jedoch auch in allen übrigen technischen Bereichen, ebenso in der Windenergiebranche, aus Wirtschaftlichkeitsgründen in den Vordergrund.

3.2 Ermüdung und Betriebsfestigkeit

Nach [Hirt] bildet die Materialermüdung eine der grundlegenden Schadensursachen bei Tragelementen. Ermüdungsprobleme treten immer dann auf, wenn eine zeitlich veränderliche, sich wiederholende Belastung auf den Werkstoff bzw. die Struktur wirkt. Unter einer derartigen dynamischen Belastung ist die Tragfähigkeit von Werkstoffen deutlich niedriger als unter statischer Lastaufbringung. Jeder Werkstoff hat sein eigenes, spezifisches Widerstandsverhalten. Ermüdung äußert sich in Form von Rissen, die sich an bestimmten Stellen innerhalb der Konstruktion bilden. Die schwingbeanspruchten Bauteile können durch Schwingbruch oder auch schon durch Schwinganriss versagen.

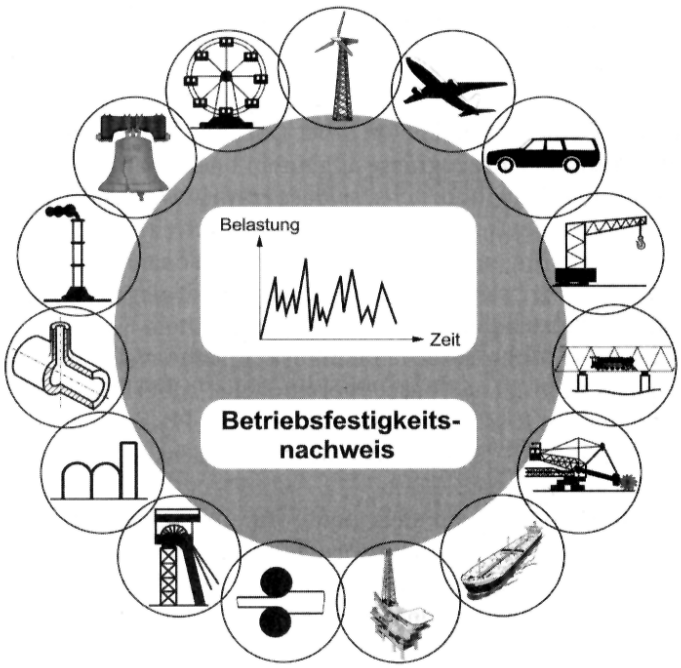
Kennzeichen eines Schwingbruchs ist, dass er nicht wie der Gewaltbruch als Folge einer einmaligen extremen Beanspruchung auftritt, sondern im Verlauf der Zeit unter der schwingenden Beanspruchung entsteht. Die bis zum Bruch oder Anriss ertragene Einwirkungszeit der Schwingbeanspruchung wird als die Nutzungsdauer des Bauteils bezeichnet.

Der Begriff Betriebsfestigkeit steht für eine lebensdauerorientierte Auslegung schwingbeanspruchter Bauteile und Konstruktionen, die den Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Größe der Schwingbeanspruchung berücksichtigt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass

- die zumeist zufallsartig in unterschiedlicher Größe und Häufigkeit auftretenden Betriebsbeanspruchungen wirklichkeitsnah angesetzt werden.

- die Konstruktion auf eine endliche Nutzungsdauer ausgelegt wird, die sich aus ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer ableitet.
- die geforderte Nutzungsdauer über eine statistisch begründete Sicherheitszahl mit einem Grenzwert der Ausfallwahrscheinlichkeit verknüpft wird.
- alle maßgeblichen Einflüsse werkstofflicher, konstruktiver, fertigungsbedingter, betrieblicher und umgebungsbezogener Art beachtet werden, die das Schwingfestigkeitsverhalten der Bauteile bestimmen (vgl. [Gaßner1]).

Gegen Ende der dreißiger Jahre wurde diese Betrachtungsweise der Betriebsfestigkeit für den Flugzeugbau entwickelt und findet heute Anwendung in zahlreichen Technikbereichen.



- Windenergieanlagen
- Flugzeugbau
- Automobilbau
- Kranbau
- Eisenbahnbrücken
- Bergbau
- Schiffsbau
- Offshore-Industrie
- Stahlverarbeitung
- Fördertechnik
- Kraftwerkstechnik
- Rohrleitungsbau
- Türme
- Glockenbau
- Fahrbetrieb

Bild 3.4: Technikbereiche, in denen Betrachtungen zur Betriebsfestigkeit von Bedeutung sind [Seeger]

Die Problemstellung der Betriebsfestigkeit ergibt sich aus der technischen, wirtschaftlichen und haftungsrechtlichen Notwendigkeit, Schwingbruchschäden durch eine geeignete Gestaltung, Bemessung, Fertigung und Qualitätssicherung der Bauteile zu vermeiden. Somit ist das Ziel einer Bauteilauslegung in zweifacher Hinsicht vorgegeben: Zum einen gilt es, ein vorzeitiges Bauteilversagen durch Schwingbruch oder gefährlichen Schwinganriss mit der gebotenen Sicherheit auszuschließen, zum anderen soll diese vorrangige Forderung ohne Überbemessen der Querschnitte und ohne unnötigen Fertigungsaufwand auf wirtschaftliche Weise erfüllt werden.

Nach [Gaßner2] handelt es sich dabei um die Aufgabe, „unter Anwendung neuzeitlicher Methoden der rechnerischen und experimentellen Spannungs- und Dehnungsanalyse und der Techniken des

Betriebsfestigkeits-Versuchs, ausgehend von einer bekannten oder als repräsentativ angenommenen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, die betrachtete Konstruktion durch eine fallbezogene Kombination von Werkstoff, Formgebung und Fertigung so zu optimieren, dass bei kleinstem Raum-, Werkstoff- und Herstellungsaufwand ein Höchstmaß an Ausfallsicherheit gegen Schwinganriss oder Schwingbruch erreicht wird."

3.3 Ermittlung der „nominellen" Lebensdauer

Die rechnerische Lebensdauerermittlung basiert immer auf der Ermittlung beobachteter Ausfälle. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird dabei versucht, mit Hilfe einer möglichst kleinen Anzahl von Stichproben eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Gesamtmenge machen zu können. Derart ermittelte Lebensdauerwerte streuen in der Regel jedoch sehr stark. Die Zuverlässigkeit der Bauteile kann deshalb nur mit Mitteln der Statistik ausgedrückt werden.

Angesichts der großen Streuung der Lebensdauer (siehe folgende Beispiele) ist es verständlich, dass man über die voraussichtliche Ermüdungsdauer eines einzelnen Bauteils keine Aussage machen kann. Derartige Aussagen sind nur für eine größere Gruppe gleicher Bauteile, die in gleicher Weise beansprucht sind, d. h. für ein Kollektiv, möglich. Eine Aussage über das Ermüdungsverhalten von Bauteilen hat demnach nur statistischen Charakter. Die Auswertung der Versuche muss daher nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung erfolgen. Die mathematische Beschreibung der experimentellen Ergebnisse erfolgt zweckmäßigerweise durch den Ansatz nach Weibull.

Nach [DIN622] und [DINISO281] wird die Lebensdauer eines Wälzlagers folgendermaßen definiert: Die „nominelle Lebensdauer" einer genügend großen Menge offensichtlich gleicher Lager wird ausgedrückt durch die Anzahl der Umdrehungen oder der Stunden bei unveränderter Drehzahl, die 90% dieser Lagermenge erreichen oder überschreiten, bevor die ersten Anzeichen einer Werkstoffermüdung auftreten.

Daraus folgt, dass 90% der Bauteile beim Erreichen der nominellen Lebensdauer noch nicht geschädigt sind. Bei dem Beispiel aus Bild 3.6 beträgt die nominelle Lebensdauer lediglich $15 \cdot 10^6$ Umdrehungen. Die Bauteillebensdauer oberhalb der 10%-Linie wird nicht berücksichtigt! Die Beispiele sollen verdeutlichen, wie groß die Streuung der Bauteillebensdauer selbst unter Laborbedingungen ist.

3.3.1 Untersuchungen an Laborproben

Um grundlegende Gesetzmäßigkeiten erkennen zu können, muss man zu Laborproben übergehen, die vereinfacht simulierten Betriebsbedingungen ausgesetzt werden. Hieraus resultiert eine Reihe von Vorteilen, wie einfache geometrische Form, genaue Herstellung, definierte Oberflächengüte, eindeutige Einspannung, eindeutige Belastung sowie maximale Konstanz der Prüfbedingungen. Obschon diese Maßnahmen die Ursachen der Streuung auf ein Mindestmaß reduzieren, werden an Laborproben dennoch erhebliche Streuungen beobachtet.

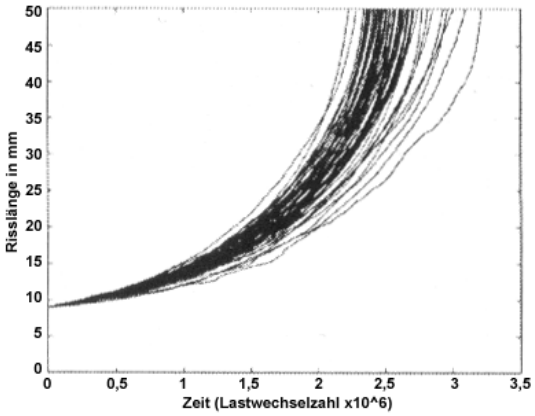


Bild 3.5: Versuchsreihe 68 identischer Proben [Virkler]

Bei der Versuchsreihe nach [Virkler] wurden aus einem Metallblock 68 identische Proben entnommen. Jeder Probe wurde die gleiche Anfangsrisslänge eingeprägt. Anschließend wurden Ermüdungsversuche mit konstanter Amplitude gefahren. Bild 3.5 zeigt die dabei beobachtete Streuung der Risslängen-Zeit-Verläufe.

3.3.2 Untersuchungen auf dem Prüfstand

Reichen die Ergebnisse von Untersuchungen an Laborproben nicht aus, um eine sichere Auslegung zu gewährleisten, so ist man im Allgemeinen darauf angewiesen, Prüfstandsuntersuchungen durchzuführen. Hierbei werden einzelne Bauteile aus der Serienproduktion einer eindeutigen Belastung, die nach Möglichkeit der Betriebsbeanspruchung entspricht, ausgesetzt.

Ein typisches Beispiel für die Durchführung von Prüfstandsuntersuchungen ist die Wälzlagerprüfung. Man geht dabei so vor, dass eine hinreichend große Anzahl gleicher Lager unter konstanten und gleichen Prüfbedingungen untersucht werden. Dabei wird die Streuung der Laufzeiten bis zum Auftreten der ersten Ermüdungserscheinungen registriert.

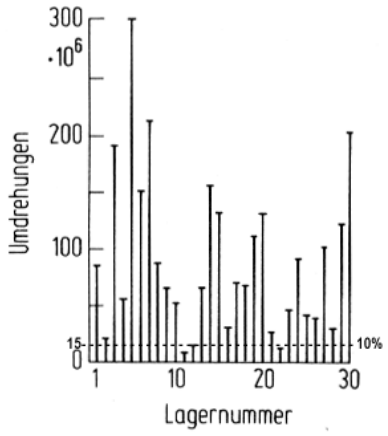


Bild 3.6: Streuung der Ermüdungslaufzeit von 30 Rillenkugellagern [Eschmann]

Bild 3.6 zeigt eine Messreihe von 30 Rillenkugellagern zur Bestimmung der nominellen Lebensdauer. Bei dieser Charge wurden bis zu 30- bis 40-fache Laufzeitunterschiede innerhalb der Versuchsserie festgestellt werden.

3.3.3 Betriebsuntersuchungen

Im praktischen Anwendungsfall, d.h. unter Betriebsbedingungen, liegen weder „reine“ Belastungsarten wie im Laborversuch noch eindeutig bestimmbare Beanspruchungsverläufe wie bei den Prüfstandsuntersuchungen vor. Hier treten vielmehr oft wechselnde und häufig zufällige Kombinationen von Einwirkungsfaktoren auf. Da die Gesetzmäßigkeiten der einzelnen Faktoren durch das Zusammenwirken mehrerer Einflussgrößen gestört werden, ist der Ablauf der Zerstörung bei Betriebsbeanspruchung wesentlich komplizierter.

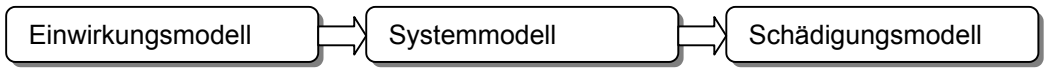
Daraus ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit, für komplexe technische Systeme, deren Versagen eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt oder verhältnismäßig hohe Folgekosten verursacht, „Prototyp“-Untersuchungen unter realen Betriebsbedingungen durchzuführen.

3.4 Rechnerischer Nachweis der Betriebsfestigkeit

Der rechnerische Nachweis der Betriebsfestigkeit dient in erster Linie der Bauteilbemessung für eine zeitlich begrenzte Nutzungsdauer. Er kann aber auch für eine rechnerische Nutzungsdauerbestimmung verwendet werden. Beide Fälle setzen verlässliche Informationen über mögliche Belastungs-Zeit-Funktionen des zu konstruierenden Bauteils und gesicherte Erkenntnisse über dessen Ermüdungsverhalten voraus, um im Vergleich zwischen Belastung und Belastbarkeit das Bauteil so zu gestalten und zu dimensionieren, dass es während der konzipierten Einsatzzeit zuverlässig seine Funktion erfüllt. Den ständig wachsenden Anforderungen, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Konstruktion unter Beachtung starker ökonomischer Zwänge und des zunehmenden Konkurrenzdruckes zu garantieren (Produkthaftung), kann der Ingenieur nur gerecht werden, wenn Verfahren zur treffsicheren Berechnung der Ermüdungsfestigkeit vorhanden sind (vgl. [Schott]).

Mit Hilfe des Betriebsfestigkeitsnachweises kann man Bauteile dauerfest dimensionieren. Hiergegen sprechen jedoch oft wirtschaftliche Gründe: warum z.B. sollten bestimmte Bauteile eine längere Nutzungsdauer haben als die Maschine selbst? Werden die Bauteile jedoch nicht dauerfest, sondern zeitfest dimensioniert, dann folgt die tatsächliche Nutzungsdauer des Bauteils statistischen Gesetzen (vgl. [Warnecke]).

Der Betriebsfestigkeitsnachweis setzt sich aus drei Teilmodellen zusammen:



Alle drei Modelle sind mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten behaftet. Ihre Zuverlässigkeit und Aussagekräftigkeit in Bezug auf die Bauteilnutzungsdauer muss deshalb kritisch betrachtet werden. Hierauf wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

3.4.1 Einwirkungsmodell

Ursachen der Einwirkungen auf eine WEA sind zum einen Eigengewichtslasten und zum anderen aerodynamische Belastung infolge der Windkräfte. Die periodisch auftretende Belastung aus Eigengewichtlast kann sehr genau vorherbestimmt werden. Windlasten treten jedoch stochastisch auf und können deshalb nur mit Mitteln der Statistik beschrieben werden. Hierzu müssen Zeitschriebe der Einwirkung entweder gemessen oder konstruiert werden und anschließend auf die Nutzungsdauer hochgerechnet werden. Dadurch können kleine Änderungen der Eingabeparameter eine große Auswirkung auf die gesamte Nutzungsdauerberechung haben (vgl. [Lange]).

3.4.2 Systemmodell

Die Ermittlung der Beanspruchung der kritischen Nachweisorte der Bauteile wird bei WEA normalerweise analytisch mit Hilfe eines dynamischen, aeroelastischen Systemübertragungsmodells ermittelt. Üblicherweise werden komplexere Strukturen mit der Methode der Finiten Elemente modelliert. Dieser wie auch anderen Modellvorstellungen liegen idealisierte Theorien und empirische Materialkenngrößen zugrunde.

3.4.3 Schädigungsmodell

Die folgende Auflistung zeigt die verschiedenen Schädigungsmodelle. Eine ausführliche Darstellung und kritische Bewertung dieser Konzepte findet man in [Haibach].

Grundsätzlich existieren drei verschiedene Konzepte zur Ermittlung der Schädigung:

- Die rein experimentelle Ermittlung
- Das Kollektiv-Wöhlerlinien-Konzept
  - Das Nennspannungskonzept
  - Das Strukturspannungskonzept
  - Das Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen (Kerbspannungskonzept)
  - Das örtliche Konzept (Kerbgrundkonzept, Kerbdehnungskonzept)
- Das Rissfortschrittskonzept

3.5 Ermüdungsbasierte Auslegungskonzepte

Erst ab etwa 1955 werden Ermüdungsphänomene in den Entwurfsprozess integriert. Zuvor wurde nur der Tragsicherheitsnachweis gegen statisches Versagen durchgeführt, der Grenzzustand der Ermüdung blieb unberücksichtigt. Im Zuge des Fortschritts beim Flugzeugbau wurden im Laufe der Zeit verschiedene ermüdungsbasierte Auslegungskonzepte entwickelt (nähere Angaben hierzu findet man in [Schütz]):

- Prinzip des sicheren Bestehens (safe life approach oder safe life design)

  Während der gesamten planmäßigen Nutzungsdauer soll ein originär fehlerfreies Tragwerk alle denkbaren Beanspruchungsszenarien ohne Versagen überstehen. Die Schädigungsevolution findet dabei Berücksichtigung.

  D.h. die Konstruktion ist so auszuführen, dass während der vorgegebenen Nutzungsdauer bzw. innerhalb exakt festgelegter Zeiträume kein Bauelement versagt. Die Termine für das Auswechseln der Bauelemente müssen in den Bedienungsanleitungen und –vorschriften festgelegt sein.

- Prinzip des beschränkten Versagens (fail safe approach oder fail safe design)

  Während der Entwurfsnutzungsdauer soll ein Tragwerksversagen, trotz eventuellen lokalen Bauteilversagens, mittels konstruktiver Maßnahmen bzw. Analyse von möglichen Versagensszenarios (leak before wreckage) ausgeschlossen werden.

  D.h. beim Versagen eines Bauelements der Konstruktion muss ihre Funktionstüchtigkeit bis zur nächsten Inspektion gewährleistet sein. Innerhalb zweier benachbarter Inspektionstermine dürfen Risse und sogar Brüche einzelner Bauelemente auftreten. Es muss jedoch sicher sein, dass Teile der Konstruktion die Belastungen des gebrochenen Bauelements übernehmen und die Schäden bei der nächsten Inspektion entdeckt werden.

In den 70er Jahren prägte die US Air Force den Begriff der sogenannten „damage tolerance requirements“:

- Prinzip der Schadenstoleranz (damage tolerance approach)

  Initiale und fortschreitende Schädigung wird planmäßig bis zur Detektion bei Inspektionsmaßnahmen toleriert. Die Restnutzungsdauer wird z.B. durch bruchmechanisch basierte Rissfortschrittsprognosen für die bereits vorgeschädigte Strukturen nachgeschaltet (fitness for purpose).

4 Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer einer WEA

Erfahrungen aus anderen Branchen haben gezeigt, dass es aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, technische Anlagen vorab für eine endliche Nutzungsdauer auszulegen. Die gängige [DIBt]-Richtlinie schreibt vor, die Bemessung einer WEA auf eine Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren auszulegen. Daraus ergeben sich Lastwechsel in der Größenordnung 10^9.

Laut [Nath] ist die hohe Anzahl von Betriebsstunden gekoppelt mit einer sehr ungleichförmigen Belastung, die sich aus Änderungen der Windgeschwindigkeit, der Turbulenz des Windes und der Elastizität der Struktur ergibt. Für die schwingungsfreudigen, am Leichtbau orientierten WEA-Konstruktionen stehen vor allem Ermüdungsprobleme im Vordergrund. Die Bezeichnung „Ermüdungsmaschinen“ ist für WEA durchaus zutreffend. Bei einer so hohen Schwingbelastung ist mit einer deutlich erniedrigten Festigkeit aller Materialien zu rechnen. Aus diesem Grund wird für eine WEA neben dem Tragsicherheitsnachweis ein Betriebsfestigkeitsnachweis verlangt.

Grundlage für die Bemessung gegen Ermüdung aller am Kraftfluss beteiligten Komponenten der WEA ist die lineare Schadensakkumulation nach [Palmgren] und [Miner]. Dabei wird versucht, die Belastungen zu berücksichtigen, die die Anlage während ihrer Betriebszeit erfahren wird. Die Einwirkungen werden in Extrem- und Betriebsfestigkeitslasten unterschieden. Extremlasten sind definiert als Lasten, die eine Auftretenswahrscheinlichkeit von einmal in 50 Jahren haben. Die Betriebsfestigkeitslasten werden entsprechend ihrer Häufigkeit in Lastkollektiven berücksichtigt. [Liersch] befasste sich mit den dynamischen Beanspruchungen aus Änderungen des Betriebszustandes, also Manövern wie Anfahren, Netzaufschaltung oder Windnachführung. Diese Beanspruchungen aus Manövern beeinflussen sehr stark die Form der Lastkollektive und haben damit bestimmenden Einfluss auf die Bemessung.

Der Sinn eines Betriebfestigkeitsnachweises liegt nicht in der punktuellen Bestimmung von Nutzungsdauerwerten, sondern in der Bemessung von Bauteilen. Das Bauteil soll so ausgelegt werden, dass ein sicherer Betrieb während der Nutzungsdauer gewährleistet werden kann. Durch die getroffenen Vereinfachungen und die implizit vorhandenen Unsicherheiten der einzelnen Modelle (Einwirkungs-, System-, Schädigungsmodell), muss bei einer WEA die theoretische Berechnung alle zwei Jahre mittels einer Inspektion am realen Bauteil auf ihren Wahrheitsgehalt hin überprüft werden. Infolge der [GL-Richt]-linie ist das Ziel der Inspektion die „Prüfung der Maschine der Windenergieanlage und der Sicherheitseinrichtungen sowie der Standsicherheit des gesamten Bauwerkes.“

Das Sicherheitskonzept einer WEA für die planmäßige Nutzungsdauer von 20 Jahren besteht somit einerseits aus der analytischen Bemessung, die auf vereinfachten Modellen beruht, und andererseits aus der Wiederkehrenden Prüfung, die am real existierenden Bauwerk durchgeführt wird.

4.1 Bemessung einer WEA

Die Bemessung einer WEA ist in der Regel ausgelegt auf eine Betriebsdauer von 20 Jahren. Zur Berechnung der Ermüdungsbelastung müssen die zu erwartenden Lasten abgeschätzt werden. Zunächst wird mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung das Auftreten mittlerer Windgeschwindigkeiten am Standort der WEA bestimmt. Hier kann zum Beispiel die Weibull-Verteilung verwendet werden. Das für die Operation der WEA relevante Intervall der mittleren Windgeschwindigkeit wird in gleich große Abschnitte unterteilt, in der Praxis wird meist die Breite von 2 m/s verwendet. Das führt zu 12 bis 14 Intervallen, auch Windklassen genannt, denen jeweils eine Auftrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Betrachtet man zusätzlich verschiedene Turbulenzintensitäten, erhöht sich die Zahl dieser Windklassen. Daran anschließend wird für jede Windklasse eine Simulation über mindestens 600 Sekunden Dauer durchgeführt, woraus man Zeitreihen der im betrachteten Bauteil wirkenden Spannungen erhält. Diese Spannungen haben aufgrund der Anregung durch turbulenten Wind einen stochastischen Charakter. Zur Berechnung der Schädigung muss die simulierte Zeitreihe in Einzelschwingspiele, auch Belastungszyklen genannt, zerlegt werden. Das geschieht zum Beispiel durch Anwendung des Rainflow-Algorithmus, siehe Bild 4.1. Hier wird durch die Vorstellung des fließenden Regens, wozu man sich Bild 4.1 um 90° im Uhrzeigersinn gedreht denken muss, die Zeitreihe der Belastung in einzelne Schwingspiele zerlegt.

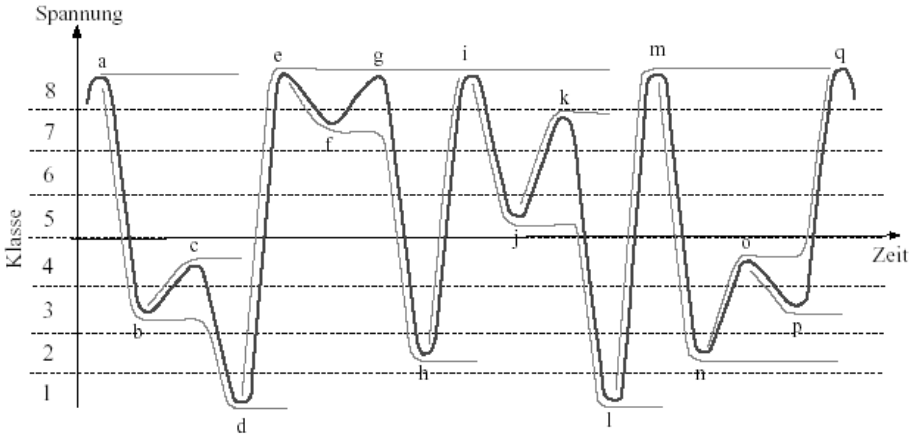


Bild 4.1: Anwendung des Rainflow-Verfahrens

Teilt man die Spannungsamplituden in gleich große Abschnitte ein, Klassen genannt, so liegt je Abschnitt eine Einstufenbeanspruchung vor. Das ermöglicht einen Vergleich mit der Wöhlerlinie als Kennfunktion der zulässigen Beanspruchbarkeit für die Lebensdaueranalyse eines Bauteils. Sie gibt an, wie viele Schwingungen einer bestimmten Spannungsamplitude, auch Schwingspiele genannt, das Bauteil aushält, bevor es zerstört wird. In Bild 4.2 ist solch eine Wöhlerlinie dargestellt.

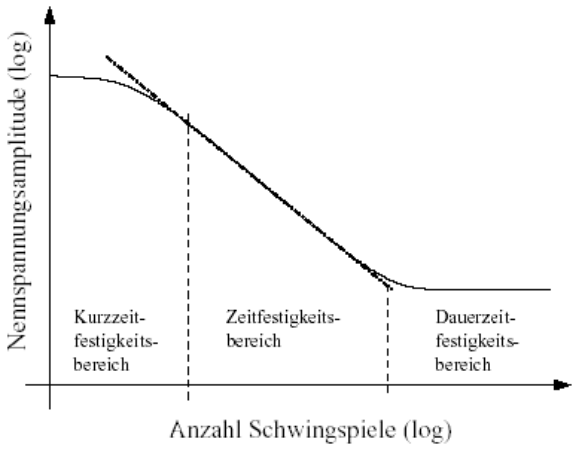


Bild 4.2: Wöhlerlinie, Kennfunktion der Beanspruchbarkeit

Die Wöhlerlinie darf nicht nur das Materialverhalten einer ideal glatten Probe beschreiben, sondern sollte alle relevanten Einflussgrößen des Bauteils wie zum Beispiel Oberflächenrauhigkeit und Einfluss der Bauteildicke beinhalten. Meist werden deshalb synthetische Bauteil-Wöhlerlinien verwendet [Dalhoff].

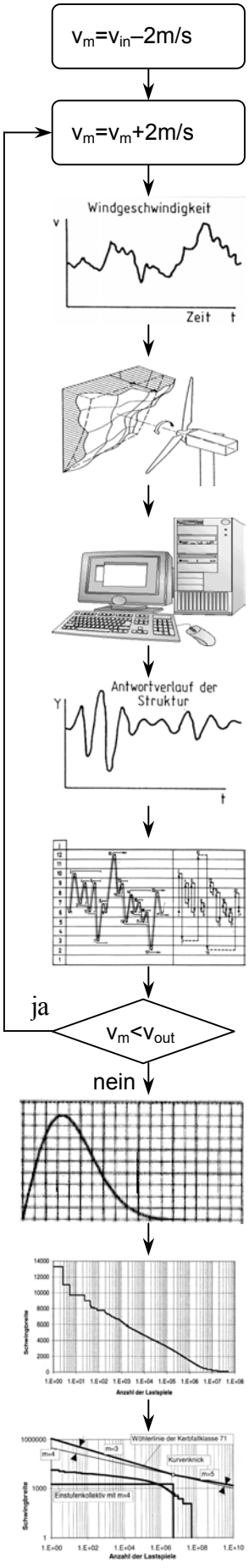
Eine Lebensdauerabschätzung erfordert jedoch noch zusätzlich eine Hypothese für die mit jedem Schwingspiel zunehmende Werkstoffschädigung. Der einfachste Ansatz hierfür ist die lineare Schadensakkumulationshypothese nach [Palmgren] und [Miner]. Danach verursacht jedes Schwingspiel im Werkstoff eine Teilschädigung, die unabhängig von der bereits durch die vorlaufenden Schwingspiele verursachte Schädigung ist. Alle Teilschädigungen werden linear zur Gesamtschädigung aufsummiert. Im Zeitfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie ergibt sich die Schädigung je Lastspiel diesem Ansatz nach zu

$$\Delta S_i = \frac{1}{N_i} \tag{4.1}$$

wobei N_i die dem i-ten Intervall des Belastungskollektivs zugehörige ertragbare Schwingspielzahl aus der Wöhlerlinie ist. Die Schadenssumme für ein Belastungskollektiv mit k Abschnitten und n_i Schwingspielen pro Abschnitt folgt daraus zu

$$S = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \tag{4.2}$$

Versagen wird für S = 1 vorausgesagt. Die Gesamtschädigung ergibt sich durch Überlagerung der Einzelschädigungen der einzelnen Windklassen multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens.



v_m = mittlere Windgeschwindigkeit
v_{in} = Einschaltgeschwindigkeit der WEA

Schrittweise Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit v_m um 2 m/s (insgesamt 12 – 14 Intervalle).

Zunächst wird eine Windzeitreihe für v_m erstellt, in der die Windgeschwindigkeit v über die Zeit t von 0 bis 600s aufgetragen ist.

Aus der Zeitreihe wird für jeden Zeitschritt (Δt = 0,05s) ein turbulentes 3-D-Windfeld simuliert.

Für jeden Zeitschritt Δt = 0,05s (600s/0,05s = 12 000 Einzel-Rechnungen!) werden die Spannungen ermittelt. Man erhält daraus eine

Spannungszeitreihe:
x-Achse: t (0 – 600s)
y-Achse: σ [N/mm^2] (alle 0,05s einen Wert, insgesamt 12000)

Mittels Rainflow-Zählung wird die Spannungszeitreihe ausgewertet. Minima und Maxima werden in einer from-to-Matrize gelistet. Dabei geht die Reihenfolge der Belastung verloren.

Die Berechnung wird solange wiederholt, bis die Ausschaltgeschwindigkeit der WEA v_{out} erreicht ist.

Mit Hilfe der Rayleigh- oder Weibull-Verteilung werden alle Matrizen nach ihrer Häufigkeit gewichtet und auf 20 Jahre hochgerechnet.

Die Werte werden im Beanspruchungskollektiv aufgetragen: auf der x-Achse ist die Anzahl der Schwingspiele N und auf der y-Achse die Spannungsschwingweite $\Delta\sigma$. Dabei gehen die Mittelwerte des Schwingspiels verloren.

Die Schadensrechnung erfolgt anhand der linearen Schadensakkumulation nach der Miner-Regel mit Hilfe materialabhängigen Wöhlerlinien.

Bild 4.3: Vorgehensweise zur Bemessung einer WEA nach dem Prinzip der linearen Schadensakkumulation

4.1.1 Unsicherheiten bei der Berechnung

Zahlreiche experimentelle Untersuchungen (vgl. [Haibach]), die die Aussagefähigkeit der Miner-Hypothese auf breitester Basis überprüften, zeigen, dass die experimentell ermittelten Ergebnisse oft nicht mit den nach dieser Hypothese errechneten Werten übereinstimmen. Es wurden Abweichungen sowohl nach der sicheren als auch nach der unsicheren Seite hin festgestellt. Ursachen für die Unsicherheiten sind vor allem:

- Die Belastungsreihenfolge wird nicht berücksichtigt.
- Die Kriterien Rissentstehung und Rissfortschrittsphase werden global behandelt, obwohl beide Kriterien unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.
- Die Bildung von Druckeigenspannungen durch vereinzelt auftretende hohe Zugspannung bleibt unberücksichtigt.
- Die richtige Einstufung des Details in eine Kerbfallklasse und die Einschätzung ggf. auftretender plastischer Verformungsanteile gestaltet sich als schwierig.

[Haibach] schreibt: „Nach übereinstimmender Einschätzung in der Fachwelt liegen die Unzulänglichkeiten der Miner-Regel in dem Umstand begründet, dass die Reihenfolge und damit eine mögliche Wechselwirkung von großen, mittleren und kleinen Schwingspannungen bei der Schädigungsrechnung unbeachtet bleibt.“

Bei der Simulation von WEA addieren sich zu den Unsicherheiten aus dem Schädigungsmodell die Unsicherheiten aus der Beschreibung der Einwirkungen und des Systemübertragungsverhalten. Die Einwirkungen aus turbulentem Wind können nur statistisch erfasst werden. Zahlreiche Vereinfachungen werden getroffen, z.B. wird bei der Auslegung von Turm und Fundament der Wind immer aus derselben Richtung angesetzt [Nath]. Auch die lokalen klimatischen Verhältnisse spielen eine große Rolle. Bei Anlagen in Küstenbereichen ist die Ermüdungsbeanspruchung wegen der geringeren Turbulenzen deutlich geringer als bei Anlagen im Binnenland oder bei Anlagen, die den Nachlaufströmungen weiterer WEA ausgesetzt sind (vgl. [Hahm]). In der Simulation muss die Aeroelastizität der Struktur richtig erfasst werden. Die Lasten aus dem Anlagenbetrieb werden maßgeblich durch die Steuerung der Anlage beeinflusst, die z.B. die Rotorblätter ausrichtet um eine bessere Windausnutzung zu erreichen. Ebenfalls ist das Verhältnis der Drehzahl zu der Turmeigenfrequenz entscheidend (vgl. [Schaumann]). Bei der Benutzung von Belastungskollektiven gehen wichtige Informationen wie Phasenlagen der Lastkomponenten zueinander, Mittelwerte, Reihenfolgeeffekte verloren (vgl. [Dalhoff]). Zusätzlich müssen die Reglungs- und Betriebsführungsparameter realistisch mit einbezogen werden. Durch die Vielzahl der variierbaren Eingabeparameter sind die Ergebnisse letztendlich mit hoher Unschärfe verbunden und schwer nachprüfbar.

Nach [Peil] kann durch die Verknüpfung der Modelle der dabei entstehende Fehler bis zum Faktor 10 (!) betragen. Das Ergebnis muss somit in Bezug auf die Aussagegenauigkeit stets kritisch bewertet werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Berechnung immer durch die Wiederkehrende Prüfung am realen Bauwerk auf seine Richtigkeit hin überprüft werden muss. Sie ist somit wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzeptes.

4.2 Wiederkehrende Prüfung

Die Wiederkehrende Prüfung dient der Erkennung von Schäden und der Vermeidung von Folgeschäden. Nach [GL-Richt]-linie gilt: „Ziel der Wiederkehrenden Prüfung ist die Prüfung der Maschine der Windenergieanlage und der Sicherheitseinrichtungen sowie der Standsicherheit des gesamten Bauwerks." Das Intervall für die periodische Überprüfung beträgt für die WEA während der 20 jährigen Betriebszeit in der Regel zwei Jahre. Dabei ist bei der Durchführung der Wiederkehrenden Prüfung die Gesamtanlage einschließlich aller Komponenten eingehend zu besichtigen und auf Mängel zu untersuchen. In Tabelle 4.1 wird der Umfang der Wiederkehrenden Prüfung aufgelistet. Dazu gehören u. a. eine Sichtprüfung aller Komponenten aus unmittelbarer Nähe, die Überprüfung der Standsicherheit und die Funktion der Sicherheitssysteme der Anlage.

Tabelle 4.1: Prüfumfang der Wiederkehrenden Prüfung [GL-Richt]

Baugruppe	**Prüfung auf, bzw. mögliche Mängel**
Rotorblatt	Beschädigung der Oberfläche, Risse, Strukturunstetigkeiten des Blattkörpers. (Inspektion von einer Hub- oder Steigeinrichtung aus: visuelle Begutachtung und Untersuchung der Struktur mit geeigneten Verfahren (z. B. Klopfen, Ultraschall)) Vorspannung der Schraubenverbindungen. Beschädigung der Blitzschutzeinrichtungen
Triebstrang	Dichtigkeit, ungewöhnliche Geräusche, Zustand des Korrosionsschutzes, Schmierzustand, Vorspannung der Schraubenverbindungen. Zustand des Getriebes (ggf. Ölprobe)
Maschinenhaus und kraft- und momentübertragende Komponenten	Korrosion, Risse, ungewöhnliche Geräusche, Schmierzustand, Vorspannung der Schraubenverbindungen
Hydrauliksystem, Pneumatiksystem	Beschädigung, Dichtigkeit, Korrosion, Funktion
Turm und Gründung	Korrosion, Risse, Vorspannung der Schraubenverbindungen, Überdeckung Fundament
Sicherheitseinrichtungen, Meßaufnehmer und Bremssysteme	Funktionskontrollen, Einhalten der Grenzwerte, Beschädigung, Verschleiß
Anlagensteuerung und E-Technik inkl. Transformatorstation und Schaltanlage	Anschlüsse, Befestigung, Funktion, Korrosion, Verschmutzung
Eingesehene Unterlagen	Vollständigkeit, Einhaltung der Auflagen, Ausführung, Prüfungsunterlagen, regelmäßige Durchführung der Wartung, ggf. Ausführung von Änderungen/Reparaturen gemäß Genehmigung.

Das Prüfergebnis der Wiederkehrenden Prüfung wird in einem Bericht dokumentiert. Wurden Mängel oder Schäden festgestellt, müssen zur Behebung entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

5 Lösungsansätze anderer Branchen

Bisher wurden die Grundlagen zur Ermüdungsproblematik vermittelt. Anschließend wurde gezeigt, wie eine WEA für die Nutzungsdauer von 20 Jahren bemessen wird. Soll die Anlage weiterhin betrieben werden, müssen Konzepte entwickelt werden, die für die Phase der Restnutzung ausgelegt sind und die geänderten Rahmenbedingungen mit erfassen.

In diesem Kapitel werden Herangehensweisen verschiedener Technikbereiche gezeigt, in denen Betrachtungen zur Ermüdungsfestigkeit von Bedeutung sind. Eventuell können die Methoden den Anforderungen der Windenergiebranche angepasst und übernommen werden.

Allen Ansätzen ist gemein, dass die erstellte Prognose immer durch Inspektion am Bauteil geprüft und bestätigt werden muss.

5.1 Fehlertoleranz-Konzepte in der Luftfahrt

Nach [Tober] ist die Entwicklung im Flugzeugbau durch das Streben nach höchster Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit gekennzeichnet. Die gegenwärtige Generation von zivilen Passagierflugzeugen wird ausgelegt für eine Lebensdauer von mindestens 20 - 25 Jahren und bis zu 90.000 Flügen. Die Integrität des Flugzeugs hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab, siehe Bild 5.1. Es ist das Ziel moderner Auslegungsphilosophie, diese Gegensätze in höchster Vollendung am Flugzeug zu vereinen, wobei die Sicherheit die höchste Priorität hat.

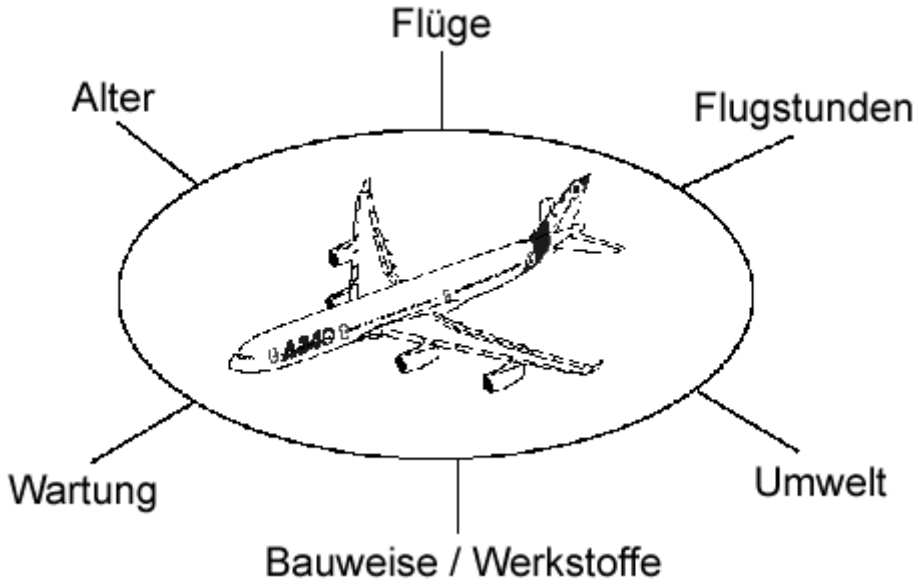


Bild 5.1: Einflussfaktoren auf die Integrität der Struktur

Derzeit entspricht das "damage tolerance concept" diesen Ansprüchen am besten. Von einer "damage tolerant"-Struktur wird gefordert, dass sie fehlerbehaftet die zu erwartenden Belastungen so lange

erträgt, bis vorab definierte Fehler durch eine geplante Inspektion oder einen nicht sicherheitsgefährlichen Funktionsausfall entdeckt und repariert werden können, siehe Bild 5.2. Alle Fehler, die über dieser Toleranzgrenze liegen, müssen sicher und zerstörungsfrei festgestellt werden. Je nach Bauteil erfolgt dies durch eine zerstörungsfreie Prüfung oder wie z.B. bei Triebwerken durch Monitoring. Dabei werden in der Regel nur die Daten während der Flugphase ausgewertet, weil dann die Bauteilbelastung relativ konstant ist. Bei Start und Landung sind die Belastungsschwankungen zu unstetig, als dass konkrete Aussagen über den Bauteilzustand gemacht werden können.

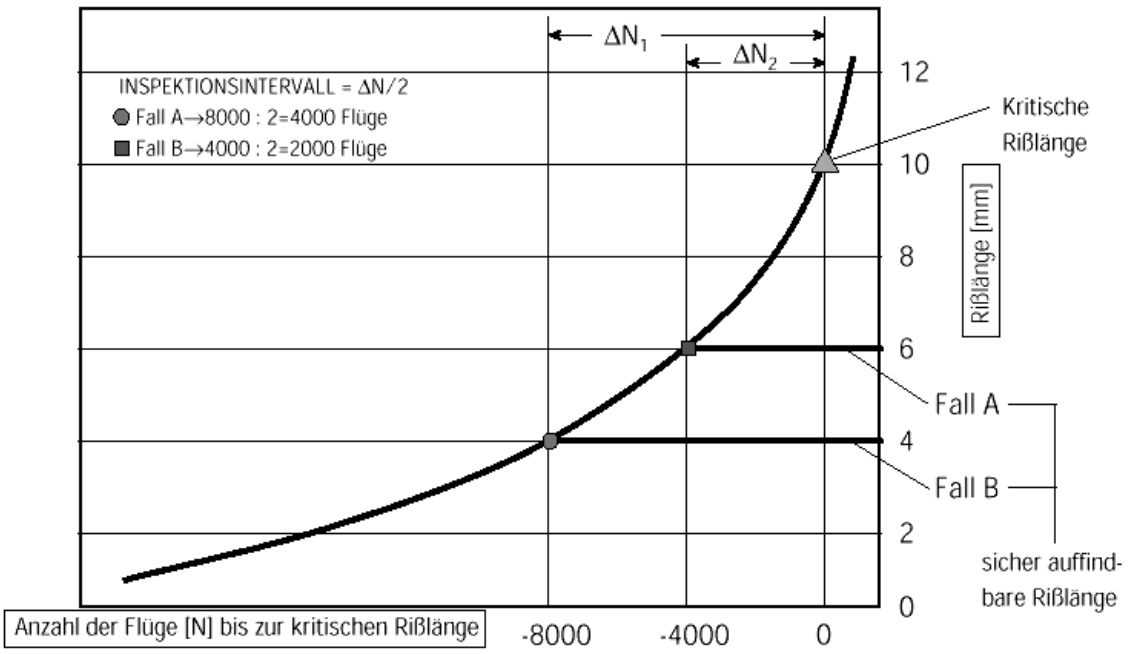


Bild 5.2:Einfluss der sicher auffindbaren Risslänge auf die Inspektionsintervalle

Das Sicherheitskonzept in der Luftfahrt basiert auf den untereinander eng zusammenhängenden Bereichen der Flugzeugauslegung, Wartungsphilosophie und zerstörungsfreier Prüftechnik.

Konstruktionsprinzipien und Nachweismethoden

Konstruktionsprinzip "safe life"

„safe life“ bedeutet, dass die Struktur eine sichere, limitierte Lebensdauer hat, die analytisch und experimentell mit einem relativ hohen Sicherheitsfaktor nachgewiesen wurde. Eine Struktur, konstruiert in "safe life", hat nur einen Lastpfad und es kann und darf sein, dass die detektierbare Risslänge schon im Bereich der kritischen Risslänge liegt. Für einen solchen Fall ist es nicht möglich, ein Inspektionsintervall zur Überwachung der Strukturintegrität zu definieren. Folglich kann der Bruch eines Strukturelementes zum kompletten Versagen einer "safe life" Struktur führen, verbunden mit den entsprechenden Konsequenzen für das Flugzeug. Die Betriebssicherheit einer solchen Bauweise wird

erreicht durch den Sicherheitsfaktor (Überdimensionierung). Bis 1960 wurden Flugzeuge nach diesem Prinzip ausgelegt, heute hat es allerdings an Bedeutung verloren und es darf nur noch das Fahrwerk nach diesem Prinzip konstruiert werden.

Konstruktionsprinzip "damage tolerant"

„damage-tolerance“ ist die Fähigkeit einer fehlerbehafteten Struktur, die zu erwartenden Belastungen zu ertragen, bis die Fehler durch eine geplante Inspektion oder einen nicht sicherheitsgefährlichen Funktionsausfall entdeckt und repariert werden kann.

Bei diesem Prinzip geht man von der realistischen Annahme aus, dass jede Struktur fehlerbehaftet ist und Fehler bewusst toleriert werden, solange sie eine festgelegte Größe nicht überschreiten. Die tolerierbare Fehlergröße ist von den verwendeten Werkstoffen, den Bauweisen und den Belastungen abhängig. Daraus ergeben sich folgende Hauptforderungen an die Schadenstoleranzbewertung:

- Abschätzen der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Schadens
- Identifikation von möglichen Schadensorten und deren Größe
- Schadenstoleranzanalyse und Versuche
- Festlegen des Inspektionsbeginns und der folgenden Inspektionsintervalle

Bei der schadenstoleranten Konstruktion gibt es zwei Kategorien:

- *Einfacher Lastpfad:* Zum Betriebsfestigkeitsnachweis wird eine Schwingfestigkeitsrechnung durchgeführt und über einen Sicherheitsfaktor der 1. Inspektionstermin festgelegt. Die folgenden Inspektionsintervalle und somit Nutzungsphasen basieren auf einer Risswachstumsanalyse. Die Intervalle sind begrenzt durch die Risswachstumsperiode zwischen detektierbarer und kritischer Risslänge, dividiert durch einen Sicherheitsfaktor.

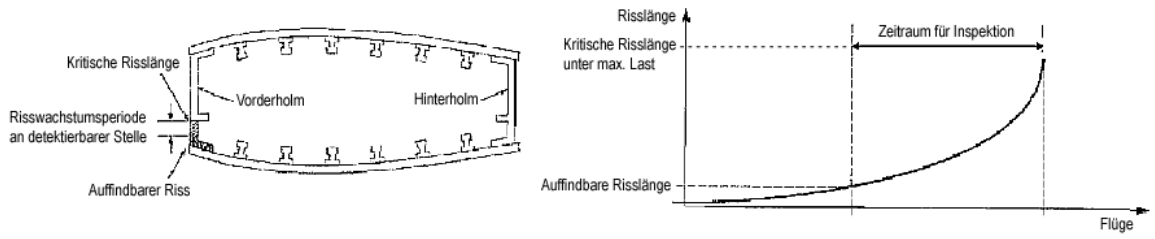


Bild 5.3: Risswachstumsverhalten einer schadenstoleranten Konstruktion mit einem Lastpfaden an einem Vorderholm

- *Mehrfacher Lastpfad:* Konstruktionen mit mehrfachen Lastpfaden werden nochmals in drei Untergruppen unterteilt:
  - mehrfacher Lastpfad - nur von außen inspizierbar

- mehrfacher Lastpfad - nur ein komplett gerissener Lastpfad ist detektierbar
- mehrfacher Lastpfad - auch angerissene Lastpfade sind detektierbar.

Ein Beispiel für den Fall, angerissene Lastpfade sind detektierbar, wird in Bild 5.4 gezeigt. Zum Nachweis der Betriebssicherheit wird auch hier eine Schwingfestigkeitsrechnung durchgeführt. Der Lastpfad mit der geringsten Schwingfestigkeit wird für die Festlegung der 1. Inspektion verwendet. Folgende Inspektionsintervalle basieren auf dem Risswachstumsverhalten der beiden beteiligten Lastpfade, wobei für beide Pfade ein Anfangsriss von 1,27 mm angenommen wird. Das Intervall ist festgelegt durch die Risswachstumsperiode zwischen der detektierbaren Risslänge im ersten Lastpfad und der kritischen Risslänge in dem zweiten Lastpfad, dividiert durch den Sicherheitsfaktor. Die Ausfallsicherheit der Struktur wird durch mehrere Lastpfade erreicht, so dass bei Ausfall eines oder mehrerer Lastpfade die verbleibenden Lastpfade die zu erwartenden Belastungen übernehmen können („fail safe“-Prinzip).

Die Fehler werden durch einfache generelle, visuelle Inspektionen mehr zufällig entdeckt. Die "fail safe" Bauweise ist mit adäquater Inspektion die Basis für die so genannte "damage tolerant" Bauweise.

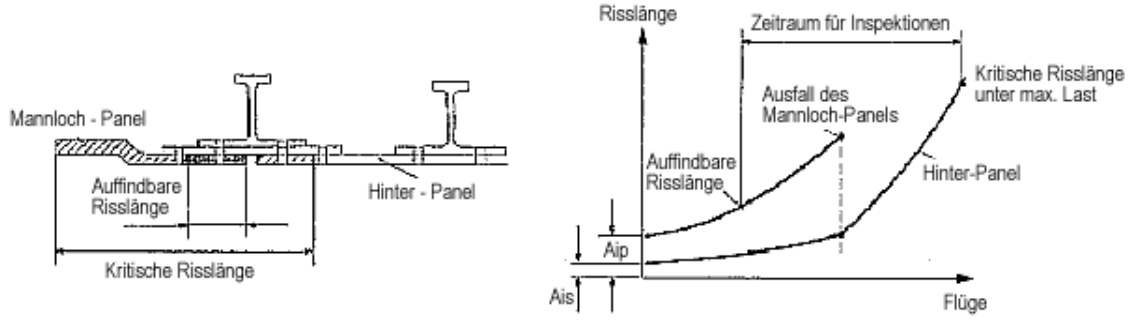


Bild 5.4: Risswachstumsverhalten einer schadenstoleranten Konstruktion mit zwei Lastpfaden an einem Panel

Die Zulassungsvorschriften für Flugzeuge werden laufend weiter entwickelt. Eine neu erarbeitete Vorschrift behandelt die Thematik der "widespread fatigue damage (WFD)", dem Auftreten von vielen kleinen Anrissen, z.B. in einer Längsnahtnietverbindung. Sie fordert eine Bewertung der im Bauteil auftretenden Spannungen aus Entwurf und Fertigung. Es muss nachgewiesen werden, dass ein katastrophales Versagen durch Ermüdung, Korrosion oder einen zufälligen Unfallschaden während des Fluges ausgeschlossen werden kann. Dies erfolgt mittels Risswachstumsanalyse und/oder mittels Ermüdungsstrukturversuchen (full-scale-test).

Die Fehlertoleranzbewertung ist auch die Grundlage für die Erstellung eines Struktur-Inspektions-Programms.

Entwicklung eines Strukturinspektions-Programms

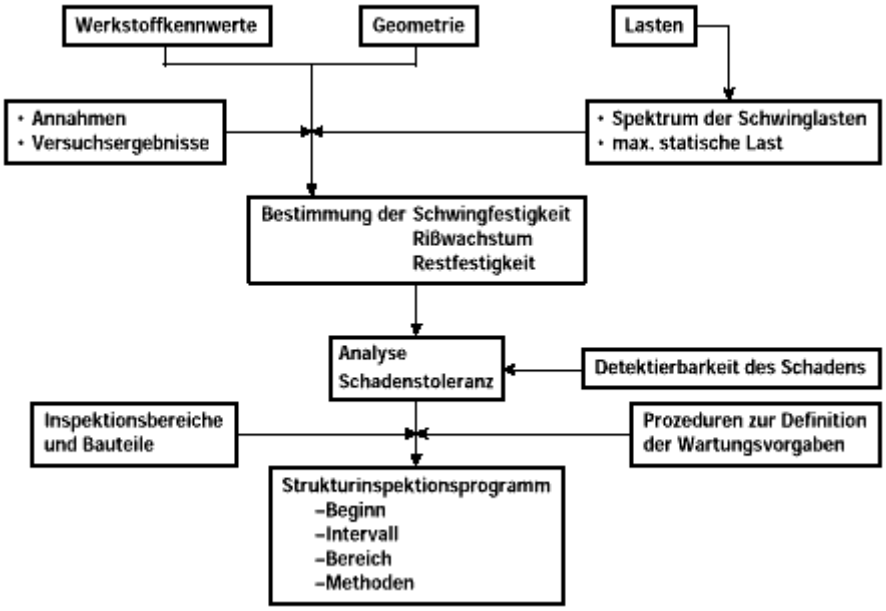


Bild 5.5: Faktoren für die Entwicklung eines Strukturinspektionsprogramms

In Bild 5.5 werden die Einflussfaktoren für die Entwicklung eines Strukturinspektions-Programms gezeigt. Für jedes sicherheitsrelevante Bauteil (Strukturelement) ist diese Analyse durchzuführen. Folgende Daten sind für jedes zu inspizierende Bauteil festzulegen und in Handbüchern dem Betreiber zur Verfügung zu stellen:

- Inspektionsbeginn: Flugzeugalter oder Anzahl der Flüge bis zur ersten Inspektion
- Inspektionsintervall: Zeit oder Anzahl der Flüge zwischen den Inspektionen
- Inspektionsbereich: Detaillierte Beschreibung des Inspektionsbereiches und der Fehlerart und -lage
- Inspektionsmethode: Detaillierte Angaben in einer Inspektionsprozedur (Gerät, Justierung, Bewertungskriterien)

Zahlen zur Lebensdauer von Flugzeugen

Pro Flugstunde sind anschließend bei einem Jumbo-Jet ca. 4 Stunden Wartung nötig. Alle sechs Jahre erfolgt eine komplette Revision, bei der das komplette Flugzeug bis auf sein Skelett demontiert wird. Jedes sicherheitsrelevante Bauteil wird geprüft, beurteilt und zustandsabhängig ertüchtigt. Das Ergebnis wird dokumentiert.

Nach [Grothus] gehen die führenden Fluggesellschaften bei der Instandhaltung der schadensanfälligen Bauteile nach drei verschiedenen Verfahren vor:

- Ca. 64 % der Bauteile werden mit zustandsabhängiger Instandhaltung betreut
- Ca. 32 % der Bauteile lässt man ohne Überwachung ausfallen. Sie werden instand gesetzt, sobald der Schaden bemerkt wird.
- Ca. 4% werden vorbeugend instand gesetzt, d.h. sie werden nach einem festgelegten Intervall ausgetauscht.

Es gibt Flugzeuge, die aufgrund der Instandhaltung seit über 60 Jahren im Dienst sind, wie z.B. das in Canada zur Bekämpfung von Waldbränden eingesetzte Löschflugzeug „Martin Mars“.

5.2 Beurteilung alter, schwingend beanspruchter Stahl-Bauwerke

Für die Beurteilung einer Restnutzung empfiehlt sich nach [Hadrych] ein mehrstufiges Vorgehen. In der ersten Stufe wird die bereits vorhandene Schädigung nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation errechnet. Sollte sich hieraus keine ausreichende Tagfähigkeit mehr ergeben, kann in einer zweiten Stufe die bruchmechanische Sicherheitsanalyse angeschlossen werden.

Ermittlung der vorhandenen Schädigung mittels linearer Schadensakkumulation

Der älteste und am weitesten verbreitete Ansatz zur Ermittlung der vorhandenen Schädigung ist die Hypothese der linearen Schadensakkumulation von [Palmgren] und [Miner]. Die generelle Vorgehensweise ist in Bild 5.6 dargestellt.

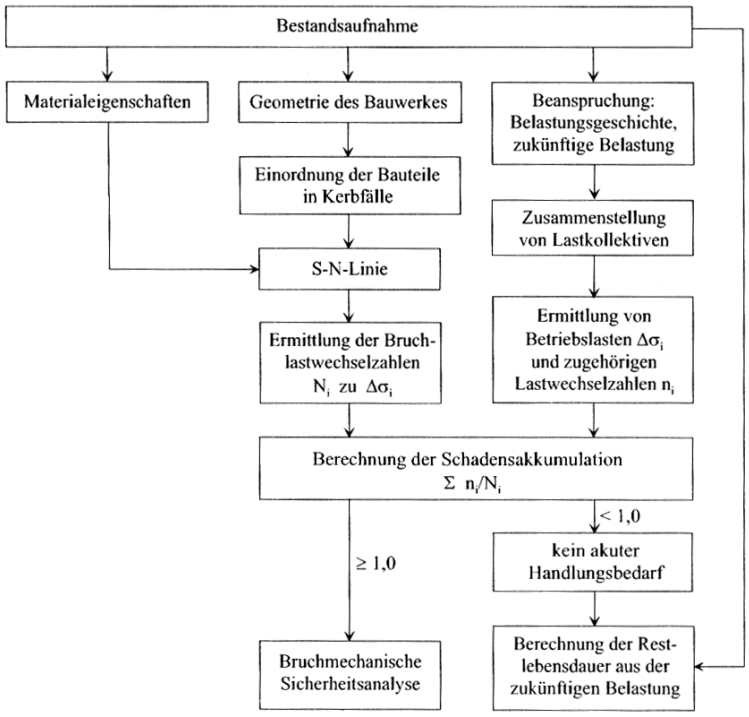


Bild 5.6: Vorgehensweise zur Ermittlung der vorhandenen Schädigung nach dem Prinzip der linearen Schadensakkumulation

Neben der genauen Kenntnis der Bauwerksgeometrie sowie der Materialeigenschaften ist für eine Schädigungsberechnung vor allem die Kenntnis der Belastungsgeschichte des Bauwerkes von großer Bedeutung. Gerade dieser Punkt bereitet jedoch vielfach Schwierigkeiten und kann daher oftmals nur durch Schätzungen und Annahmen abgedeckt werden.

Auf der Beanspruchungsseite lässt sich für die ermüdungsgefährdenden Bauteile die bekannte oder angenommene Belastungsgeschichte mittels Klassierung (z.B. Rainflow) in Beanspruchungskollektive zusammenstellen. Diese enthalten die Schwingbreiten der Spannungen $\Delta\sigma_i$ und die dazugehörigen Lastwechselzahlen n_i.

Aufgrund der vorliegenden Geometrie erfolgt eine Einordnung der Bauteile auf der Widerstandsseite in Kerbfälle, mit deren Hilfe unter Berücksichtigung des Materials und des Spannungsverhältnisses die Zuordnung zu einer S-N-Linie möglich ist. Aus den S-N-Linien werden die zu den einwirkenden Schwingbeanspruchungen $\Delta\sigma_i$ gehörigen Bruchwechselzahlen N_i ermittelt.

Aus den einwirkenden Lastwechselzahlen n_i für verschiedene Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ und den aus der S-N-Linie entnommenen Bruchlastzahlen N_i ergibt sich die Schädigungssumme S nach [Palmgren] und [Miner] zu:

$$S = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{5.1}$$

Ergibt sich die Schädigungssumme S < 1, so liegt theoretisch noch eine ausreichende Resttragfähigkeit vor. Aus den zukünftig zu erwartenden Belastungen kann in einer weiteren Berechnung dann ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt sich der theoretische Wert S = 1 ergibt und damit die Resttragfähigkeit rechnerisch erschöpft ist. Liefert die Schädigungssumme jedoch von vornherein S > 1, so liegt nach der Schädigungshypothese von [Palmgren] und [Miner] rechnerisch keine ausreichende Tragfähigkeit mehr vor.

Ist trotzdem der Erhalt des Bauwerkes erwünscht, empfiehlt sich die Durchführung einer bruchmechanischen Sicherheitsanalyse.

Bruchmechanische Sicherheitsanalyse

Nach einer entsprechenden Bestandsaufnahme des Bauwerkes einschließlich der Erfassung bruchmechanischer Materialkenngrößen und bereits vorhandener Ermüdungsanrisse kann die bruchmechanische Sicherheitsanalyse entsprechend Bild 5.7 durchgeführt werden.

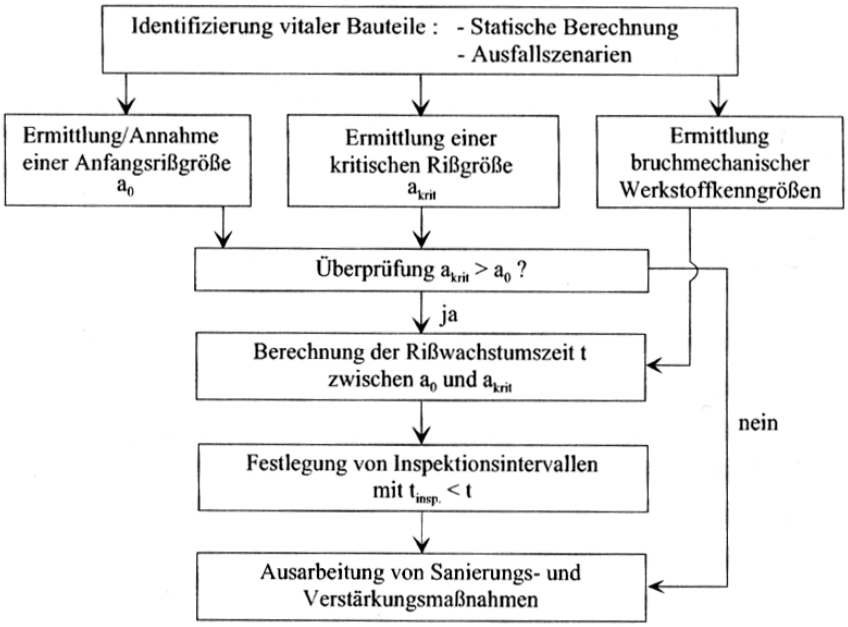


Bild 5.7: Vorgehensweise zur Durchführung bruchmechanischer Sicherheitsanalysen

In einem ersten Schritt müssen hierzu die vitalen Bauteile ermittelt werden. Dies sind Bauteile, deren Ausfall zum Versagen oder zum Teilversagen des gesamten Bauwerks führen.

Für sämtliche vitalen Bauteile ist zu ermitteln, wie lange ein Anfangsriss der Länge a_0 benötigt, um eine kritische Risslänge a_{krit} zu erreichen, bei der es zum Bauteilversagen kommt.

Werden im Rahmen der Bestandsaufnahme bereits Anrisse festgestellt, so ist die Länge dieser Anrisse als Anfangsrisslänge a_0 anzusetzen. Ansonsten sind Anrisse von der Länge anzunehmen, die bei Inspektionen gerade noch übersehen werden können.

Ist das Rissfortschrittsgesetz des Werkstoffes bekannt, so kann anschließend aus der Bauteilbeanspruchung, der Anfangsrisslänge und der kritischen Risslänge sowie der Bauteilgeometrie die Risswachstumszeit t bis zum Erreichen der kritischen Risslänge berechnet werden.

Aus der errechneten Risswachstumszeit t wird die Zeit zwischen zwei Inspektionsintervallen $t_{insp.} < t$ festgelegt. Nach Ablauf dieser Frist ist im Rahmen der Inspektion zu prüfen, ob inzwischen Ermüdungsrisse aufgetreten sind. Liegen solche Risse vor, so ist die bruchmechanische Sicherheitsanalyse mit den entsprechenden Anfangsrisslängen neu durchzuführen und es können Maßnahmen wie z.B. das Aufbohren der Rissspitzen ergriffen werden. Werden keine Risse festgestellt, kann davon ausgegangen werden, dass die Tragfähigkeit des Bauwerkes für die Zeit $t_{insp.}$ erneut gewährleistet ist.

5.3 Restnutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke

In dieser Abhandlung beschreibt [Valtinat] die Vorgehensweise für eine Schädigungsrechnung nach [Palmgren] und [Miner] am Beispiel einer Eisenbahnbrücke in stählerner genieteter Vollwandträgerausführung. Das Bauwerk wurde 1935/1936 erstellt und war bis 1992 in Betrieb.

Um die Brücke wieder nutzbar zu machen, sind vier wichtige Erfordernisse zu erfüllen:

1. Hauptuntersuchung des Bauwerks und Prüfung seines derzeitigen Zustandes durch Inspektion am Bauwerk.
2. Feststellung der Werkstoffqualitäten der einzelnen tragenden Elemente wie Hauptträger, Querträger und Längsträger durch Probenentnahme am Bauwerk und Werkstoffprüfung.
3. Prüfung der Standsicherheit und der Schadensakkumulation durch den Zugbetrieb vom Zeitpunkt der Nutzung an bis zum Stichtag
4. Prüfung der Restnutzungsdauer für die zukünftige Nutzung ab dem Stichtag

Die Prüfung der Schadensakkumulation und Restnutzungsdauer ist als Betriebsfestigkeitsberechnung ein noch ungewohnter Teil der statischen Berechnung. Können die bisherigen und die zukünftigen Lasten abgeschätzt werden, gestattet die Schadensakkumulation, das Datum zu ermitteln, an dem

das Bauwerk eine Gesamtschädigung akkumuliert hat, bei der die geforderten Sicherheitsbeiwerte nicht mehr eingehalten sind.

Die Schädigung errechnet sich nach [Palmgren]-[Miner] aus der Summe der Quotienten der vorhandenen Lastwechselzahl n_i zur ertragbaren Lastwechselzahl N_i auf dem Niveau der vorhandenen Spannungsdoppelamplitude ($S = \sum n_i/N_i$).

Schädigungswerte unter 0,4 bis 0,5 erlauben eine weitere Nutzung, Werte zwischen 0,5 und 1,0 erfordern genauere Nachrechnungen und abgestufte Maßnahmen zur Sicherstellung des Tragwerks. Schädigungswerte über 1,0 bedeuten jedoch nicht, dass das Bauwerk unbedingt zu ersetzen ist. Durch verschiedene Maßnahmen ist es möglich, eine Verlängerung der Restnutzungsdauer zu erreichen. Solche Maßnahmen können z.B. verstärkte Überwachung, Last- oder/und Geschwindigkeitsreduzierungen, Sanierung, Verstärkung geschädigter Teile, Abstützungen und dergleichen sein.

5.4 Beurteilung der Restnutzungsdauer von Schleusenantrieben

Anhand des Beispiels einer Schleuse aus dem Jahr 1928 wird die Vorgehensweise zur Beurteilung der Restnutzungsdauer von Schleusenantrieben verdeutlicht. Die Beurteilung erfolgte auf Basis der linearen Schadensakkumulation und wurde vom Germanischen Lloyd angefertigt.

Eine große Zahl von Stahlwasserbaukonstruktionen und maschinenbaulichen Antrieben sind seit Jahrzehnten im Einsatz und haben ihre planmäßige Nutzungsdauer von ca. 70 – 90 Jahren erreicht bzw. überschritten. Für die stahlbauliche Verschlusskonstruktion und die maschinenbaulichen Antriebe ist aus betriebswirtschaftlichen Gründen die Restnutzungsdauer von großer Bedeutung.

Die Betriebsverfügbarkeit und Lebensdauer wird während der Betriebszeit von vielen Parametern wie z.B. Verschleiß, Beschädigungen, Häufigkeit und Größe von Lastbeanspruchungen und auch korrosiven Umweltbedingungen beeinflusst. Die Größe der dynamischen Lastbeanspruchungen, Art und Zustand der eingesetzten Werkstoffe, Verschleiß etc. sind entscheidende Kriterien für die Beurteilung der Restnutzungsdauer. Bei deren Ermittlung war zu untersuchen, ob die bisherigen Betriebsbedingungen fortgeschrieben werden können, ob mit veränderten Bedingungen zu rechnen ist oder ob in Kürze eine Erneuerung der Bauteile zu erwarten ist.

Die Abschätzung der Restnutzungsdauer erfolgte auf Basis der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner. Dafür mussten die bereits aufgelaufenen Lastwechsel abgeschätzt und mit den noch zu erwartenden Lastwechseln aufsummiert werden. Mittels Wöhlerlinie wurden dann festgestellt, ob noch entsprechende Sicherheiten vorlägen. Problem war hierbei, dass für die Berechnung und Beurteilung notwendige Daten und Unterlagen wie z.B. Zeichnungen mit den entsprechenden Verzahnungsdaten, Auslegungsberechnungen, Werkstoffangaben, Betriebsdaten etc. bei dieser betagten Anlage nicht ausreichend vorlagen und diese in aufwendigen Einzeluntersuchungen ermittelt werden mussten:

- Messung der Leistungsaufnahme und der Drehmomente (mittels Dehn-Mess-Streifen), z.B. an den Schütz- und Klapptorantrieben unter Betriebsbedingungen

- Beurteilung des Allgemeinzustandes der Verzahnungen und Übertragungsbauteile inklusive Schmierzustand vor Ort im Betrieb
- Aufmessen der Verzahnungsgeometrie der Getriebebauteile
- Bestimmung der vorliegenden Werkstoffeigenschaften durch zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen
- Rissprüfungen (Ultraschall-, Magnetprüf- und Farbbindungsverfahren) an Getriebekomponenten und Übertragungsbauteilen
- Beurteilung des Beanspruchungsniveaus der Tor- und Schützantriebe
- Berechnung der vorhandenen Sicherheiten gegen Zahnbruch und Flankenschäden für die bereits aufgelaufenen und noch anzusetzenden Betriebsstunden

Bei den Untersuchungen wurde unter Berücksichtigung der genannten Einflüsse festgestellt, dass hinsichtlich der Zahnfußbeanspruchung Sicherheiten von 1,3 – 1,8 vorlagen. Die vorhandenen Sicherheiten bei Grübchenbildung lagen bei 0,4 – 0,6, und waren nicht ausreichend, was auch durch die vorhandenen Flankenschädigungen belegt wurde. Allerdings waren die festgestellten Flankenschäden nicht so gravierend, wie die Berechnung vermuten ließ. Die Flankenschäden waren noch so moderat, dass man es verantworten konnte, die Anlagen noch eine Zeitlang weiter zu betreiben, wenn der Zustand der Flanken im Zuge regelmäßiger Zustandsuntersuchungen weiter dokumentiert wird. In Abhängigkeit von den dann festgestellten Schadensfortschritten können dann weitere Aussagen über die Restnutzungsdauer getroffen werden.

5.5 Ermittlung der Lebensdauer ermüdungsbeanspruchter Stahlbrücken via von Monitoring

Der Sonderforschungsbereich 477 ([SFB477]) beschäftigt sich mit dem Thema: „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung.“ Im Teilprojekt B3 befasst sich [Peil] mit der „Lebensdauervorhersage von ermüdungsbeanspruchten Bauwerken durch Monitoring und begleitende Versuche.“

Eine hinreichend genaue Vorhersage der Lebensdauer von nicht vorwiegend ruhend beanspruchten Stahlkonstruktionen ist nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die Gründe liegen in den unsicheren drei Modellen, die klassisch für die Vorhersage verwendet werden:

- Das Einwirkungsmodell beschreibt im Regelfall die tatsächlichen Einwirkungen nur sehr grob oder weit auf sicherer Seite. Beides ist für eine Ermüdungsabschätzung ungünstig.
- Das Systemmodell ist sicherlich das genaueste der drei notwendigen Modelle. Auch hier gibt es Probleme mit der Erfassung von Einspanngraden, Randbedingungen, Detailmodellierung etc.
- Das Schädigungsmodell ist das ungenaueste. Einordnung der zu beurteilenden Details in eine Kerbfallklasse, Reihenfolgeeinflüsse der Lasten, einzelne Überlastungen etc. führen zu starken

Abweichungen der Prognose von der Wirklichkeit. Die Abweichungen können den Faktor 10 oder 1/10 erreichen.

Bei der Lebensdauervorhersage via Monitoring und begleitender Prüfung entfallen diese Unsicherheiten.

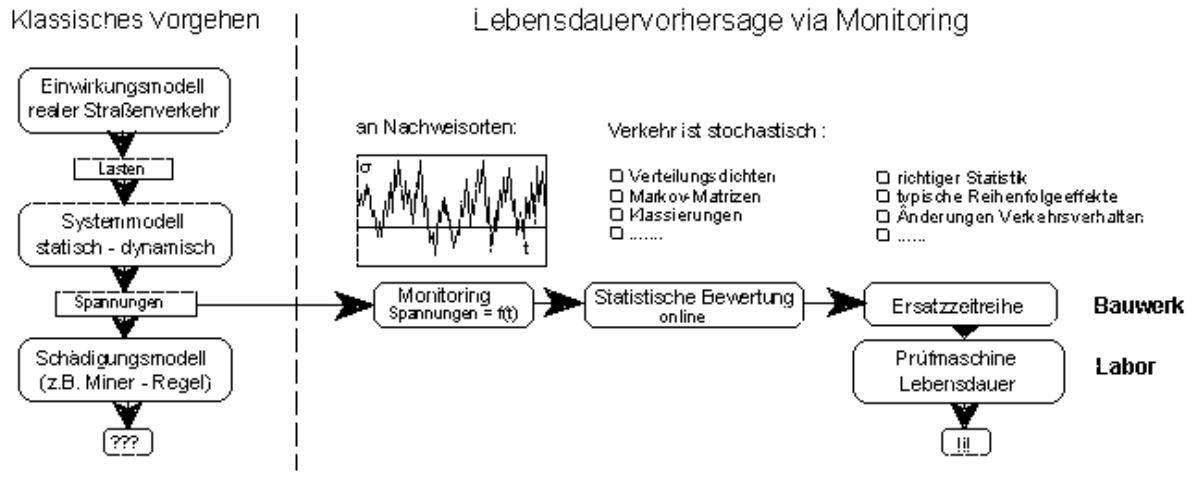


Bild 5.8: Vorgehensweise bei der Lebensdauervorhersage mittels Monitoring [Peil]

Im ersten Schritt werden kontinuierlich oder nichtkontinuierlich die Beanspruchungen an den kritischen Nachweispunkten gemessen (Monitoring). Die Zeitschriebe werden statistisch bewertet. Mit Hilfe der statistischen Kennwerte werden anschließend künstliche, endliche Ersatzzeitschriebe generiert, die das tatsächliche Verkehrsverhalten - z.B. mit Clusterbildung durch LKW-Gruppen - richtig erfassen. Der Ersatzzeitschrieb hat eine endliche Länge. Durch die kontinuierliche (gelegentlich auch diskontinuierliche) Überwachung der kritischen Nachweispunkte sind die örtlichen Beanspruchungen also genau bekannt, die Modellungenauigkeiten der ersten beiden Modelle des klassischen Verfahrens (Einwirkung und Systemübertragungsverhalten) sind entfallen.

Die Zeitschriebe könnten nun wie üblich - z.B. mit Hilfe des Rainflow-Verfahrens - klassiert werden. Das Ergebnis wären Beanspruchungskollektive, die einer klassischen Lebensdaueruntersuchung zugrunde gelegt werden könnten. Es könnten dann z.B. eine Abschätzung der Lebensdauer mit Hilfe einer linearen oder inkrementellen Schadensakkumulationshypothese oder mit Hilfe von Mehrstufen-Ermüdungsversuchen durchgeführt werden. Beide Vorgehensweisen beinhalten aber die relativ großen Unsicherheiten der Lebensdauervorhersage, was der hier angestrebten Aussagegenauigkeit zuwider liefe.

Deshalb wird der zuvor ermittelte synthetische Ersatzzeitschrieb, der alle wesentlichen Ereignisse der Bauwerksbeanspruchung enthält, als Belastungs-Zeitverlauf für parallel durchgeführte Ermüdungsversuche verwendet. Nach Beendigung des synthetischen Beanspruchungsverlaufes wird dieser so lange wiederholt, bis ein Anriss auftritt. Mit Hilfe der neuen, digital geregelten dynamischen

1000 kN Prüfmaschine des Instituts für Stahlbau der TU Braunschweig sind derartige Untersuchungen möglich.

Vor der statistischen Bewertung wird der Messschrieb auf die relevanten Lastwechsel reduziert, d.h. es werden Ruhepausen oder sehr geringe Spannungsschwankungen eliminiert. Aus den so verkürzten Zeitschrieben werden Klassenübergangsmatrizen ermittelt, die als Grundlage für die Bestimmung der synthetischen Ersatzzeitschriebe dienen. Die Ersatzzeitschriebe enthalten auch Cluster-effekte, die z.B. durch Gruppen von LKW entstehen.

Als Probekörper werden die gleichen Details wie im Originalbauwerk verwendet, so dass auch die Genauigkeit der Einschätzung des Kerbdetails - ein häufig schwieriges Problem in der Bemessungspraxis - entfällt. Bei neuen Bauwerken können diese Detailpunkte darüber hinaus vom demselben Schweißer, der auch die Konstruktion schweißt, mit erstellt werden, so dass die "Handschrift" die gleiche ist.

Die Versuche ergaben bei dem vorliegenden Detail eine Verlängerung der Lebensdauer um den Faktor 10, verglichen mit den Ergebnissen einer klassischen Untersuchung unter Zugrundelegung des Beanspruchungskollektivs und einer inkrementellen Schadensakkumulationshypothese.

Dies Ergebnis darf jedoch nicht verallgemeinert werden. Es sind auch Fälle bekannt, in denen die Lebensdauer dramatisch kleiner war, als nach klassischen Verfahren ermittelt.

5.6 Wiederkehrende Hauptuntersuchung bei Kraftfahrzeugen

Kraftfahrzeuge werden heute vom Hersteller auf ca. 10 Jahre Betriebsdauer bzw. ca. 150 000 km ausgelegt, wobei diese Werte nur als Anhaltswerte zu verstehen sind. Bei entsprechender Wartung können die Fahrzeuge aber eine weitaus höhere Betriebsdauer erreichen.

Um während der gesamten Betriebsdauer die Fahrzeugsicherheit zu gewährleisten wurde bereits 1951 in Deutschland eine regelmäßige Hauptuntersuchung für Kraftfahrzeuge zur Pflicht. Bei der Inspektion werden die sicherheitsrelevanten Bauteile an Hand einer Prüfliste am Fahrzeug auf ihre Tauglichkeit überprüft.

Im Laufe der Jahre wurde die Untersuchung mehr und mehr perfektioniert. Dabei flossen Erfahrungen und Erkenntnisse aus Schadensanalysen ein. Ein wichtiger Schritt war 1961 die Einführung der Prüfplakette. Der Benachrichtigungs-Brauch wurde abgeschafft und der Fahrzeughalter war von nun an für die Einhaltung des Prüftermins verantwortlich.

Das Inspektionsintervall wird vom Gesetzgeber vorgegeben. Danach ist der Fahrzeughalter verpflichtet, das KFZ erstmals drei Jahre nach Erstzulassung bei einer Fahrzeughauptuntersuchung vorzuführen. Anschließend wird das Intervall auf zwei Jahren verkürzt.

Die gesamte Lebensdauer von Kraftfahrzeugen ist somit theoretisch unbegrenzt. Maßgeblich entscheidend hierfür ist die Instandhaltung, bestehend aus Wartung, regelmäßiger Inspektion und Instandsetzung, des Fahrzeuges.

5.7 Schwingungsdiagnostische Überwachung von Turbosätzen

Im März 1993 veranstaltete das [Allianz]-Zentrum für Technik und die Carl Schenk AG gemeinsam die Tagung zum Thema: „Methoden, Nutzen und Trends der schwingungsdiagnostischen Überwachung von Turbosätzen in Kraftwerken und Industrieanlagen.“ Die Erkenntnisse finden sich in der folgenden Zusammenfassung.

Für den Betreiber als auch für den Versicherer sind die Verfügbarkeit, die Betriebssicherheit und die Lebensdauer von Turbomaschinen von ausschlaggebender Bedeutung. Deswegen werden in diesem Bereich seit etwa 30 Jahren generell alle größeren Maschinensätze mit Zustandsüberwachungsanlagen ausgerüstet, die über Schwingungsmessungen sich anbahnende Schäden melden und dazu beitragen, größere Folgeschäden zu vermeiden. Sie leisten somit einen entscheidenden Beitrag, teure Komponenten besser zu überwachen, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu reduzieren und die vorausschauende Instandhaltung zu verbessern.

Die Schwingungsüberwachung führt bei Turbomaschinen zu Kostenersparnis, zur Verbesserung der Anlagensicherheit und zur Steigerung der Anlagenverfügbarkeit. Mit globaler Schwingungsüberwachung können Maschinenstörungen zuverlässig erkannt sowie größere Schäden und Folgeschäden verhindert werden. Die Entwicklung führt bei der rechnergestützten schwingungsdiagnostischen Überwachung dazu, dass mit deren Hilfe der Informationsgehalt erfasster Schwingungen immer besser ausgewertet werden kann.

Somit werden Veränderungen im Maschinenzustand frühzeitig erkannt, womit eine automatisierte Fehlerfrüherkennung mit Alarmierung der wichtigsten schaden- bzw. mangelbedingten Schwingungsveränderungen erreicht wird. Zusätzlich können Schadensursachen automatisch eingegrenzt und diagnostiziert, Korrelationen mit dem Betriebsregime der Maschine erstellt und zustandsrelevante Daten ereignisorientiert archiviert werden.

Eine wesentliche Voraussetzung bei der Realisierung schwingungsdiagnostischer Überwachungssysteme ist, dass durch sinnvolle Datenreduktion ohne nennenswerten Informationsverlust die Datenflut überschaubar und beherrschbar bleibt. Wegen der Komplexität bei Turbomaschinen besteht das Hauptproblem in der Diagnose der Messdaten, wenn ein anomaler Schwingungszustand festgestellt wurde. Aufgrund der „intelligenten“ Datenverdichtung und Datenspeicherung kann jederzeit und zudem kurzfristig auf die gesamte Maschinenhistorie zurückgegriffen werden.

6 Sicherheitskonzept für die Restnutzung einer WEA

Die aktuell gültigen Normen gelten für den Tragwerksentwurf der zu errichtenden WEA. Für eine Nachberechnung der gebrauchten und vorgeschädigten WEA sind sie nur eingeschränkt anwendbar. Sie enthalten sichtbar oder verdeckt Prämissen, die für letzteres nicht gelten. Die WEA muss einer Restsicherheitsanalyse unterzogen werden, die den aktuellen Zustand samt Schädigung und potentieller Einwirkung berücksichtigt. Ziel ist es, ein Konzept zu erstellen, mit dem die Sicherheit für ein Intervall in der Phase der Restnutzung gewährleistet werden kann.

Bei heutigen Konstruktionen kann davon ausgegangen werden, dass in der ursprünglichen Bauteilbemessung die theoretische Schädigungssumme mit S ~ 1 ausgenutzt wurde. Man könnte daraus schließen, dass eine WEA, die ihre planmäßige Nutzungsdauer von 20 Jahren erreicht hat, abgerissen werden muss. Dies ist so allgemein nicht richtig [Nath].

Die tatsächliche Nutzungsdauer einer WEA hängt von vielen Faktoren ab (siehe Kapitel 3), die in der Berechnung nicht berücksichtigt wurden. Großen Einfluss darauf haben Instandhaltung (Wartung, Inspektion, Instandsetzung) und Qualität der Anlage. Zusätzliche Unsicherheiten in der Auslegung ergeben sich durch die Effekte der Korrosion und Verschleiß und der Auswahl der Werkstoffe, für die häufig keine Erfahrungen über das extreme Langzeitverhalten vorliegen.

Obwohl alle Komponenten einer WEA für eine Betriebszeit von 20 Jahren ausgelegt werden, ist davon auszugehen, dass innerhalb dieser Zeit eine Reihe der Komponenten ausgetauscht werden muss und ein erheblicher Betrag für Ersatzinvestitionen eingeplant werden muss (ca. 3% des Anlagenpreises pro Jahr) (vgl. [Bollmann]).

Soll eine WEA nach ihrer planmäßigen Nutzungsdauer weiterhin betrieben werden, muss der tatsächlich vorhandene Zustand der Anlage in Erfahrung gebracht werden. Ziel der Beurteilung im Betrieb befindlicher WEA ist es zu klären, ob die WEA unter den gegenwärtigen und zukünftigen Beanspruchungen noch standsicher ist oder ob verstärkte Inspektionsmaßnahmen, Maßnahmen zur Nutzungsreduzierung oder möglicherweise sofortige Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich sind. Besteht noch eine ausreichende Tragfähigkeit, so ist in erster Linie festzustellen, wie und welche Inspektionsintervalle zum sicheren Betrieb einzuhalten sind. Das Intervall muss dabei so ausgelegt sein, dass bei der Wiederkehrenden Prüfung jeder zum Versagen des Bauteils führende Schaden mit Sicherheit festzustellen ist. Wie hoch die gesamte Restnutzungsdauer der WEA unter zukünftigen Beanspruchungen noch ist, kann nicht vorhergesagt werden, weil sie in starkem Maße von den Instandhaltungsmaßnahmen abhängig ist.

Beim Betrieb der Anlage in der Phase der Restnutzung muss das Sicherheitskonzept den vorhandenen Rahmenbedingungen angepasst werden. Während es beim Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer in erster Linie um die Bemessung der Anlage ging, geht es in der Phase der Restnutzung um eine Überwachung und Beurteilung der im Betrieb befindlichen Anlage.

Der ursprünglichen Bemessung der Anlage lag ein ungeschädigter Werkstoff zu Grunde. Mittels Schadenakkumulationshypothese wurde jedes Bauteil für die endliche Nutzungsdauer von 20 Jahren bemessen. Nach 20 Jahren liegt dann ein gebrauchtes Bauteil vor und kein Neuteil mehr. Man muss davon ausgehen, dass eine Schädigung eingetreten ist. Soll die Anlage weiter betrieben werden, folgt daraus, dass man zukünftig mit einem gewissen Schaden leben muss. Und dieser eventuell vorhandene Schaden muss auch in der weitern Vorgehensweise berücksichtigt werden. Mit den bekannten Schadensakkumulations-Hypothesen ist dies allerdings nicht möglich, weil sie nur für ein ungeschädigtes Bauteil definiert sind. Ob ein tatsächlicher Schaden eingetreten ist, kann nur durch Überprüfung des Bauteils festgestellt werden.

Dazu muss der maximal zugelassene Schaden neu definiert werden. Man muss den kritischen Schaden bestimmen, der mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Versagen des Bauteils führt. Es wird ein Verfahren benötigt, das eine Vorhersage über den Schadenszuwachs ermöglicht. Ist das der Fall, kann das Inspektionsintervall so festgelegt werden, dass der Schaden auf jeden Fall detektiert wird, bevor er zum kritischen Schaden anwächst. Somit können rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, bei gleichzeitiger Ausnutzung des Bauteilwiderstands bis an seine Grenze.

Eine entscheidende Rolle bei diesem Verfahren spielt somit in der Bauwerksüberwachung. Es bedarf an Prüf- und Messverfahren, mit denen der Schaden mit Sicherheit detektiert werden kann. Dabei gibt es die Möglichkeit einer ständigen Bauteilüberwachung oder die einer intervallweisen Bauteilüberwachung.

Zur ständigen Bauteilüberwachung sind elektronische Systeme nötig, die fortwährend den Zustand des Bauteils überprüfen und wiedergeben. Damit wird eine zustandsorientierte Instandhaltung möglich. Instandhaltungsmaßnahmen werden planbar. Die Instandsetzung der Anlage kann z.B. zu einem betriebswirtschaftlich günstigen Zeitpunkt, etwa während der windschwachen Sommermonate, erfolgen.

Bei der intervallweisen Bauteilüberwachung muss das Intervall so festgelegt sein, dass der zum Versagen führende Schaden mit Sicherheit gefunden wird.

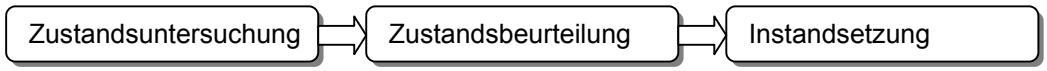
Mit beiden Verfahren kann somit nicht die endgültige Restnutzungsdauer bestimmt werden, sondern es kann nur der sichere Weiterbetrieb der Anlage für ein Zeitintervall in der Restnutzungsphase gewährleistet werden. Die gesamte Restnutzungsdauer hängt entscheidend von den Instandhaltungsmaßnahmen ab. Und diese sind wiederum stark abhängig von betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten.

6.1 Bauwerksüberwachung

Die Bauwerksüberwachung (BÜ) hat zum Ziel, Schäden am Bauwerk und Veränderungen des Bauwerks rechtzeitig zu erkennen. Dabei werden Prüfungen mit gestufter Intensität im Zeitintervall durchgeführt (vgl. [DIN1076], [DB805], [SIA462]). Außergewöhnliche Ereignisse, eine starke Schadenszunahme oder bedenkliche Veränderungen machen eine Sonderuntersuchung erforderlich. Alle Prüfungen und Untersuchungen dienen der Erfassung und Beurteilung des Ist-Zustandes und

bilden die Entscheidungsbasis für allfällige Wartung, Instandsetzung und Ertüchtigung oder gar für den Abbruch.

Der Ablauf der Bauwerksüberwachung lässt sich ein drei Phasen einteilen:



- Grundzüge der Zustandsuntersuchung

  Die Zustandserfassung bildet die Basis zur Beurteilung des Bauwerks und von Entscheidungen über Erhaltungsmaßnahmen. Der Ist-Zustand der Konstruktion ist zu untersuchen und zu dokumentieren. Die Ursachen der Schäden sind schlüssig zu erklären. Intensität, Methoden und Aufwand haben sich am speziellen Schadensbild zu orientieren. Prüfungen in großem zeitlichem Abstand lassen möglicherweise eine gravierende Zustandsänderung nicht rechtzeitig erkennen. Mit aus diesem Grund gewinnt das on-line Monitoring von schadensrelevanten Größen an Bedeutung.

- Grundzüge zur Zustandsbeurteilung

  Auf Basis der Zustandserfassung erfolgt die Zustandsbeurteilung. Antworten müssen auf folgende Fragen gefunden werden:

  - Ist die Gebrauchstauglichkeit noch gegeben?
  - Ist die Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit der Konstruktion noch vorhanden?
  - Stehen die erforderliche Tragsicherheit und Ermüdungssicherheit noch zur Verfügung?

- Grundzüge zur Instandsetzung

  Ziel der Instandsetzung ist die Wiederherstellung des Sollzustandes

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Bauwerksüberwachung lässt sich wie folgt schematisieren. Die Darstellung ist bewusst einfach gehalten, um das Wesentliche deutlich zu machen. Die Hauptpunkte werden im Folgenden erläutert.

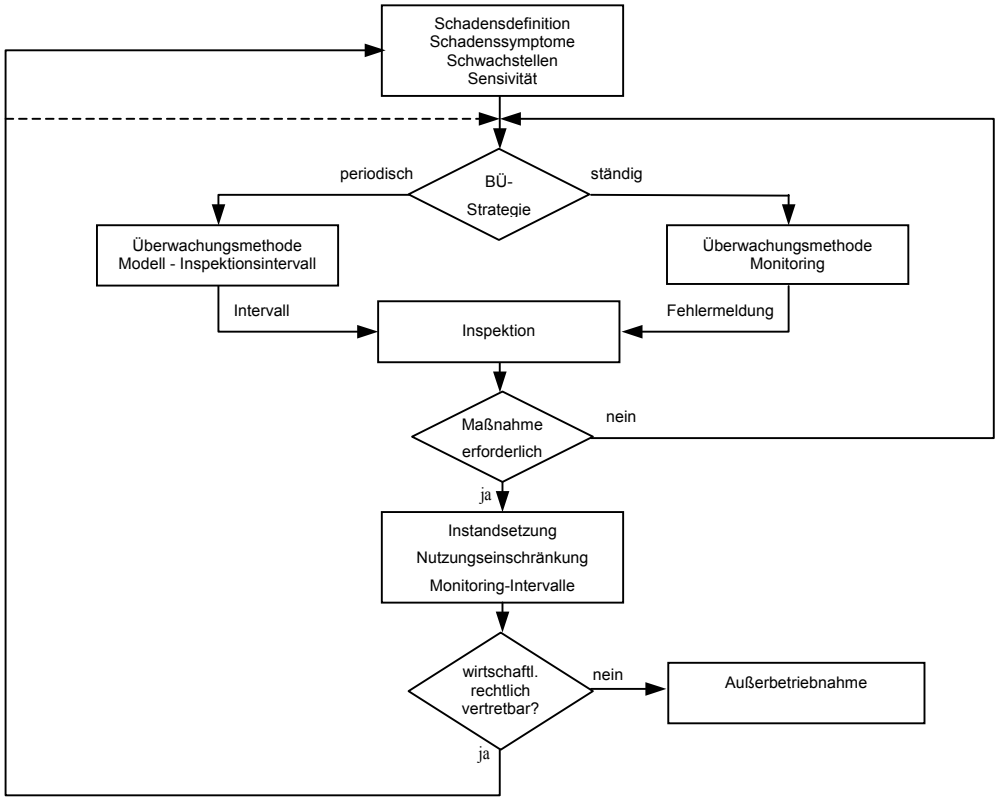


Bild 6.1: Flussdiagramm der Bauwerksüberwachung

6.1.1 Schadensdefinition

Zunächst müssen der zu erwartende Schaden und seine Symptome in Abhängigkeit der Anforderungen an das Bauteil (Nutzung, Gefahrenpotential, d.h. des zu erwartenden Folgeschadens etc.) definiert werden. Schadenssymptome sind z.B. Anrissgrößen, Verformungs- oder Dehnungsänderungen. Die jeweiligen Grenzzustände sind unter anderem abhängig von der Methode der Bauteilüberwachung und sind zu definieren.

So unterschiedlich die Überwachungsaufgaben bei unterschiedlichen Bauwerken und Bauweisen auch sein mögen - eine ist allen gemeinsam: Jedes Bauwerk hat Elemente (Bauteil, Teilbereich), die im Vergleich zu anderen Bauwerkselementen den Grenzzustand des Versagens mit größerer Wahrscheinlichkeit erreichen und daher besonders schädigungsgefährdet sind und / oder bei denen Schäden nicht tolerierbare Folgen nach sich ziehen. Um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks auf Dauer sicherzustellen, müssen solche Schwachstellen identifiziert und mit erhöhter Sorgfalt und gegebenenfalls Häufigkeit überwacht werden.

6.1.2 Überwachungsstrategie

Die Überwachungsstrategie kann nach zwei verschiedenen Prinzipien durchgeführt werden:

- Prognostische Überwachung: Zur Prognose für das folgende Intervall werden Modelle benötigt, die den jeweiligen Bauteilzustand berücksichtigen. Die Brauchbarkeit der Modelle hängt davon ab, in wie weit sie den in einer dauerbeanspruchten Probe ablaufenden physikalischen Prozessen, wie z.B. Rissbildung, Rissfortschreitung, Werkstoff- und Eigenspannungsänderungen usw., Rechnung trägt.

  Mit dem Modell muss es möglich sein, das Inspektionsintervall so festzulegen, dass derjenige Schaden bei der Inspektion erkannt wird, der zum Versagen des Bauteils führen würde.

- ständige Überwachung des Schwellwertes: Hierbei werden durch kontinuierliches Monitoring Schwellwerte (z.B. Grenzdehnung, Riss am Zuggurt) überwacht, ohne dass ein Modell benötigt wird. Sobald der Schwellwert erreicht ist, meldet das System den Fehler. Mit einer Inspektion wird dieser dann am Bauteil überprüft.

6.1.3 Inspektion

Mit der Inspektion wird der tatsächliche Zustand des Bauteils überprüft. Sie erfolgt entweder infolge des fälligen Inspektionsintervalls oder aufgrund einer Fehlermeldung des Monitoring-Systems. Wird bei der Inspektion ein vorab definierter Schaden festgestellt, sind Instandsetzungsmaßnahmen notwendig. Andernfalls beginnt die Routine wieder mit der Bauteilüberwachung.

Wurde die Inspektion aufgrund einer Fehlermeldung des Monitoring-Systems durchgeführt, aber bei der Prüfung am Bauteil kein Schaden festgestellt, so ist die Überprüfung des Monitoring-Systems nötig.

6.1.4 Maßnahmenentscheidung

Wurde bei der Inspektion ein definierter Schaden entdeckt, wird in der Folge eine Entscheidung über anzuwendende Maßnahmen notwendig:

- Bauteil-Instandsetzung
- Nutzungseinschränkung
- Verkürzung der Inspektionsintervalle, d.h. Intensivierung der BÜ, bzw.
- Außerbetriebnahme des ganzen Bauwerkes

Alle diese Aspekte werden in starkem Maße von Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten gesteuert

6.2 Prognostische Überwachung: Modell – Intervall – Inspektion

Die Festlegung des Intervalls erfolgt entweder auf Grund von Erfahrungswerten oder aber auf Grund eines Modells, das den tatsächlichen Zustand des Bauteils berücksichtigt, wie es z.B. das Bruchmechanik-Modell ermöglicht.

6.2.1 Bruchmechanik-Modell

Das Bruchmechanik-Modell dient der Betrachtung des Rissfortschritts unter Schwingbeanspruchung. Ursprünglich wurde es entwickelt zum Abschätzen der Restnutzungsdauer schwingbeanspruchter Bauteile mit makroskopischen Anrissen. Daraus entwickelte sich das Prinzip der Schadens-Toleranz, mit dem eine sinnvolle Restnutzungsdauer selbst für den Fall eines beträchtlichen Schadens nachgewiesen werden kann.

Das Bruchmechanik-Modell basiert auf der Annahme, dass sich ein Riss mit einer bestimmten Geschwindigkeit ausbreitet, bis er schließlich zum Versagen (Bruch) des Bauteils führt. Im Unterschied zu üblich eingesetzten Prognosemodellen (Schadensakkumulation) wird nicht vom Zeitpunkt t = 0 (Inbetriebnahme) auf einen weit entfernten Zeitpunkt geschlossen, sondern Beginn der Prognose ist der aktuelle Zeitpunkt (z.B. Inspektionstermin), d.h. es handelt sich um ein Bauteil mit Vorschädigung. Diese wird in der weiteren Bestimmung berücksichtigt. Die Vorhersage wird bei diesem Verfahren nicht bis zur endgültigen Bauteilnutzungsdauer gemacht, sondern immer nur für das nächste Inspektionsintervall. Die erfahrene Belastungsgeschichte spielt dabei keine Rolle, sondern nur die tatsächlich vorhandene Schädigung.

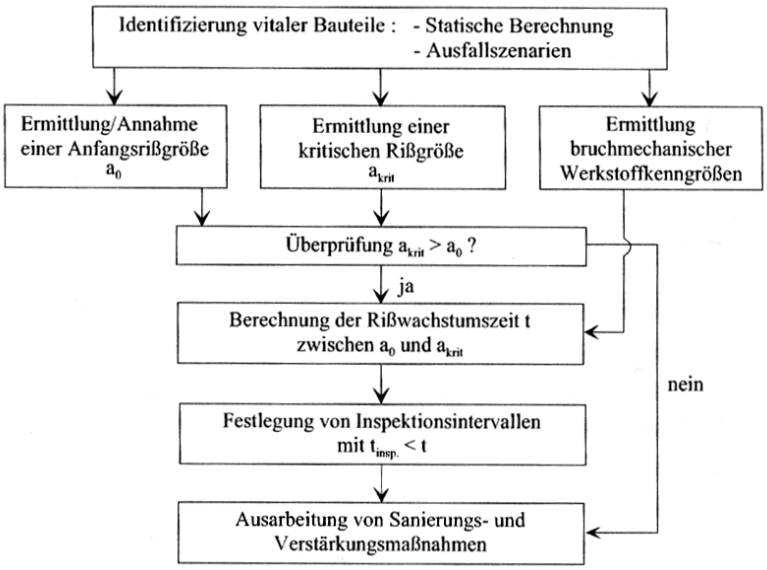


Bild 6.2: Vorgehensweise zur Durchführung bruchmechanischer Sicherheitsanalysen [Hadrych]

Mit Hilfe des Konzeptes der Bruchmechanik kann gezeigt werden, dass Risse mit einer Länge $a < a_0$ unschädlich sind. Die Risslänge a_0 stellt z.B. eine Risslänge dar, die bei Inspektionen sicher erkannt wird. Damit wird plötzliches Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen. Kann dies nicht gezeigt werden, muss das kritische Bauteil ausgewechselt oder verstärkt werden. Die Aussage gilt über beliebig viele Inspektionsintervalle, bis ein erster Riss entdeckt wird.

Weiter kann gezeigt werden, dass die sichere Risswachstumsgeschwindigkeit, ausgehend vom erkennbaren Riss a_0 bis zum Erreichen des kritischen Risses a_{krit} ausreichend groß ist, um die Erkennung innerhalb von festzulegenden Inspektionsintervallen sicherzustellen. Damit können genaue Inspektionspläne erstellt werden. Falls ein Riss gefunden wird, bleibt genügend Zeit, um das Bauteil auszuwechseln oder zu verstärken.

Dadurch kann eine intervallweise Restnutzung gewährleistet werden, auch wenn schon Risse vorhanden sind. Solange bei der Wiederkehrenden Prüfung keine kritischen Risse festgestellt werden, ist das Bauteil zumindest bis zur nächsten Prüfung sicher. Dies gilt zeitlich unbeschränkt so lange, bis Risse gefunden werden. Werden Risse gefunden, verbleibt noch genügend Zeit für Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen. Somit ist es möglich, den Bauteilwiderstand bis zu dem Eintritt eines tatsächlichen, vorab definierten Schadens auszunutzen.

Wesentliche Voraussetzung für die Gewährleistung der Sicherheit ist das zuverlässige Erkennen des Risses bei der Inspektion. Dafür muss der Ort des Risses bekannt sein und entsprechende Mess- und Prüfverfahren zur Verfügung stehen.

6.3 Ständige Überwachung: Monitoring – Fehlermeldung – Inspektion

Condition Monitoring-Systeme kommen ohne vereinfachende Modellannahmen aus. Sie bestehen aus fest installierten Sensoren, die fortlaufend den Bauteilzustand überprüfen. Wegen der ständigen Bauteilüberwachung kann auf die Bestimmung eines Inspektionsintervalls verzichtet werden. Schadensrelevante Daten (z.B. Risslänge, Schwingungen) werden aufgezeichnet und elektronisch ausgewertet. Damit können Rückschlüsse auf die aktuelle Schädigung des Bauteils und auf die zu erwartende Restnutzungsdauer gezogen werden. Ist der Bauteilwiderstand bzw. der definierte Schaden erreicht, wird dies vom System automatisch gemeldet. Wie beim Bruchmechanikmodell verbleibt genügend Zeit für die Instandsetzung.

Schwierigkeiten bei Condition Monitoring-Systemen bestehen darin, die aufgezeichneten Daten in Bezug auf die tatsächliche Schädigung richtig zu interpretieren. Dazu müssen sie zuverlässig arbeiten. Oftmals werden sie als Systeme angepriesen, die eine Nutzungsdauerverlängerung der Bauteile ermöglichen. Dies ist so aber nicht richtig, denn die Systeme dienen lediglich der Bauteilüberwachung. Der Schaden tritt wegen Vorhandensein eines solchen Systems nicht später ein, jedoch kann eine Aussage darüber getroffen werden, wann der Schaden wahrscheinlich eintreten wird. Somit können Folgeschäden verhindert werden und es ist möglich, die Instandsetzungsmaßnahme frühzeitig zu planen.

7 Sicherheitskonzept für die Restnutzung des Turmes

Türme von WEA sind die Tragkonstruktionen der Maschinen, bestehend aus Rotor, Generator und weiteren Komponenten. Die Aufgabe des Turmes ist es, sämtliche Reaktionskräfte der Maschine aufzunehmen und weiterzuleiten. Die Dominanz der Maschine führt dazu, dass die Beanspruchungen von Türmen von WEA sich deutlich von denen anderer Türme, z.B. bei Schornsteinen und Antennen, unterscheiden. Es treten sehr hohe dynamische Beanspruchungen mit Lastwechselzahlen von über 10^9 auf, die jenseits des üblichen Erfahrungsbereiches liegen. Bauteile mit Lastwechselzahlen in dieser Größenordnung entziehen sich auch weitgehend der experimentellen Erforschung im Labor.

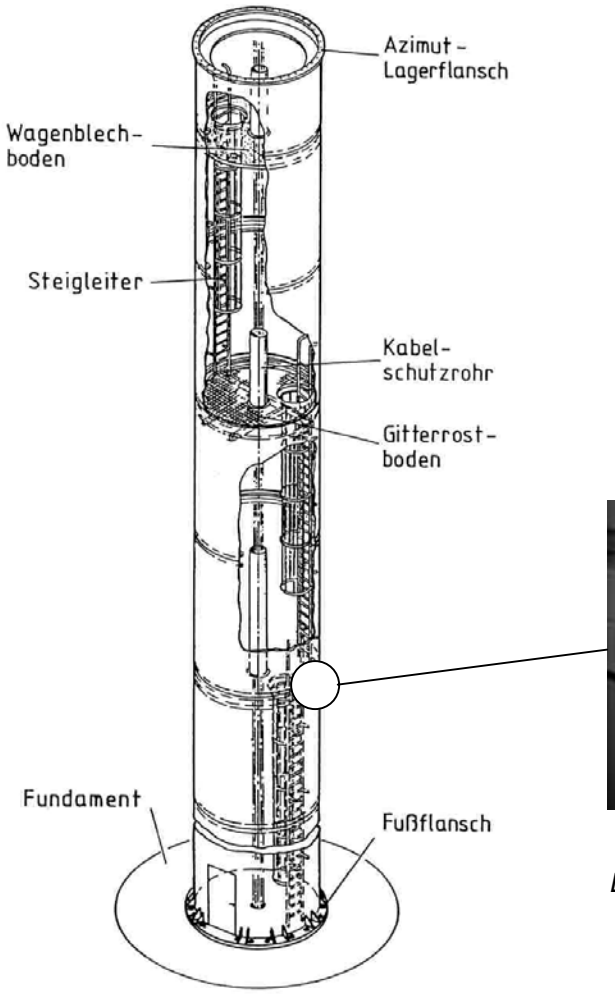


Bild 7.1: Flansch

Bild 7.2: Stahlrohrturm mit Einbauten einer WEA mit ca. 50m Nabenhöhe

Türme werden üblicherweise mit dem Betonfundament, auf das sie aufgesetzt werden, verschraubt. Die Türme bestehen je nach Größe der Anlage aus ca. 20 – 30m langen Turmsegmenten. Die einzelnen Turmsegmente werden mit Hilfe von warmgewalzten, an die Segmentenden angeschweißten Stahlflansche im Turminneren verschraubt. Die Flansche werden aus beruhigtem

Stahl gefertigt. Die Flanschqualität und die Schraubenspannungen sind wichtige Sicherheitsparameter für WEA.

Um ins Turminnere zu gelangen ist am Turmfuß eine Türöffnung mit diesen Bereich versteifenden Türzarge. Im Turminneren befinden sich die Steigleiter zum Erreichen der Gondel und die elektrischen Leitungen. Je nach Höhe des Turmes sind Zwischenböden installiert, normalerweise sind diese knapp unterhalb der Flanschverbindungen. Diese Einbauten sind an die Turmwand angeschweißt.

7.1 Dynamische Beanspruchung des Turmes

Eine WEA stellt ein schwach gedämpftes mechanisches System dar, vor allem wenn Stahltürme betrachtet werden. Bei schwach gedämpften Systemen wird eine dynamische, frequenzabhängige Last in der Nähe der Eigenfrequenz des Systems zu einer dynamisch erhöhten Beanspruchung führen. Aus diesem Grund ist bei der Planung die Betrachtung der Eigenfrequenz einer WEA-Struktur ein wichtiger Bestandteil der Analyse.

Am folgenden Beispiel soll der Einfluss der Strukturdynamik verdeutlicht werden:

Ein 50m hoher Turm einer WEA schwingt ungefähr alle 3 Sekunden hin und her. Die Frequenz, mit der unser Turm oszilliert, wird auch als Eigenfrequenz des Turmes bezeichnet. Diese Eigenfrequenz hängt sowohl von der Höhe des Turmes als auch von der Wandstärke, der Art des Stahles und dem Gewicht von Gondel und Rotor ab.

Immer wenn der Rotor den Turm passiert, wird er aufgrund des geringeren Winddrucks etwas weniger stark gegen den Turm gedrückt.

Wenn nun der Rotor genau so dreht, dass ein Blatt immer dann den Turm passiert, wenn sich dieser gerade auf einer Maximalposition seiner Schwingung befindet, kann das Rotorblatt diese Schwingung entweder dämpfen oder verstärken.

Die Rotorblätter selbst sind auch flexibel und können z.B. einmal pro Sekunde vibrieren. Somit haben die Eigenfrequenzen der Komponenten großen Einfluss auf die Nutzungsdauer der Anlage.

Ein besonders dramatisches Beispiel für Strukturdynamik ist der Einsturz der Tacoma Brücke nahe Seattle (USA).

7.2 Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe

Ermüdungsschäden an Stahlkonstruktionen treten in Form von Ermüdungsrissen auf. Metallische Werkstoffe versagen unter schwingender Beanspruchung bei niedrigeren Spannungswerten als im Fall ruhender bzw. selten veränderlicher Beanspruchung. Die zum Bruch führenden Spannungsamplituden liegen dabei häufig weit unterhalb der im Zugversuch ermittelten Streck- oder Dehngrenzenwerte. Die Ursache dafür liegt in den örtlichen plastischen Verformungen, die bei Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit während jedes einzelnen Schwingspiels auftreten und zunächst zu mikrostrukturellen Veränderungen im gesamten schwingbeanspruchten

Werkstoffvolumen und später lokalisiert in oberflächennahen Werkstoffbereichen zur Bildung von Mikrorissen führen, aus denen sich dann der zum Versagen führende Makroriss entwickelt.

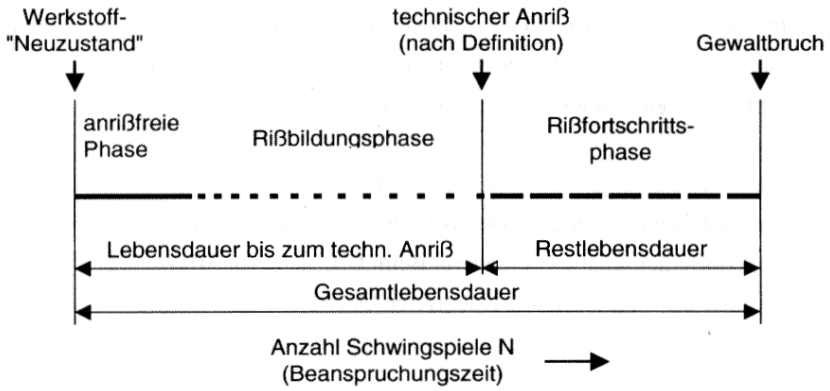


Bild 7.3: Phasen der Werkstoffermüdung [Gudehus]

Der Ablauf der Ermüdungsvorgänge kann in drei Abschnitte unterteilt werden, die kontinuierlich ineinander übergehen, siehe Bild 7.3, wobei der Anteil der einzelnen Ermüdungsstadien an der Gesamtnutzungsdauer vom Werkstoff, vom Werkstoffzustand, der Beanspruchung, der Bauteilgröße und der Bauteilgestalt abhängig ist.

1. Anrissfreie Ermüdungsphase

   Während der anrissfreien Ermüdungsphase zu Beginn der Schwingbeanspruchung laufen im gesamten beanspruchten Werkstoffvolumen strukturmechanische Vorgänge ab, die die Werkstoffeigenschaften verändern. Beim Übergang zur Mikrorissbildung verlagern sich – unter der Voraussetzung einer freien Oberfläche – die für den Ermüdungsvorgang wichtigen Verformungsprozesse in die oberflächennahen Werkstoffbereiche.

   Bei wechselnder Beanspruchung entwickeln sich in den Oberflächenkörnern charakteristische Gleitbänder aus mikroskopisch feinen Gleitlinien. Infolge der im Wesentlichen auf die Gleitbänder konzentrierten Verformung entsteht dort ein stark zerklüfteter Werkstoffbereich, der eine Mikrokerbe darstellt.

2. Rissbildungsphase

   In der Rissbildungsphase weist die gesamte Oberfläche starke kornperiodische Verformungsmerkmale auf, die sehr hohe Deformationen in der Korngrenznähe bewirken und häufig zur Rissbildung an den Korngrenzen führen.

3. Rissfortschrittsphase

   Unter Rissfortschrittsphase wird die Restphase bis zum Gewaltbruch verstanden. Als stabil bezeichnet man den Rissfortschritt, der Schwingspiel für Schwingspiel erfolgt, wobei unter Voraussetzung konstanter Amplitude der Risszuwachs je Schwingspiel zunimmt. Der Gewaltbruch

tritt ein, wenn sich der tragende Querschnitt soweit vermindert hat, dass die Restfestigkeit überschritten wird.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Ermüdungsphasen sind fließend. Deshalb muss die erforderliche Abgrenzung zwischen der Rissbildungsphase und Rissfortschrittsphase definiert werden. Dies erfolgt mit Hilfe des bereits verwendeten Begriffs des technischen Anrisses.

Weiter führende Angabe hierzu findet man in [Schott] oder [Gudehus].

7.3 Ermüdungsschäden am Turm

Ermüdungsschäden am Turm sind bisher noch eine Seltenheit. Ein Versagen des Turmes aufgrund von Ermüdung trat bisher noch nicht ein. Die [TÜVNord]-Gruppe hat die Wiederkehrenden Prüfungen statistisch ausgewertet und kam zu dem Ergebnis, dass die meisten Mängel eher konstruktions- als altersbedingt sind, siehe Bild 7.4.

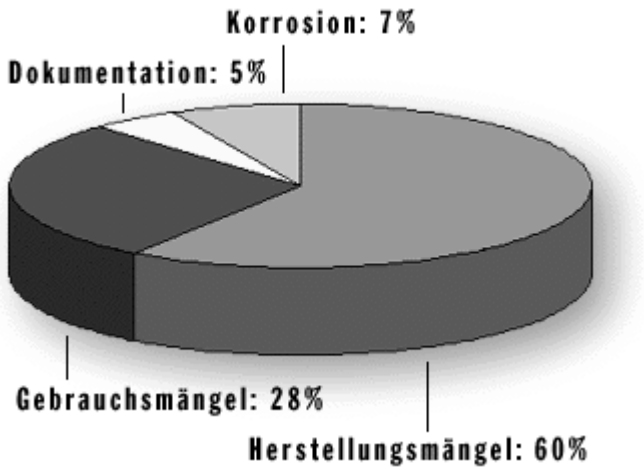


Bild 7.4: Statistische Auswertung der entdecken Mängel bei Wiederkehrenden Prüfungen von WEA [TÜVNord]

7.3.1 Schwachstellen am Turm

Ermüdungsschäden treten in der Regel an konstruktiven Kerbstellen mit erhöhter Spannung auf. Diese Stellen sind durch die analytischen Betrachtungen bei der Bemessung bekannt. Beim Turm sind dies die Flanschverbindungen inklusive Schrauben, alle Schweißnähte (Längs- und Quernähte, Halterungen) und Öffnungen (Türzarge und Versorgungsdurchlässe).

7.3.2 Aufgetretene Ermüdungsschäden am Turm

Bisher sind erst sehr wenige Schäden durch Ermüdung am Turm aufgetreten, so dass es über das tatsächliche Langzeitverhalten des Turmes noch sehr wenig Erfahrung gibt. Mir bekannt sind nur folgende Fälle, in denen Ermüdungsschäden auftraten:

- An einem WEA-Typ traten noch während der planmäßigen Nutzungsdauer Risse im Bereich der oberen Türzarge am Turmkopf auf, siehe Bild 7.5. Ursache für die Rissentstehung sind die erhöhten Spannungen in dem sehr biegesteifen Bereich der Türzarge infolge der Turmkopftorsion. Die Kerbstelle wurde in der Bemessung der Anlage nicht richtig eingeschätzt.

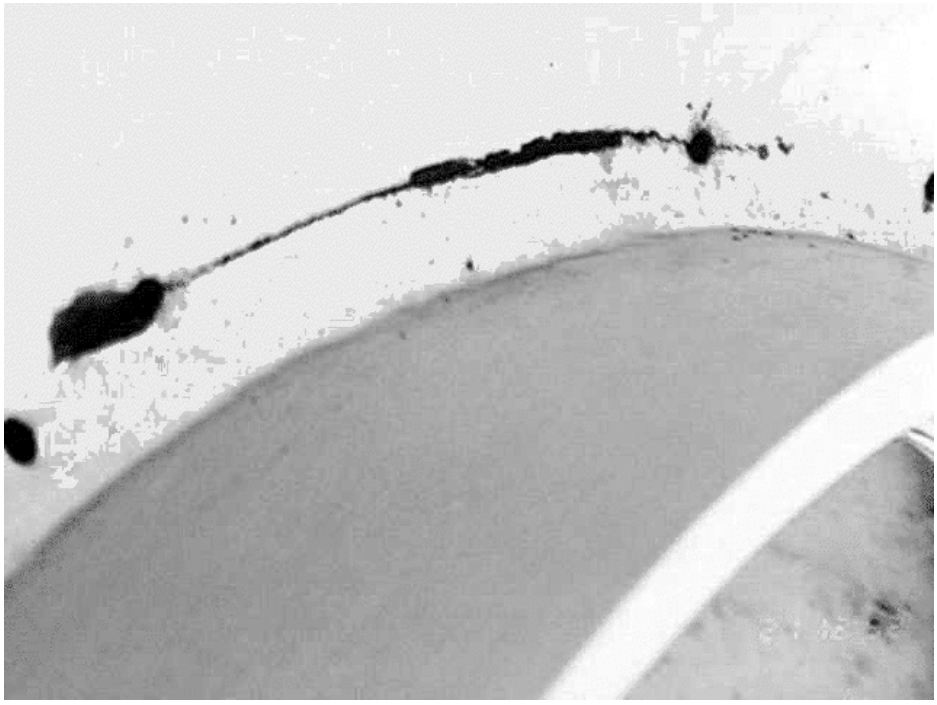


Bild 7.5: Ermüdungsriss an oberer Türzarge

In Bild 7.5 ist im Vordergrund die versteifende Türzarge zu sehen. Direkt oberhalb breitete sich der Riss in der Turmwand zu beiden Seiten aus. Es wurden Löcher gebohrt, um den Riss zu stoppen. Dies gelang jedoch nicht, wie in dem Bild zu erkennen ist. Das Risswachstum konnte damit nur kurzfristig verzögert werden.

Als weitere Maßnahme wurde daraufhin die Türzarge mit jeweils 2 k-Verbänden verstärkt, siehe Bild 7.6.

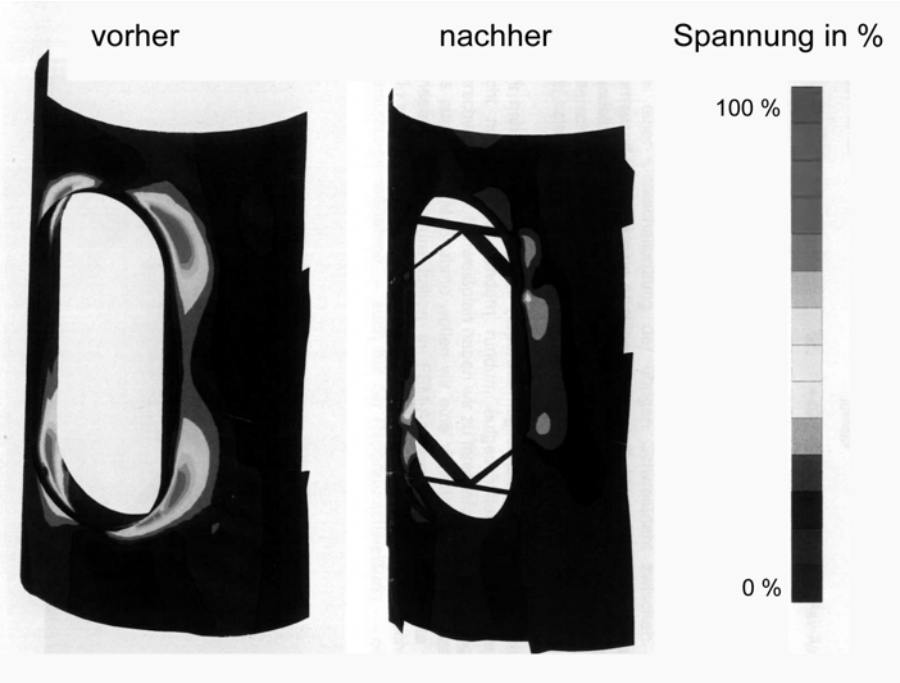


Bild 7.6: Maßnahme zur Instandsetzung des Bauteils; FE-Spannungsberechnung

Diese Maßnahme hatte eine deutliche Spannungsreduzierung zur Folge. Die Rissausweitung konnte gestoppt werden. Im Türflansch-Bereich wurde eine Art „elektrischer Lack“ aufgebracht, mit dem eine ständige Zustandsüberwachung möglich ist. Die Anlagen dieses Typs befinden sich seit Durchführung dieser Maßnahmen wieder im Betrieb.

- Bei einigen Anlagen kam es schon vor, dass schon kurze Zeit nach Inbetriebnahme einige Schrauben in den Flanschen abrissen. Bemerkt wurde dies im Zuge der regelmäßig durchzuführenden Bauwerksbegehung. Ursache für diesen Schaden war ein Produktionsfehler. Der komplette Schraubensatz wurde ausgewechselt und die Anlage planmäßig weiter betrieben.

Die in diesen Beispielen gezeigten Ermüdungsschäden sind eindeutig auf Konstruktions- bzw. Produktionsfehler zurückzuführen. Sie zeigen aber, dass es mittels Bauüberwachung möglich ist, Ermüdungsschäden rechtzeitig zu erkennen, bevor ein Totalversagen eintritt. Mit entsprechenden Reparaturmaßnahmen kann dann ein sicherer Weiterbetrieb der Anlage gewährleistet werden.

7.3.3 Reparaturmethoden für Ermüdungsrisse

In Technikbereichen wie z.B. der Offshore-Industrie oder Schifffahrtsindustrie, in denen man über langjährige Erfahrung mit Ermüdungsschäden verfügt, wurden zahlreiche Methoden zur Reparatur von Ermüdungsrissen entwickelt (vgl. [Graustück]):

- Ausschleifen des Risses: Anwendung bis zu einem Rissfortschritt von 60% der Materialstärke

- Ausschleifen + Ausschweißen: Anwendung bei Rissfortschritten von über 60%
- Reibschweißen: Ein konischer Bolzen wird in ein konisches Loch gedrückt, dann gedreht und somit verschweißt
- Abbohren der Rissspitze
- Abbohren und plastisches Stauchen: Das Bohrloch wird plastisch (kalt) gestaucht, um Druckeigenspannungen in seinem Umfeld zu erzeugen
- Anlegen einer Manschette
- Verstärkungsbleche

7.4 Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer des Turmes

Das Sicherheitskonzept besteht aus der Kombination von Bemessung und Wiederkehrender Prüfung (vgl. Kapitel 4).

Grundlage für die Bemessung gegen Ermüdung ist die lineare Schadensakkumulation nach [Palmgren] und [Miner]. Die Frage der ausreichenden Betriebsfestigkeit ist verbunden mit den beiden Teilfragen, welche Beanspruchungen während der Nutzungsdauer der WEA auftreten und wie für diese Beanspruchung die Ermüdung der einzelnen Details der Konstruktion zu bewerten ist. Die Beanspruchungen im Zeitverlauf ergeben sich aus der unregelmäßigen Einwirkung aus dem Wind auf den Rotor, die über den maschinentechnischen Teil der Anlage an den Turm weitergegeben wird. Die Bemessung des Turmes, der Schrauben und der Ringflanschverbindungen wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten (siehe dazu [Lange], [Schmidt], [Seidel]) erörtert. Diese befassen sich jedoch nur mit dem Intervall der planmäßigen Nutzungsdauer.

Im Turnus von zwei Jahren ist eine Wiederkehrende Prüfung durchzuführen. Sie dient der Erkennung von Schäden und der Vermeidung von Folgeschäden. Dabei ist der Turm auf Korrosion und Risse zu prüfen. Zusätzlich gilt es, die Vorspannung der Schraubverbindungen zu kontrollieren.

7.5 Sicherheitskonzept für die Restnutzung des Turmes

Die Klärung der Frage der ausreichenden Betriebsfestigkeit in der Phase der Restnutzung ist nur möglich aufgrund einer Beurteilung des tatsächlichen Zustandes des Turmes. Mit Hilfe der Bauwerksüberwachung (vgl. Kapitel 6) wird die Sicherheit für das jeweilige Intervall gewährleistet.

7.5.1 Definition des kritischen Schadens

Zunächst muss definiert werden, wie groß der gerade noch zulässige Schaden ist. Beim Turm tritt der Schaden in Form eines Risses auf. Es muss die kritische Risslänge a_{krit} bestimmt werden, bei der das Bauteil die Grenze der Tragfähigkeit erreicht.

7.5.2 Überwachungsstrategie

Bisher gibt es noch keine zuverlässigen Monitoring-Systeme, die eine ständige Zustandserfassung des ganzen Turms ermöglichen. Die oben erwähnte Methode des „elektrischen Lacks“ wurde bisher nur in Einzelfällen erprobt. Die einzige zuverlässige Möglichkeit der Zustandserfassung beim Turm ist eine periodische Inspektion. Dafür muss das Inspektionsintervall festgelegt werden. Dieses muss so festgesetzt sein, dass bei der Inspektion jeder Riss zuverlässig erkannt wird, der im nächsten Betriebsintervall zum Versagen führen würde. D.h. zusätzlich zu der kritischen Risslänge a_{krit} muss die Risslänge a_0 definiert werden, bei der Maßnahmen zur Instandsetzung zwingend erforderlich werden.

Während der planmäßigen Nutzungsdauer wird für die Wiederkehrende Prüfung ein Intervall von 2 Jahren vorgeschrieben. Aufgrund der fehlenden Langzeiterfahrung sollte das Intervall in der Phase der Restnutzung kürzer ausfallen, auch wenn infolge einer bruchmechanischen Analyse ein längeres Intervall möglich wäre.

7.5.3 Inspektion

Bei der Inspektion ist der Turm auf Risse und Verformungen zu prüfen. Die Schrauben müssen auf festen Sitz hin geprüft werden. Die Schwachstellen der Konstruktion sind besonders sorgfältig zu begutachten. Alle Schweißnähte und sonstige Kerbstellen müssen besichtigt werden.

Stahltürme haben den Vorteil, dass Risse infolge von einsetzender Korrosion relativ gut sichtbar sind. Voraussetzung ist allerdings, dass die Beschichtung ebenfalls reißt.

Alle Mängel, auch die unterhalb der Risslänge a_0, müssen gekennzeichnet und dokumentiert werden. Im Weiteren muss der Fortschritt der Schädigung beobachtet werden, damit die richtigen Maßnahmen zur Instandsetzung erfolgen können.

8 Zusammenfassung

Die Windenergiebranche ist noch sehr jung. Dennoch hat die Nutzung der Windenergie in den vergangenen Jahren einen enormen Aufschwung genommen und in Deutschland inzwischen energiewirtschaftlich relevante Dimensionen erreicht. Zwangsläufig gibt es dadurch noch keinerlei Langzeiterfahrungen mit im Betrieb befindlichen WEA, die ihre planmäßige Nutzungsdauer von 20 Jahren erreicht haben.

Für einen weiteren Betrieb der Anlagen nach ihrer planmäßigen Nutzungsdauer, der so genannten Restnutzungsdauer, sprechen nicht nur betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte, sondern auch ökologische. Warum sollte eine funktionstüchtige Anlage abgerissen werden, nur weil keine Sicherheitskonzepte für eine Restnutzung vorliegen? In anderen technischen Bereichen, die allerdings auf mehr Erfahrung bauen können, sind Konzepte zur Bauteilüberwachung bzw. Bauteilinstandhaltung längst gang und gebe. Bei der Luftfahrt würde niemand auf die Idee kommen, ein Flugzeug zu verschrotten, nur weil dies seine planmäßige Nutzungsdauer erreicht hat.

Unter ständiger dynamischer Belastung ist die Tragfähigkeit von Werkstoffen deutlich niedriger als unter statischer Lastaufbringung. Jeder Werkstoff hat sein eigenes, spezifisches Widerstandsverhalten. Die Ermüdungsschädigung wächst mit der Anzahl der Lastwechsel und äußert sich in Form von Rissen. Während der planmäßigen Nutzungsdauer von 20 Jahren erfahren die am Kraftfluss beteiligten Komponenten der WEA bis zu 10^9 Lastwechsel. WEA sind somit regelrechte Ermüdungsmaschinen.

Während der Nutzungsdauer besteht das Sicherheitskonzept einerseits aus der Bemessung und andererseits aus der Wiederkehrenden Prüfung der im Betrieb befindlichen Anlage. Die Bemessung liefert Konstruktionsvorgaben für die bauliche Ausführung, die anschließend mit der Wiederkehrenden Prüfung am Bauwerk auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Aus betriebswirtschaftlichen Gründen ist die WEA planmäßig für ein endliches Intervall zu bemessen. Aufgrund ihrer einfachen Handhabung eignen sich für die Bemessung Schadensakkumulations-Hypothesen sehr gut. Grundlage für die Bestimmung der Nutzungsdauer und der damit korrelierenden Bemessung der WEA ist die lineare Schadensakkumulation nach [Palmgren] und [Miner].

Nutzungsdauerprognosen auf Basis der linearen Schadensakkumulation können zum Teil erheblich von der Realität abweichen. Insofern geben die ermittelten Ergebnisse nur einen ersten Anhalt für die zu erwartende Nutzungsdauer. Die Verfahren wurden entwickelt, um ein Bauteil für eine planmäßige Nutzungsdauer zu bemessen und nicht, um eine exakte Nutzungsdauer auf den Punkt vorherzusagen. Die tatsächliche Nutzungsdauer ist von zahlreichen Faktoren abhängig, die im Modell nicht alle berücksichtigt werden können. Alle Modelle zur Vorhersage basieren auf vereinfachten Annahmen. Für die Genauigkeit der Prognose bedeutet dies, je größer das Intervall, je größer die in der Vorhersage steckende Unsicherheit. Aus diesem Grund besteht das Sicherheitssystem für eine im Betrieb befindliche Anlage zusätzlich aus der Wiederkehrenden Prüfung. Mit ihrer Hilfe wird die Vorhersage auf ihren Wahrheitsgehalt hin überprüft.

In der Restnutzungsphase ändern sich die Rahmenbedingungen, sodass an das Sicherheitskonzept für die Restnutzungsdauer neue Anforderungen gestellt werden. Die Anlage muss nicht mehr bemessen werden, sondern es muss der sichere Betrieb gewährleistet werden.

Die ständigen Einwirkungen verursachen eine fortschreitende Schädigung der gesamten Konstruktion. In der Bemessung wurde von einem ungeschädigten Werkstoff ausgegangen, in der Phase der Restnutzung liegt nun aber ein gebrauchter, mit einer gewissen Vorschädigung behafteter Werkstoff vor, der aber trotz dieser Schädigung noch über eine gewisse Resttragfähigkeit verfügt. Auch weist die gesamte Konstruktion eine innere Redundanz auf, die die Folgen einer lokalen Schwächung durch Mobilisierung anderer Funktionsmechanismen (z.B. Schnittkraftumlagerung) begrenzt.

Soll eine WEA nach ihrer planmäßigen Nutzungsdauer weiterhin betrieben werden, muss der tatsächlich vorhandene Zustand der Anlage in Erfahrung gebracht werden. Ziel der Beurteilung im Betrieb befindlicher WEA ist es zu klären, ob sie unter den gegenwärtigen und zukünftigen Beanspruchungen noch standsicher sind oder ob verstärkte Inspektionsmaßnahmen, Maßnahmen zur Nutzungsreduzierung oder möglicherweise sofortige Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich sind. Besteht noch eine ausreichende Tragfähigkeit, so ist in erster Linie festzustellen, wie und welche Inspektionsintervalle zum sicheren Betrieb einzuhalten sind. Das Intervall muss dabei so ausgelegt sein, dass bei der Wiederkehrenden Prüfung jeder zum Versagen des Bauteils führende Schaden mit Sicherheit festzustellen ist. Wie hoch die gesamte Restnutzungsdauer der WEA unter zukünftigen Beanspruchungen noch ist, kann nicht vorhergesagt werden, weil sie in starkem Maße von den Instandhaltungsmaßnahmen abhängig ist.

Die dafür nötigen Maßnahmen werden unter dem Begriff der Bauwerksüberwachung zusammengefasst. Sie hat zum Ziel, Schäden am Bauwerk und Veränderungen des Bauwerks rechtzeitig zu erkennen. Im Rahmen der Bauwerksüberwachung spielt die Zustandsbeurteilung eine entscheidende Rolle. Sie basiert auf der Zustandserfassung und bildet die Entscheidungsbasis für Wartung, Instandsetzung und Ertüchtigung oder gar für den Abbruch.

Der Zustand der jeweiligen Bauteile kann entweder durch ständiges Monitoring oder periodische Inspektion erfasst werden. Hierfür ist es wichtig, die Schwachstellen genau zu kennen. Wenn sie nicht aus Erfahrung, z.B. durch Schadensanalyse bekannt sind, können sie durch analytische Modelle ermittelt werden.

Bei der periodischen Inspektion muss das Inspektionsintervall so gewählt werden, dass derjenige Schaden mit Sicherheit erkannt wird, der zum Ausfall des Bauteils während des folgenden Intervalls führen würde. Je kürzer dabei das Inspektionsintervall, desto besser kann der Restwiderstand des Bauteils ausgenutzt werden. Für die Prognose werden Modelle benötigt, die den jeweiligen Bauteilzustand berücksichtigen, wie z.B. das Bruchmechanikmodell.

Beim Monitoring sind die Überprüfungsintervalle so kurz, dass von einer fortwährenden Bauteilüberwachung gesprochen werden kann und somit ständig der aktuelle Bauteilzustand vorliegt. Damit kann der Widerstand des Bauteils bis an die sicherheitstechnisch vertretbare Grenze ausgenutzt werden.

9 Fazit und Ausblick

Beim Sicherheitskonzept für die planmäßige Nutzungsdauer von 20 Jahren steht die Bemessung im Vordergrund. Zur Prognose ist dafür das Modell der linearen Schadensakkumulation wegen seiner einfachen Handhabung sehr gut geeignet. Modellunsicherheiten werden durch globale Sicherheitsfaktoren abgedeckt, wodurch ein großer Anteil des Bauteilwiderstandes unberücksichtigt bleibt. Beim Sicherheitskonzept für die Restnutzungsdauer fällt der Aspekt der Bemessung weg. Entscheidend ist jetzt, einen sicheren Weiterbetrieb der gebrauchten und vorgeschädigten Anlage zu gewährleisten.

Ziel des Konzeptes muss es sein, einen intervallweisen Weiterbetrieb der WEA während der Restnutzungsdauer unter Beibehaltung des Sicherheitsniveaus zu ermöglichen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine Anlage, die ihre planmäßige Nutzungsdauer erreicht hat, eine gebrauchte und keine neue mehr ist. Der Betrieb hat Spuren in Form von Schäden an der Anlage hinterlassen. Für den Weiterbetrieb gilt es nun, die aktuelle Schädigung und den Schädigungsfortgang der Anlage richtig einzuschätzen. Antworten auf folgende Fragen müssen gefunden werden:

- Ist die Gebrauchstauglichkeit noch gegeben?
- Ist die Dauerhaftigkeit der Konstruktionselemente noch vorhanden?
- Stehen die erforderliche Tragsicherheit und Ermüdungsfestigkeit noch zur Verfügung?

Die WEA muss einer Restsicherheitsanalyse unterzogen werden, die den aktuellen Zustand samt Schädigung und potentieller Einwirkung berücksichtigt. Diese kann durch eine Bauwerksüberwachung erfolgen, die auf Basis einer Zustandserfassung eine Beurteilung über den Ist-Zustand der Anlage zulässt. Auf Grundlage dieser Beurteilung können dann weitere Maßnahmen getroffen werden.

Ein zum Versagen führender Schaden tritt in der Regel nicht plötzlich ein, sondern er kündigt sich im Vorfeld an. Die Zustandserfassung muss so ausgelegt sein, dass sie einen zum Versagen führenden Schaden zuverlässig und rechtzeitig erkennt und dass genügend Zeit für Ertüchtigungsmaßnahmen bleibt.

Erreicht werden kann dies entweder durch eine intervallweise Prüfung oder durch Zustandsdiagnose- und Fehlerfrüherkennungssysteme, die den Bauteilzustand ständig überwachen. Diese bieten die Möglichkeit, mechanische Defekte an WEA rechtzeitig zu erkennen, um das Ausmaß von Schäden und die damit verbundenen Belastungen der übrigen Komponenten zu verringern. Darüber hinaus führt der Einsatz solcher Verfahren zu einer Reduktion des Wartungsaufwands und der Stillstandzeiten. Allerdings sind solche Condition-Monitoring-Systeme bisher nur für die maschinenbaulichen Komponenten der Anlage in der Lage, aussagekräftige Zustandsprognosen zu liefern. Beim Monitoring wäre es für die Windenergiebranche insgesamt förderlich, wenn Messdaten nicht mehr als Firmengeheimnis behandelt würden.

Schwierigkeiten bei der Zustandsbeurteilung könnten durch eine konsequente Schadensanalyse verringert werden. Dadurch dass die Windenergiebranche noch sehr jung ist, gibt es wenig Erfahrung

über die Ermüdungsschäden und deren Auswirkungen. Eine Schadensanalyse liefert wichtige Informationen über Ursache und Wirkung eines Schadens. Dazu muss der Schadensfortschritt beobachtet und dokumentiert werden. Aus den Daten lassen sich Aussagen über die Auswirkung eines vorhandenen Schadens ableiten. Je mehr Erfahrung auf dem Gebiet der Schadenskunde gemacht wird, desto zuverlässiger werden die Zustandsbeurteilungen und somit die Aussagen über eine Restnutzungsdauer.

Sinnvoll wäre nicht nur das Testen neuer Prototypen, sondern auch ein bewusstes Weiterbetreiben alter WEA auf Testfeldern, um somit wichtige Erfahrungen über das Langzeitverhalten der WEA in Bezug auf Ermüdungsschäden zu sammeln. Auch fallen eventuell beim Abbruch von WEA Informationen über deren Zustand an, die anders nur schwer beschafft werden können.

Erfolgt die Beurteilung des Zustandes auf Basis von analytischen Modellen, müssen diese die tatsächliche Schädigung berücksichtigen. Das Modell der Bruchmechanik bietet diese Möglichkeit, allerdings ist der Aufwand einer bruchmechanischen Betrachtung enorm und die Erfahrungen sind noch gering.

Ziel der Diplomarbeit war es, eine Grundlage für die Erstellung einer neuen Richtlinie zu bilden. Die Richtlinie soll die Vorgehensweise definieren, wie mit einer WEA nach Ablauf der analytisch ermittelten Nutzungsdauer von 20 Jahren zu verfahren ist.

Die aktuell gültigen Normen gelten für den Tragwerksentwurf einer zu errichtenden WEA. Für eine Nachberechnung der gebrauchten und vorgeschädigten WEA sind sie nur eingeschränkt anwendbar. Sie enthalten sichtbare oder verdeckte Prämissen, die für diese Form der Untersuchung nicht gelten. Es bedarf an Regelungen für die Zustandsuntersuchung und die Zustandsbeurteilung.

Die Richtlinie sollte die Prüfung und Überwachung von WEA hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit regeln. Die regelmäßige Prüfung und Überwachung hat den Zweck, eingetretene Mängel und Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu bewerten, sodass Maßnahmen ergriffen werden können, bevor größerer Schaden eintritt oder die allgemeine Sicherheit beeinträchtigt wird. Dafür müssen Erfahrungen aus dem Betrieb mit in die Richtlinie einfließen.

In der Richtlinie sollten Formulierungen zur Dokumentation aller relevanten Informationen über das Bauwerk enthalten sein. Dies sind beispielsweise Daten zum Bauwerk, Prüfberichte, Schadensberichte, Informationen zur Behebung von Mängeln.

Weiter müssen die kritischen Fehlergrößen definiert sein, ab deren Unterschreitung die Sicherheit nicht mehr gewährleistet ist und Maßnahmen zur Ertüchtigung erforderlich werden.

Für die Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung müssen die zur Durchführung autorisierten Personen, die einzuhaltenden Intervalle und der Umfang der Einzelprüfungen festgeschrieben sein.

Dringend erforderlich sind somit einfach anzuwendende Verfahren, die eine zuverlässige und schnelle Beurteilung des Anlagenzustandes vor Ort ermöglichen. Zusätzlich werden zuverlässige Modelle zur

Vorhersage der Dauerhaftigkeit in der Restnutzungsphase gebraucht. Dabei müssen die Kosten dieser Verfahren in einem reellen Verhältnis zum Anlagenwert stehen.

Prinzipiell ist die Restnutzungsdauer von jedem Bauwerk bei entsprechender Instandhaltung unendlich. Es stellt sich allerdings irgendwann die Frage, ob der Aufwand für die Instandhaltung noch im richtigen Verhältnis zum Nutzen steht.

Literaturverzeichnis

[Allianz] Allianz-Zentrum für Technik; Carl Schenk AG: Schwingungsdiagnostische Überwachung von Turbosätzen. In: Allianz-Report für Risiko und Sicherheit : der Maschinenschaden; Nr. 66, Heft 3; München: Allianz Report, 1993

[Bollmann] Bollmann, P.; Krüger, H.: Komponententausch an Windenergieanlagen. In: Erneuerbare Energien 10/1999; Hannover: SunMedia, 1999

[Dalhoff] Dalhoff, P.; Dombrowski, a.; Gauterin, E.; Idelberger, H.; Subramanian, S. P.: Erweiterte Lebensdaueranalyse für Windenergieanlagen. In: Tagungsband der Windtech Grevebroich, 2001

[Danish] Danish Wind Industry Association: Guided Tour on Wind Energy, 31.03.2003 (Download unter http://www.windpower.org/tour/index.htm)

[DB805] Richtlinie der Deutschen Bundesbahn: Modulfamilie 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken; München: Bundesbahnzentralamt, 1997

[DEWI1] DEWI-Magazin Nr. 1: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland - Stand 30.06.1992 -. In: Informationen aus Forschung und Praxis der Windenergie; Wilhelmshaven: Deutsches Windenergie-Institut, 1992 (Download unter http://www.dewi.de/dewi/themen/magazin/01/04.pdf)

[DEWI5] DEWI-Magazin Nr. 5: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland - Stand 30.06.1994 -. In: Informationen aus Forschung und Praxis der Windenergie; Wilhelmshaven: Deutsches Windenergie-Institut, 1994 (Download unter http://www.dewi.de/dewi/themen/magazin/05/05.pdf)

[DEWI22] DEWI-Magazin Nr. 22: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland - Stand 31.12.2002 -. In: Informationen aus Forschung und Praxis der Windenergie; Wilhelmshaven: Deutsches Windenergie-Institut, 2003 (Download unter http://www.dewi.de/dewi/themen/magazin/22/02.pdf)

[DIBt] DIBt : Richtlinie für Windkraftanlagen : Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung ; Fassung Juni 1993; Berlin: Deutschen Institut für Bautechnik, 1993

[DIN622] DIN 622: Tragfähigkeit von Wälzlagern: Begriffe, Tragzahlen, Berechnung der äquivalenten Belastung und Lebensdauer; Berlin: Beuth Verlag, 1979

[DIN1076] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung; Berlin: Beuth Verlag, 1999

[DIN31051] DIN 31051: Instandhaltung : Begriffe und Maßnahmen; Berlin: Beuth, 1985

[DINISO281] DIN ISO 281: Wälzlager; Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer, Berechnungsverfahren; Berlin: Beuth Verlag, 1977

[Eschmann] Eschmann, P.; Hasbargen, L.; Brändlein, J.: Die Wälzlagerpraxis: Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen; 2. Aufl.; München [u.a.]: Oldenbourg, 1978

[Faber] Faber, O. U.: Zeitabhängige Zuverlässigkeit schlanker Stahltragwerke und Windbelastung im Grenzzustand der Ermüdung; Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2002

[Gaßner1] Gaßner, E.: Begriffsbestimmungen der Betriebsfestigkeit. In: Lueger, Lexikon der Technik, Band Fahrzeugtechnik; Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 1967

[Gaßner2] Gaßner, E.: Bedeutung der Betriebsfestigkeit für die Konstruktionsforschung. In: Manuskript eines Vortrags beim Werkstoffkolloquium der Technischen Universität Karlsruhe, 1976

[GL-Richt] Germanischer Lloyd: Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Aus: Vorschriften und Richtlinien / Germanischer Lloyd : IV, Nichtmaritime Technik; Hamburg: Selbstverlag des Germanischen Lloyd, 1999

[Graustück] Graustück, T.: Reparatur von Schwingrissen an Offshore-Strukturen - ein Überblick; Hamburg: Universität, Dipl.-Arbeit, 1993

[Grothus] Grothus, H.: Vorbeugende Instandhaltung : Schäden verhüten, Anlageneffizienz verbessern mit Wartung, Zustandsabhängiger Instandhaltung, Schwachstellen-Beseitigung, Reserveteil-Bevorratung, Vorbeugender Systemkonstruktion; 8. Aufl.; Dorsten: Grothus, 1993

[Gudehus] Gudehus, H.; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung: Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen; Verein zur Förderung der Forschung und der Anwendung von Betriebsfestigkeitskenntnissen in der Eisenhüttenindustrie; 3. Auflage; Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1995

[Haibach] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit : Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung; 2. Aufl.; Berlin [u.a.]: Springer, 2002

[Hadrych] Hadrych, I.: Wachstum von Ermüdungsrissen an Niet- und Schraubenlöchern unter Berücksichtigung von Vorspannkräften der Verbindungsmittel; Düsseldorf: VDI-Verl, 2001

[Hahm] Hahm, T.; Kröning, J.: Modellierung der Nachlaufströmung einer Windenergieanlage. In: Tagungsunterlagen: Fluent Anwenderkonferenz 2001; (Download unter: http://www.tuev-nord.de/downloads/fluentaw2.pdf)

[Hanssen] Hanssen, J.; Repowering – Ein notwendiger Weg. In: Tagungsunterlagen: WIE-Repowering von Windenergieanlagen 21.03.2003

[Hau] Hau, E.: Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit; 2., überarb. und aktualisierte Auflage; Berlin [u. a.]: Springer, 1996

[Hirt] Hirt, M. A.; Bez, Rolf: Stahlbau: Grundbegriffe und Bemessungsverfahren; Berlin: Ernst [u.a.]; Lausanne: PPUR, Akademischer Verlag, 1998

[Jensen] Jensen, T.; Repowering – Stellungnahmen des Bundesverbandes WindEnergie e.V.. In: Tagungsunterlagen: WIE-Repowering von Windenergieanlagen 21.03.2003

[Lange] Lange, H.: Ermüdungsbeanspruchung stählerner Rohrtürme von Windenergieanlagen an Binnenlandstandorten; 1. Auflage; Göttingen: Cuvillier, 2002

[Liersch] Liersch, J.: Erzeugung repräsentativer Beanspruchungen von Windkraftanlagen zur Lebensdauerabschätzung durch digitale Simulation von Betriebszuständen und Manövern. In: Tagungsband DEWEK 1996

[Matthies] Matthies, H.G.; Nath, C.; Schellin, T.E.; Garrad, A.D.; Wastling, M.A; Quarton, D.C.; Wei, J.; Scherweit, M.; Siebers, T.: Study of offshore wind energy in the EC, JOULE I; Verlag natürliche Energie, 1995

[Miner] Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue. In: Journal of applied mechanics; ASME; 1945

[Nath] Nath, C.: Anforderungen an langlebige und wartungsarme Windenergieanlagen; Veröffentlichung; Hamburg: Germanischer Lloyd, 1997 (Download unter: http://www.germanlloyd.de/mba/wind/publicat/langleb.html)

[Palmgren] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. In: VDI-Zeitschrift 58; 1924

[Peil] Peil, U.; Mehdianpour, M.: Lebensdauervorhersage von ermüdungsbeanspruchten Bauwerken durch Monitoring und begleitende Versuche / Teilprojekt B3 des [SFB477]: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung; Braunschweig: Technischen Universität Braunschweig, 1998- (Download unter: http://www.sfb477.tu-bs.de/Berichte/B3%20Bericht.pdf)

[Pohl] Pohl, E. J.: Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe : Ergebnisse von Untersuchungen an beschädigten Maschinenteilen; München und Berlin: Allianz Versicherungs-AG, 1956

[Schaumann] Schaumann, P.; Kleineidam, P.: Die Offshore-Windenergie – eine Herausforderung für den Stahlbau. In: Bauen mit Stahl e.V. 11/2002; Düsseldorf: Bauen mit Stahl e.V., 2002

[Schmidt] Schmidt, H.; Jakubowski, A.: Ermüdungssicherheit imperfekter vorgespannter Ringflanschstöße in windbeanspruchten turmartigen Stahlbauten. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben DIBt-Gesch.Z.: IV 12-5-16.104-912/99, Dezember 2001

[Schott] Schott, G.: Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit : 19 Tabellen; 4. Aufl.; Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1997

[Schütz] Schütz, W.: A history of fatigue. In: Engineering fracture mechanics vol. 54(2); Kidlington: Elsevier Science, 1996

[Seidel] Seidel, M.: Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen; Dissertation Universität Hannover, 2001

[SIA462] SIA 462 (Richtlinie): Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke; Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1994

[SFB477] Sonderforschungsbereich 477: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung; Braunschweig: Technischen Universität Braunschweig, 1998- (Download unter: http://www.sfb477.tu-bs.de/)

[Seeger] Seeger, T.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. Kapitel-Folge 12 in: Stahlbau Handbuch – Für Studium und Praxis, Band 1; Köln: Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, 1996

[Soren] Krohn, S.: Wind Energy Policy in Denmark: 25 Years of Success - What Now?; 2002 (Download unter: http://www.windpower.dk/articles/energypo.htm)

[TÜVNord] TÜV-Nord Gruppe: Statistiken zur Windenergie; 04/2003 (Download unter: http://www.tuev-nord.de/5765.asp)

[Tober] Tober, G.; Schmidt, H. J.: Fehlertoleranz-Konzepte in der Luftfahrt. In: The e-Journal of nondestructive testing & ultrasonics, Vol. 4 No. 6 - June 1999 (Download unter: http://www.ndt.net/article/v04n06/tober/tober.htm)

[Valtinat] Valtinat, G.: Restnutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke. In: Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung : [Vorträge der Fachsitzung I, Deutscher Stahlbautag, Berlin 1992] / Deutscher Ausschuss für Stahlbau, DASt.; Köln: Stahlbau-Verlags-Gesellschaft, 1992

[Virkler] Virkler, D.A.; Hillberry, B.M.: Goel, P.K.: The statistical nature of fatigue crack propagation. In: Journal of engineering materials and technology, ASME (101); New York: American Soc. of Mechanical Engineers, 1979

[Vogel] Vogel, T.: Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch; in Bauingenieur Band 77, 12/2002; Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2002

[Warnecke] Warnecke, H. J.: Moderne Instandhaltungstechniken : aktuelle und zukunftsweisende Lösungen für die betriebliche Praxis / Kongress: 4. Internationaler Fachkongress Instandhaltung; Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1995

Darstellungsverzeichnis

Bild 2.1: Entwicklung der jährlich aufgestellten und kumulierten Anzahl von WEA [DEWI22] 5
Bild 2.2: Entwicklung der durchschnittlich installierten Leistung pro WEA [DEWI22] 5
Bild 2.3: Anteil unterschiedlicher Anlagengrößenklassen an der jährlich neu installierten Leistung [DEWI22] 6
Bild 2.4: Produktionskosten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer [Danish] 7
Bild 2.5: Komponenten einer Horizontalachsen-Windenergieanlage [Hau] 8
Bild 3.1: Einflussbereiche auf die Restlebensdauer 12
Bild 3.2: Lebensdauerphasen 13
Bild 3.3: Phasen der Werkstoffermüdung [Gudehus] 14
Bild 3.4: Technikbereiche, in denen Betrachtungen zur Betriebsfestigkeit von Bedeutung sind [Seeger] 15
Bild 3.5: Versuchsreihe 68 identischer Proben [Virkler] 17
Bild 3.6: Streuung der Ermüdungslaufzeit von 30 Rillenkugellagern [Eschmann] 17
Bild 4.1: Anwendung des Rainflow-Verfahrens 22
Bild 4.2: Wöhlerlinie, Kennfunktion der Beanspruchbarkeit 23
Bild 5.1: Einflussfaktoren auf die Integrität der Struktur 28
Bild 5.2: Einfluss der sicher auffindbaren Risslänge auf die Inspektionsintervalle 29
Bild 5.3: Risswachstumsverhalten einer schadenstoleranten Konstruktion mit einem Lastpfaden an einem Vorderholm 30
Bild 5.4: Risswachstumsverhalten einer schadenstoleranten Konstruktion mit zwei Lastpfaden an einem Panel 31
Bild 5.5: Faktoren für die Entwicklung eines Strukturinspektionsprogramms 32
Bild 5.6: Vorgehensweise zur Ermittlung der vorhandenen Schädigung nach dem Prinzip der linearen Schadensakkumulation 34
Bild 5.7: Vorgehensweise zur Durchführung bruchmechanischer Sicherheitsanalysen 35
Bild 5.8: Vorgehensweise bei der Lebensdauervorhersage mittels Monitoring [Peil] 39
Bild 6.1: Flussdiagramm der Bauwerksüberwachung 46
Bild 6.2: Vorgehensweise zur Durchführung bruchmechanischer Sicherheitsanalysen [Hadrych] 48
Bild 7.2: Stahlrohrturm mit Einbauten einer WEA mit ca. 50m Nabenhöhe 50
Bild 7.3: Phasen der Werkstoffermüdung [Gudehus] 52
Bild 7.4: Statistische Auswertung der entdecken Mängel bei Wiederkehrenden Prüfungen von WEA [TÜVNord] 53
Bild 7.5: Ermüdungsriss an oberer Türzarge 54
Bild 7.6: Maßnahme zur Instandsetzung des Bauteils; FE-Spannungsberechnung 55