

Quantitative Methoden der Zuverlässigkeitstechnik

Rüdiger Heim

Master of Engineering

Zuverlässigkeit, Funktionale Sicherheit und Qualität
von (elektro-)technischen Systemen

Hochschule Darmstadt

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	III
Lernziele	V
1 Motivation für das Thema	7
2 Beispiele aus der Praxis	12
2.1 Zuverlässigkeit von Windenergie-Anlagen	12
2.2 Zuverlässigkeit von Automobilkomponenten	22
2.3 Reflexion	33
3 Grundlagen der Statistik	35
3.1 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung	36
3.2 Zufallsvariablen	41
3.3 Reflexion	46
4 Maschinenelement, Bauteil und System	47
4.1 Reihenschaltung	47
4.2 Parallelschaltung	48
4.3 Gemischte Schaltungen	49
4.4 <i>r aus n</i> Schaltung	52
4.5 Systemfunktion	52
4.7 Reflexion	54
5 Lebensdauerverteilungen	55
5.1 Exponentialverteilung	56
5.3 Weibullverteilung	58
5.4 Normalverteilung	60
5.5 Lognormalverteilung	61
5.6 Andere Verteilungsfunktionen	62
5.8 Reflexion	64
6 Parameterschätzung	65
6.1 Vertrauensbereiche	70
6.2 Klassifizierung von Lebensdauerdaten	73

6.3	Reflexion	76
7	Ausfallrate und Zuverlässigkeit: Die Praxis	77
7.1	Die Badewannenkurve	78
7.2	Zuverlässigkeit eines mechatronischen Systems	83
7.2.1	Spindel-Lager-System für die Werkstückbearbeitung	83
7.2.2	Einführung in die Aufgabenstellung	86
7.2.3	Lebensdauer von Wälzlagern	90
7.3	Reflexion	97
	Literaturverzeichnis	98
	Abbildungsverzeichnis	99
	Stichwortverzeichnis	101

Einleitung

Methoden in der Zuverlässigkeitsabsicherung sind kein einfaches Thema, sondern verlangen die Bereitschaft, eine zunächst erdrückende Vielfalt unterschiedlicher Methoden zu strukturieren und problem- bzw. aufgabenangepasste Methoden zu selektieren. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich für nahezu jeden denkbaren Anwendungsfall spezielle Methoden, die im Hinblick auf eine frühe oder späte Phase in der Produktentstehung, für qualitative oder quantitative Fragestellungen oder für die Anwendung in bestimmten Domänen entwickelt wurden. Das macht es mitunter schwierig, für eine konkrete Aufgabe aus der Vielzahl existierender Methoden die richtige zu identifizieren und diese schließlich erfolgreich anzuwenden. Sehr häufig verlangt unsere Aufgabe nur eine Teilmenge der Methodenantworten, d.h. die Methode ist für die Behandlung der konkreten Aufgabe eigentlich zu aufwändig, oder die Methode unterstützt nur einen Teil der mit der Aufgabe verknüpften Problemstellungen. Manchmal dürfen Sie sogar beide Einschränkungen erwarten ...

In dem von *Hans Grabowski* und *Kerstin Geiger* 1997 herausgegebenen Buch „Neue Wege zur Produktentwicklung“ finden sich zahlreiche Hinweise für den eher zögerlichen Methodeneinsatz in der Zuverlässigkeitsabsicherung. In ihren Interviews erfuhren die Herausgeber, dass mehrheitlich der Aufwand für Durchführung und Einarbeitung der Methoden als unverhältnismäßig groß eingeschätzt wurde - nach der Häufigkeit der Nennungen ergab sich das folgende Bild im Hinblick auf den Einsatz von Methoden der Zuverlässigkeitstechnik:

- erheblicher Aufwand,
- unverständlich und wenig praxisnah, da zu starke Theorieorientierung,
- mangelhafte Vorbereitung und Unterstützung, speziell auch im Hinblick auf rechnerbasierte Werkzeuge wie CAD,
- geringe Bereitschaft zur bereichsübergreifenden Methodenanwendung,
- aufwändige und deshalb oftmals zu langsame Umsetzung neuer Methoden,
- häufige Unterschätzung der Bedeutung von Methoden,
- Fehlen eines ganzheitlichen Methodenverständnisses mit integrierten Einzelmethoden,
- schwierige Einbindung in das Varianten- und Änderungsmanagement.

Es waren - und sind - aber nicht allein die große Anzahl unterschiedlicher, spezieller Methoden, sondern auch Informations- und Datenlücken, die eine durchgängige und vollständig in den Produktentstehungsprozess integrierte Zuverlässigkeitsabsicherung schwierig gestalten. Barrierefreier Datenaustausch und Prozesskompatibilität sind deshalb Elemente, die besondere Beachtung finden müssen, um die Akzeptanz von Zuverlässigkeitsmethoden und deren Einbindung in die Produktentstehung zu fördern.

Viele Detailaspekte werden mit speziellen Methoden betrachtet, die dann kaum einen größeren Wirkungsbereich entwickeln können - auf diese Weise entsteht ein „Methodenwald“ wie es *Michael Kopp* 2013 in seiner Dissertation an der Universität Stuttgart ausdrückte. Andere mögen diesen Wald sogar für einen „Dschungel“, also für annähernd undurchdringlich halten ...

Dieses Modul und die beiden nachfolgenden möchten einen Überblick über verschiedene Methoden sowie deren zielgerichtete Anwendung für typische Aufgabenstellungen vermitteln. Der Anspruch dieser Module ist deshalb nicht darauf ausgerichtet, die Methoden in ihrer Vielzahl und ihren vollständigen Eigenschaften zu beschreiben, sondern immer die Verbindung zu relevanten Aufgaben der ingenieurwissenschaftlichen Praxis herzustellen. Die ausgeprägte Theorieorientierung vieler Methoden sowie die damit einhergehende mathematisch-statistische Komplexität möchte ich konsequent durch eine praxisorientierte Darstellung ersetzen. Ganz ohne mathematische Grundlagen und einen kleinen Streifzug durch die Wahrscheinlichkeitsrechnung funktioniert das natürlich nicht, aber die ausgeführten Beispiele werden Ihnen helfen, die theoretischen Elemente der Methoden unmittelbar in einer ingenieurwissenschaftlichen Praxis zu verankern.

Wichtig - und deshalb schon im zweiten Kapitel ausführlich dargestellt - sind solche Praxisbeispiele noch aus einem anderen Grund: Die wirtschaftlichen Folgen unzureichender Zuverlässigkeit können eine beträchtliche Größenordnung erreichen.

Sir Frederick Henry Royce, der mit *Charles Rolls* im Jahr 1906 das nach den beiden Gründern benannte Unternehmen Rolls-Royce gründete, drückte es so aus:

"Reliability exists, when the price is long forgotten!"

Haltbarkeit und Zuverlässigkeit sind auch im engeren Wortsinn dauerhafte Werte, die gestaltbar sind. Hierzu sind die richtigen Methoden und deren Anwendung notwendig. Deshalb verschaffen wir uns hier und im folgenden Modul ein grundlegendes Methodengerüst, das wir in quantitative und qualitative Methoden unterscheiden wollen. Wir können damit verschiedene Zuverlässigkeitsmerkmale und -kennwerte beschreiben, zahlenmäßig ausdrücken und vergleichend bewerten. Das vertieft den Zugang zur Zuverlässigkeitstechnik und hilft uns, eine oftmals nur gefühlsmäßig belegte Dimension - also eine Aussage wie: „das ist ein schönes, zuverlässiges Produkt“ - objektiv einzuordnen. Damit wird Zuverlässigkeit ein Design- und Konstruktionsziel, das wir erfolgreich gestalten können.

Lernziele

In diesem Modul werden eine Reihe quantitativer Methoden der Zuverlässigkeitstechnik betrachtet, was eine Spezialisierung von Zuverlässigkeitsmethoden und deren Ausrichtung auf quantifizierbare Merkmale und Eigenschaften bedeutet. Das Ziel dieses Moduls ist es, die Studierenden mit grundsätzlichen Begriffen und Inhalten der Wahrscheinlichkeitsrechnung wie beispielsweise Verteilungs- und Dichtefunktionen vertraut zu machen und Daten aus Experimenten oder Feldbeobachtungen solchen Funktionen zuordnen zu können. Damit entsteht das entsprechende Verständnis für die Zuverlässigkeit als eine Konsequenz aus der Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen und Systemen - auch bei in der Praxis vorliegenden Parallel- oder Reihenanordnungen einzelner Elemente.

Damit verfolgt dieser Lehrbrief die folgenden Ziele:

- Anhand konkreter Beispiele soll die unternehmerische Bedeutung zuverlässiger und sicherer Produkten erklärt werden.
- Das grundlegende Verständnis für Methoden und die Kompetenz, diese erfolgreich anzuwenden, soll entwickelt werden.
- Die Grundlagen der deskriptiven Statistik, der Eigenschaften statistischer Schätzfunktionen sowie Elemente der Statistik normalverteilter Zufallsvariablen sollen behandelt werden.
- Zufallsvariablen sowie Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen werden im Hinblick auf Fragestellungen der Zuverlässigkeitstechnik behandelt.
- Reihen-, Parallel- und gemischte Anordnungen von Elementen in einem System sowie die hiermit verknüpften Systemzuverlässigkeiten werden eingeführt.
- Die Klassifizierung von Lebensdauerdaten wird behandelt.
- Der zeitliche Verlauf der Ausfallrate und deren Darstellung in Form der sogenannten Badewannen-Kurve wird beschrieben und anschließend mit einem praktischen Beispiel verknüpft.

Lehrbriefauszug Master Zuverlässigkeitstechnik

1 Motivation für das Thema

In diesem und dem nächsten Modul schreibe ich über Methoden in der Zuverlässigkeitstechnik. Deshalb machen wir uns erst einmal Gedanken, weshalb Methoden interessant und wichtig sein können. Später differenzieren wir dann zwischen quantitativen und qualitativen Methoden: In diesem Lehrbrief werde ich die quantitativen Methoden behandeln, im nachfolgenden Modul schließlich die qualitativen Methoden.

In Wikipedia wird eine Methode als ein „*systematisches Verfahren zum punktgenauen Erreichen eines gesetzten Zieles*“ beschrieben und als eine Handlungsvorschrift definiert, „*die darauf ausgerichtet ist, ein gesetztes Ziel mit Genauigkeit und Effizienz zu erreichen*“. Diese Beschreibung impliziert zwei neue Begriffe, die uns das Wesen und den Charakter einer Methode näherbringen: Eine Methode lässt sich als ein systematisches Verfahren sowie als eine Handlungsvorschrift beschreiben. Wikipedia konkretisiert dies in der folgenden Form: „*Methoden basieren auf einem bewussten Plan und bestehen gewöhnlich aus einer Abfolge vorab festgelegter Einzelschritte*“.

Die Methodenkompetenz beinhaltet also Fähigkeiten und Fertigkeiten, Wissen zu beschaffen, anzuwenden und zu verwerten sowie allgemein mit Problemen umzugehen: Damit ist Methodenkompetenz eine Grundlage, Fachkompetenz zu entwickeln und erfolgreich zu nutzen; sie ist also eine Kompetenz, die andere Kompetenzen erschließt.

Methodenkompetenz umfasst deshalb u.a. die Fertigkeiten, Informationen

- zu beschaffen,
- zu strukturieren,
- zu bearbeiten,
- aufzubewahren und wieder zu verwenden,
- darzustellen.

Weiterhin beinhaltet Methodenkompetenz auch die

- Anwendung von Problemlösungstechniken,
- Gestaltung von Problemlösungsprozessen,
- Interpretation und Präsentation von Ergebnissen aus Verarbeitungsprozessen.

Zuletzt habe ich die Methodenkompetenz mit dem Begriff der Problemlösung zusammengebracht. Während die geistige Anforderung bei einer Aufgabe sich auf reproduktives Denken beschränken mag, ist es bei Problemen zunächst unbekannt, wie und ob diese überhaupt zu lösen sind: Beim Problem soll ein unerwünschter Anfangszustand in einen erwünschten End- oder Zielzustand überführt werden, ohne anfänglich zu wissen, wie dieser aussehen mag, oder mit welchen Mitteln dieser erreicht werden kann. Eine Barriere verhindert also die Überführung des Anfangszustands in den angestrebten Endzustand und für das vorliegende Problem fehlen zunächst noch die Mittel, das gewünschte Ziel zu erreichen.

Die Differenzierung hinsichtlich Problem oder Aufgabe ist natürlich stark subjektiv: Für einen Menschen, der auf Vorkenntnisse und Erfahrungen zurückgreifen kann, mag sich

eine konkrete Anforderung eher als eine Aufgabe gestalten, während eine weniger erfahrene Person sich zum gleichen Zeitpunkt bereits Gedanken um die mögliche Lösung eines Problems macht. Gegenüber reproduktiven Denk- und Handlungsmustern, wie sie für wohldefinierte Aufgaben charakteristisch sind, verlangen Probleme nach einem problemlösenden, abstrakten und vernetzten Denken sowie nach Analyse-, Transfer-, Planungs- und Entscheidungsfähigkeiten. Die Schwierigkeit, für ein Problem wenigstens eine Lösung zu finden, resultiert aus den speziellen Merkmalen eines Problems, nämlich u.a. aus dessen

- Wohldefiniertheit,
- Zerlegbarkeit,
- Lösbarkeit.

Die erfolgreiche Bearbeitung von Problemen macht also in jedem Fall ein systematisches Vorgehen, oftmals sogar eine kreative Neukombination von Informationen und Lösungswegen notwendig. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür sind Methoden:

Erfolgreich denken und handeln können wir nur methodisch!

Mit der Bearbeitung eines Problems fällt die Entscheidung, welche konkrete Methode zur Realisierung des Zieles eingesetzt werden soll. Oftmals stehen in einem solchen Entscheidungsprozess zahlreiche Methoden und Verfahren zur Verfügung, die sich als qualitative oder quantitative Methoden charakterisieren lassen. Die Entscheidung für die eine oder andere Richtung geht dabei mit einem konkreten Zugang zum Forschungsgegenstand sowie den verfügbaren Informationen, Daten und Modellen einher.

Das Adjektiv quantitativ bedeutet die Quantität betreffend, also die Anzahl, Größe oder Menge von etwas. Als Synonyme zu quantitativ können daher unter anderem mengenmäßig oder zahlenmäßig verwendet werden. Das Gegenwort zu quantitativ ist qualitativ.

Als quantitative Merkmale bezeichnet man solche, deren Merkmalsausprägungen intervall- oder verhältnisskalierte metrische Werte annehmen: Das können beispielsweise Abmessungen, Form- und Lagetoleranzen von Maschinenteilen, das Körpergewicht, das Einkommen oder der Intelligenzquotient von Personen sein. Für diese Merkmale können verschiedene mathematische Rechenoperationen durchgeführt werden, wie zum Beispiel die Berechnung eines Durchschnittswertes.

Quantitative Merkmale lassen sich als intervallskalierte Merkmale, d.h. ohne natürlichen Nullpunkt, oder als Ratio- bzw. Verhältnisskalen mit natürlichem Nullpunkt darstellen (Bild 1). Auch Ordinalskalen werden als scheinbar quantitativ beschrieben, sind aber streng genommen qualitativ. Verhältnisskalierte Daten beinhalten die meiste Information, nominalskalierte die wenigste.

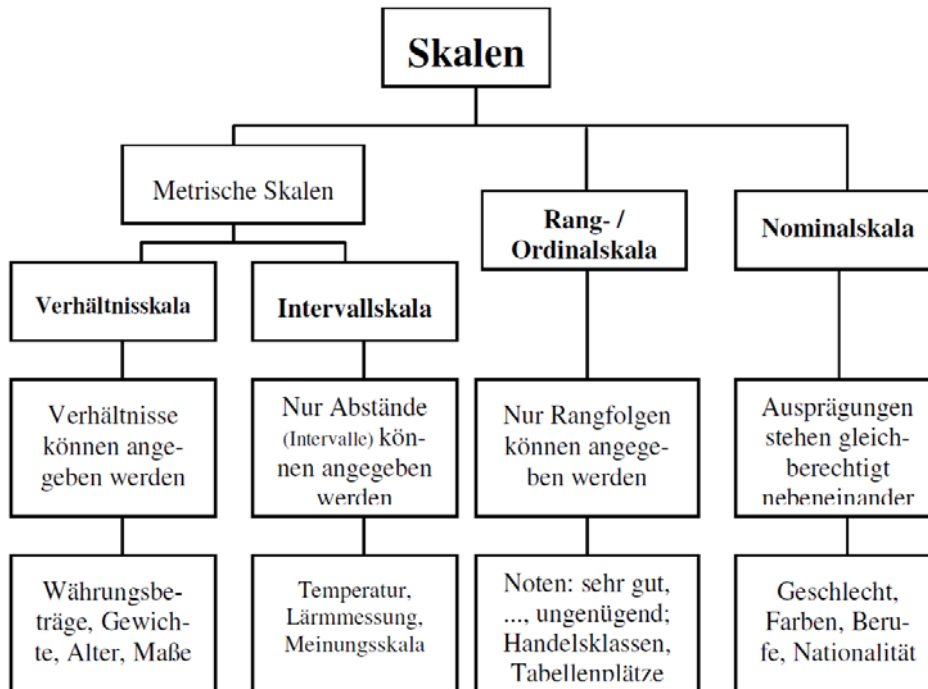


Bild 1 Skalierung von Daten



- 1.1 Überlegen Sie in welcher Form empirische und quantitative Methoden zusammenhängen bzw. sich voneinander unterscheiden. Wo würden Sie einen besonderen Schwerpunkt logischer Ordnung und mathematischer Prinzipien erwarten?

In den Sozialwissenschaften gibt es seit dem 17. Jahrhundert einen wissenschaftlichen Streit über das Verhältnis der quantitativen und qualitativen Methoden in der Sozialforschung. Ein maßgeblicher Teil dieses wissenschaftlichen Methodenstreits geht auf die Frage zurück, ob die Sozialwissenschaften zu den Geistes- oder Naturwissenschaften zu zählen seien und welche Methoden aufgrund der jeweiligen Zuordnung verwendet werden sollten. Die eine Gruppe - nämlich jene, die sich den Naturwissenschaften verpflichtet sieht - favorisiert in diesem Methodenstreit die Ansicht, dass allein durch standardisierte und statistische, also quantitative Methoden objektive Erkenntnisse über das

soziale Leben zu erreichen sind. Auf der anderen Seite stehen Wissenschaftler mit der radikalen qualitativen Auffassung, dass das Wesen des sozialen Lebens in seiner Komplexität durch die Statistik nicht ergründet werden könne.

Der polnische Soziologe *Stanislaw Andreski* sah sich auf der Seite derjenigen, die qualitative Methoden präferierte und schrieb 1974 dazu: „*Wogegen ich argumentiere, ist das seelenverderbte Tabu auf alles, was quantifiziert werden kann und die abergläubische Ehrfurcht vor jedem Gekritzel, das wie Mathematik aussieht.*“

In der Zuverlässigkeitstechnik findet sich glücklicherweise kein solcher Methodenstreit - sowohl quantitative als auch qualitative Methoden werden umfangreich entwickelt, genutzt und zur Lösungsfindung auch miteinander kombiniert. Das Ziel qualitativer Forschung liegt in der Exploration unbekannter Phänomene und Mechanismen sowie in der Entwicklung neuer Theorien und Modelle. Aus diesem Grund weisen die qualitative Methoden vielfach Merkmale einer induktiven Vorgehensweise auf. Demgegenüber folgen die quantitativen Methoden einem im Vergleich zur qualitativen Forschung vorab festgelegten Muster. Dazu müssen zu Beginn des Problemlösungsprozesses bereits Theorien und Modelle über den Gegenstand der Arbeiten vorliegen. Daran anknüpfend werden deduktiv Hypothesen abgeleitet, die im Lösungsprozess überprüft werden. Hierzu erfolgen eine Operationalisierung und die Bildung von messbaren Indikatoren. Die Auswertung der Daten erfolgt über statistische Verfahren und unter Rückgriff auf Kontrollgruppen, um mögliche Störeinflüsse kontrollieren zu können; zuletzt werden die Erkenntnisse wieder auf das theoretische Modell bezogen und interpretiert.



1.2 Schauen Sie sich die Begriffe Deduktion und Induktion an: Deduktion ist ein Schluss vom Allgemeinen auf das Besondere, während die Induktion vom Besonderen auf das Allgemeine schließt. Diese Definition hat auch einen soziokulturellen Hintergrund, beispielsweise wenn Sie wie folgt schließen:

- *Platon ist ein Mensch.*
- *Menschen sind sterblich.*
- *Hieraus folgt: Platon ist sterblich!*

Entspricht diese Folgerung einem deduktiven oder einem induktiven Vorgehen?
Wie würde der andere Fall aussehen?

Wie sieht das konkret für die Aufgaben - oder Probleme - aus, die wir in diesem Studiengang behandeln wollen? Bei uns geht es um Zuverlässigkeit, Sicherheit und Qualität, also Merkmale und Ziele, die von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Parameter abhängen.

Die Zuverlässigkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit des fehlerfreien Funktionierens eines Systems über einen festgelegten Zeitraum sowie in einer bestimmten Umgebung,

die durch Benutzungsart und -intensität sowie weitere Betriebsbedingungen festgelegt wird.

Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Prozesseinheit oder ein System von Prozesseinheiten während eines definierten Zeitintervalls ihre/seine Funktion bei vorgegebenen Leistungsparametern im Rahmen einer festgelegten Toleranz erfüllt.¹

Damit ist die Zuverlässigkeit eine stochastische Eigenschaft des betrachteten Systems und wird durch die zeitliche Verteilung des Eintretens von Fehlerwirkungen - also von Störungen und Ausfällen - bestimmt. Aus technischer Sicht lassen sich solche Fehlerwirkungen in unterschiedliche Kategorien einteilen - beispielsweise

- nach dem zeitlichen Verlauf von Fehlerverhalten und Ausfall:
 - Sprungausfall, Driftausfall oder zeitweiliges Versagen,
- nach der Entstehungsursache:
 - konstruktionsbedingt, fertigungsbedingt oder nutzungsbedingt,
- nach der Beanspruchung:
 - Ausfall bei zulässiger Beanspruchung, bei unzulässiger Beanspruchung oder als Folge des Fehlers anderer Elemente,
- nach dem technischen Umfang:
 - Totalausfall sowie Katastrophenausfall als ein plötzlicher Totalausfall, Teilausfall sowie Degradationsausfall als ein allmählicher Teilausfall.

Die Häufigkeit des Eintretens von Fehlern ist eine Eigenschaft, die sich bei der Benutzung als ein dynamisches Merkmal zeigt: Sobald die Zuverlässigkeit mit Hilfe der beobachteten Zeitspanne zwischen dem Eintreten zweier aufeinanderfolgender Ausfälle definiert wird, können auch bei einem grundsätzlich zuverlässigen System zwei Ausfälle zeitlich dicht aufeinander folgen. Bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit wird damit der Begriff der Wahrscheinlichkeit - also der Grenzwert einer relativen Häufigkeit bei theoretisch unendlich vielen Wiederholungen - ganz zentral.

In dieser Form wird die Zuverlässigkeit mit Hilfe statistischer Verteilungsfunktionen mathematisch beschreibbar und beispielsweise für die Prognose des Ausfallverhaltens bzw. von zu erwarteten Zuverlässigkeitswerten einzelner Komponenten oder Systeme angewendet. Das ist das Ziel dieses Lehrbriefs, der mit dem nachfolgenden Modul M 4.3. um die qualitativen Methoden in der Zuverlässigkeitstechnik ergänzt und methodisch abgeschlossen wird.

Lassen Sie sich hier und im nächsten Modul also auf einen - hoffentlich - interessanten Exkurs ein, der das Ziel verfolgt, den Einsatz verschiedener Methoden für die Zuverlässigkeitsabsicherung von technischen Systemen vorzustellen.

¹ Diese Definition habe ich in den Arbeitsblättern zum Fach Sicherheitstechnik an der TU Dresden gefunden. Prof. Klöden vom Institut für Verfahrens- und Umwelttechnik hat darin die unterschiedlichen Definitionen des Begriffs der Zuverlässigkeit in einem sehr prägnanten Satz zusammengeführt.

2 Beispiele aus der Praxis

2.1 Zuverlässigkeit von Windenergie-Anlagen

Klimaschutz und Energieversorgung sind zwei der Schlüsselthemen in diesem Jahrhundert. Besonders in den Entwicklungs- und Schwellenländern steigt die Nachfrage nach Energie stark an - zusammen mit dem bisher weit überwiegend aus der Verbrennung fossiler Energieträger gedeckten Energiebedarf in den entwickelten Gesellschaften sowie einer veränderten Landnutzung ist bereits seit längerer Zeit eine stark erhöhte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre feststellbar. Mit dieser Entwicklung werden der natürliche Treibhauseffekt durch anthropogene Mechanismen² verstärkt und deutliche Störungen des Klimasystems erwartet³: Bereits im letzten Jahrhundert gab es einen globalen Temperaturanstieg von ca. $0,74^{\circ}\text{C}$, was zu teilweise dramatischen Wetterextremen gerade in den letzten Jahrzehnten führte. Im gleichen Zeitraum stieg der Meeresspiegel im globalen Mittel bereits um etwa *20 Zentimeter* an [Hoe15].

Die weltweit umfassendste Datenbank zu schadenrelevanten Naturereignissen - eine Datensammlung der Munich Re Rückversicherung - listet mehr als 35.000 Datensätze auf. Dabei sind die durch Wetterextreme verursachten Naturereignisse wie Stürme oder Starkniederschlagsereignisse überproportional angestiegen und unterscheiden sich deutlich von den Trends geophysikalischer Ereignisse wie Erdbeben, Tsunamis oder Vulkanausbrüchen. So hat sich in den vergangenen drei Jahrzehnten die Anzahl der wetterbedingten hydrologischen Ereignisse (Überschwemmungen) vervierfacht; demgegenüber ist im gleichen Zeitraum bei den geophysikalischen Ereignissen ein nur wenig signifikanter Anstieg festzustellen.

Deshalb hat sich die internationale Staatengemeinschaft auf der UN-Weltklimakonferenz 2015 in Paris verpflichtet, bis 2050 rund *80 bis 95 Prozent* ihres Kohlendioxid-Ausstoßes zu reduzieren, um damit den weiteren globalen Temperaturanstieg möglichst gering zu halten. Den Erneuerbaren Energien kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, denn wirtschaftliche Entwicklung, industrielle Produktion und Mobilität verlangen nach gesicherter, umweltgerechter Energieverfügbarkeit. In Deutschland hat sich deshalb der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Energiebereitstellung in den beiden letzten Jahrzehnten mehr als versechsfacht. Die Windenergie leistet mit einem Anteil von rund *8,5%* an der gesamten Stromerzeugung den größten Beitrag im Bereich der Erneuerbaren Energien; bereits um 2020 sollen mit Windenergie-Anlagen fast die Hälfte der regenerativen Stromerzeugung abgedeckt werden [Den05].

² Das Attribut anthropogen leitet sich von dem altgriechischen Begriff *ánthropos* (Mensch) ab und beschreibt das durch den Menschen Beeinflusste.

³ Der spätere U.S. amerikanische Präsident *Donald Trump* artikulierte noch im November 2012 per Tweet 'The concept of global warming was created by and for the Chinese in order to make U.S. manufacturing non-competitive' und verfügte als 45. Präsident der Vereinigten Staaten im Frühsommer 2017 den Ausstieg der USA aus dem Weltklimaabkommen. Die deutliche Mehrheit der Weltbevölkerung antizipiert den Klimawandel dagegen als eine der größten Herausforderungen in diesem Jahrhundert.

Anlagen zur Nutzung der Windenergie hatten Anfang der 1990-er Jahre noch Rotorblätter mit einer Länge von 20 m und eine Leistung von 500 kW . Heutige Offshore-Anlagen, d.h. Anlagen, die nicht landgebunden installiert sind, haben Rotoren mit einer Länge von fast 90 m und sind damit die größten in der Menschheitsgeschichte gebauten rotierenden Strukturen.⁴ Im Zeitraum um 2020 werden die Rotorblätter von 20 MW großen Offshore-Anlagen mehr als 120 m lang sein. Während der rund zwanzigjährigen Betriebszeit einer Anlage wird der Rotor durch mehrere Hundert Millionen Umdrehungen sowie zusätzliche extreme Beanspruchungen aufgrund von Böen, Stürmen und anderen Umweltbedingungen belastet.

In Deutschland gab es Ende 2015 annähernd 26.000 Windergie-Anlagen, die eine installierte Gesamtleistung von deutlich mehr als 42.000 MW hatten - die leistungsfähigsten Einzelanlagen haben heute eine Leistung von $7,5\text{ MW}$ ⁵ und können damit rund 6.000 Haushalte mit Strom versorgen.

Die wichtigsten Baugruppen einer Windenergie-Anlage sind deren Turm oder Mast, die Gondel, die Rotornabe und -blätter, das Getriebe und der Generator, die Sensoren und Messinstrumente sowie die Windrichtungsnachführung (Bild 2).

Das Maschinenhaus - oftmals auch als Gondel bezeichnet - ist auf dem Turm montiert und umschließt Generator und Getriebe. Letzteres hält die Drehzahl des Generators bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten konstant. Nachdem 1995 die ersten getriebelosen Anlagenkonzepte auf den Markt kamen, hat sich diese Bauweise als ein weiterer Standard etablieren können [Kli11] und erreicht heute einen Weltmarktanteil von annähernd 30% bei neuinstallierten Anlagen.

Die Windrichtungsnachführung oder die sogenannten Horizontalachsenrotoren sorgen dafür, dass sich die Anlage nach dem Wind ausrichtet und damit deutlich effektiver Strom produziert. Die Daten für die Ansteuerung der Nachführung werden mit den Sensoren in der Messeinheit erhoben, ausgewertet und verarbeitet.

Der Anlagenturm besteht aus Stahlrohren oder aus einem vorgespannten Betonturm mit darauf montierten Stahlrohrsegmenten. Die Wanddicken solcher Betontürme liegen im Bereich von 30 Zentimeter und erlauben den Aufbau von Türmen mit Nabenhöhen von bis zu 160 Meter . Bei Böen mit Windspitzengeschwindigkeiten von 30 bis 40 m/s entstehen große Windlasten, die der Anlagenturm in Form hoher Biegemomente am Turmfuß sicher aufnehmen muss.

⁴ Anfang des 16. Jahrhunderts wurden in den Niederlanden die sogenannten Kappenwindmühlen erfunden und gebaut. Diese hatten eine hoch angeordnete Drehebene von etwa 30 Metern und damit die Möglichkeit für den Bau größerer Flügelkreuze, die eine Leistung von bis zu 30 kW erzeugten.

⁵ Ab 2018 plant ein Windenergieanlagenbauer die Serienproduktion von Anlagen mit einer Leistung von 8 MW und einer Rotorblattlänge von $88,4\text{ m}$, was sich nach Herstellerangaben als der beste Kompromiß hinsichtlich Energieproduktion, Wirkungsgrad, Gewicht und Belastung herausstellte.

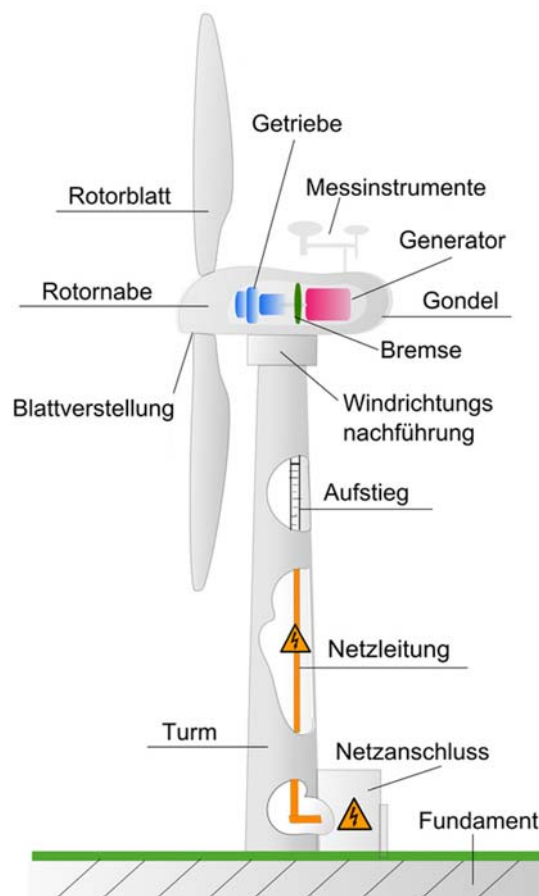


Bild 2 Schema und Bezeichnung der Hauptbaugruppen einer Windenergie-Anlage

Die heutigen Anlagen verfügen quasi ausnahmslos über drei Rotorblätter, die maßgeblich die optische Erscheinung der gesamten Anlage prägen. Mit Hilfe der Rotorblätter wird der Windströmung ein Teil ihrer Energie entnommen und dazu genutzt, den Generator anzutreiben. Die Einzelblattlänge bei landgebundenen Anlagen ist etwas kleiner als die von Offshore-Anlagen und beträgt heute maximal *70 Meter*; Rotorblätter in dieser Größe besitzen eine Masse von etwa *25 Tonnen*. Sie werden aus Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen (FKV) hergestellt und machen etwa *20%* der Gesamtkosten einer Windenergie-Anlage aus. In der Regel bestehen die einzelnen Rotorblätter aus zwei Halbschalen sowie einer dazwischenliegenden Gurt-Steg-Kombination. Aufgrund der verwendeten Werkstoffe, des aufwändigen Aufbaus und des Fertigungsprozesses betragen der Personal- und Materialkostenanteil rund *90%* der gesamten Herstellkosten in der Rotorblatffertigung [DWG15].

Der sogenannte Antriebsstrang einer Windenergie-Anlage umfasst alle Komponenten zwischen dem Rotor und der Stromeinspeisung in das Verteilnetz; das ist also der stromerzeugende Kraftwerksteil. Dabei muss der Antriebsstrang die Rotordrehzahl an

die Frequenz des elektrischen Netzes anpassen. Dies kann mit einem Übersetzungsgetriebe zwischen Rotor und Generator, oder durch einen direkt vom Rotor angetriebenen, drehzahlvariablen Generator erfolgen.

Die mechanische Bremse muss so ausgelegt sein, dass sie die Rotordrehzahl bei auftretenden Windböen in den spezifizierten Grenzen halten und im Notfall die gesamte Rotationsenergie von Rotor und Generator aufnehmen kann.

Die Windrichtungsnachführung wird durch Stellmotoren gewährleistet, die gegeneinander verspannt sind, um größere Schwingungen um die Turmachse zu vermeiden.

Solche Technologien haben selbstverständlich ihren Preis: Die Hauptinvestitionskosten solcher Anlagen, d.h. die Herstellkosten sowie die Kosten für Transport und Installation sind beträchtlich (Bild 3).

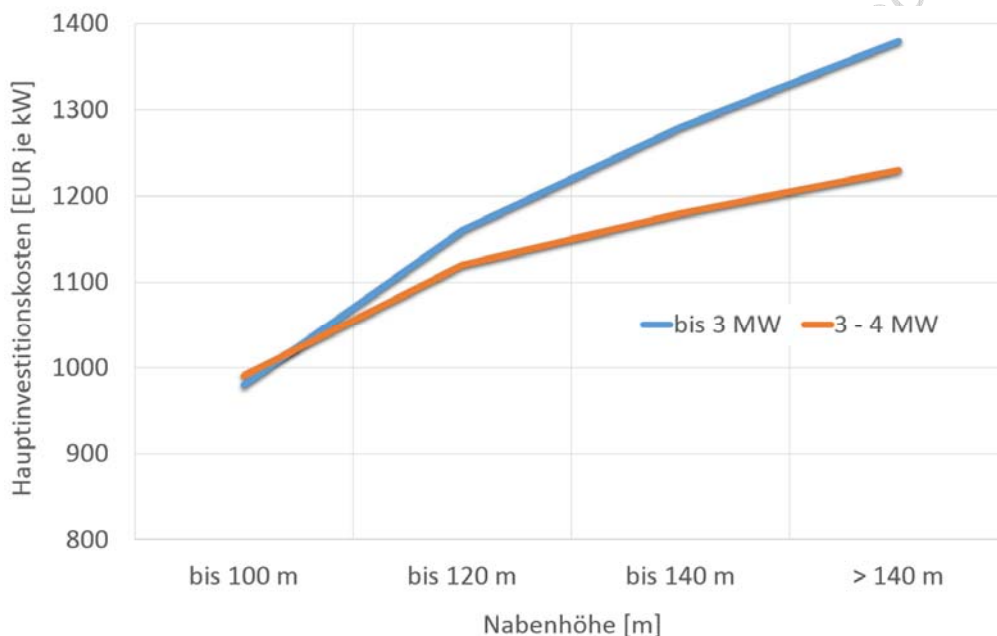


Bild 3 Hauptinvestitionskosten in Abhängigkeit der Nabenhöhe

Die auf ein Kilowatt bezogenen Kosten von Windenergie-Anlagen steigen mit der Nabenhöhe und liegen bei wenigstens *1.000 EUR* für heutige landgebundene Anlagen. Tendenziell sind Anlagen einer größeren Leistungsklasse je Kilowatt günstiger; die einzige Ausnahme bilden Windenergie-Anlagen mit einer Nabenhöhe unter *100 Metern*.



- 2.1 Überlegen Sie kurz und überschlägig: Wie teuer muss ein einzelner Haushalt den Aufbau einer Windenergie-Anlage bezahlen?

Die durchschnittliche Nabenhöhe von in 2015 neu installierten Anlagen betrug in Niedersachsen *121 Meter*, in Mecklenburg-Vorpommern *131* und in Bayern *141 Meter*. Im Sommer 2016 wurde in Rheinland-Pfalz die zu diesem Zeitpunkt weltweit höchste Anlage mit einer Nabenhöhe von *164 Metern* aufgebaut. Es wird schnell erkennbar, dass die Nabenhöhen an den küstenfernen Binnenstandorten ansteigen: Die Windgeschwindigkeit über offenem Gelände lässt sich näherungsweise mit einer exponentiellen Höhenformel beschreiben, d.h. die Nachteile der durchschnittlich geringeren Windgeschwindigkeiten an Binnenstandorten lassen sich teilweise durch größere Höhen kompensieren. Neben der Nabenhöhe von Windenergieanlagen ist deren Rotordurchmesser ein wichtiges Kriterium für die Höhe der Hauptinvestitionskosten.

Die Installation von Windenergie-Anlagen in Deutschland fand bis Mitte der 1990-er Jahre überwiegend in den Küstenregionen von Norddeutschland statt, da die dort vorherrschenden Windverhältnisse eine wirtschaftliche Nutzung am ehesten ermöglichten. Im Laufe der nachfolgenden Jahre wurden immer mehr Anlagen auch an küstenfernen Standorten im Binnenland sowie in den Mittelgebirgsregionen Deutschlands errichtet. Mittlerweile werden Windenergie-Anlagen in allen Bundesländern und in ganz unterschiedlichen Geländestrukturen betrieben, was für die Anlagen einen deutlich differenzierten Stromertrag erwarten lässt. Zur Bestimmung der Standortqualität eines Anlagenstandortes wird der prognostizierte Stromertrag der Windenergie-Anlage mit dem Referenzertrag der betreffenden Anlage ins Verhältnis gesetzt. Der Quotient gibt den prozentualen Mehr- bzw. Minderertrag an, den die Anlage im Vergleich zum Referenzstandort liefert. Die Standortqualität, also das Verhältnis der Ertragseinschätzung zum Referenzertrag, ist folglich technologie- und standortabhängig [DWG12].

In Schleswig-Holstein hat mehr als die Hälfte der dort installierten Anlagenleistung Standortqualitäten von wenigstens *90 Prozent* des Referenzertrages; in Bayern und Baden-Württemberg weisen jeweils mehr als *90 Prozent* der Anlagenleistung eine Standortqualität unterhalb von *80 Prozent* auf. *15 Prozent* der bundesweit erfassten Anlagenkapazität weist eine Standortgüte von weniger als *70 Prozent* auf. Windenergieanlagen mit Standortgüten bis *50 Prozent* wurden für Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen gemeldet.

Die Standortqualität hat verständlicherweise einen großen Einfluss auf die Stromgestehungskosten, d.h. die Kosten, die eine Kilowattstunde Strom im Durchschnitt über die Betriebsdauer von typischerweise 20 Jahren kostet. Diese Gestehungskosten beinhalten die Investitionen, die Betriebskosten, den jährlichen Energieertrag, sowie die kalkulatorischen Zinsen und die Anlagennutzungsdauer. Bei einer Standortqualität von *80%* können heute Gestehungskosten von *7,8 ct/kWh* erwartet werden; bei einer Standortqualität von *100%* verringern sich diese Kosten auf *6,7 ct/kWh*.

Die Stromgestehungskosten werden ganz maßgeblich auch von den Betriebskosten beeinflusst, die sich durch die Kosten für Wartung und Reparatur, Grundstückspacht,

die kaufmännische und technische Betriebsführung, sowie Versicherungen und Rücklagen ergeben. Der Fixkostenanteil - also vorrangig die mit Betriebsführung und Versicherungen assoziierten Kosten - beträgt dabei rund 30%. Die jährlichen Betriebskosten einer Anlage an einem 80% Standort liegen in einer Größenordnung von knapp unter 60 EUR je kW installierter Leistung und haben sich im dargestellten Zeitraum von etwa 15 Jahren (Bild 4) etwas rückläufig entwickelt.

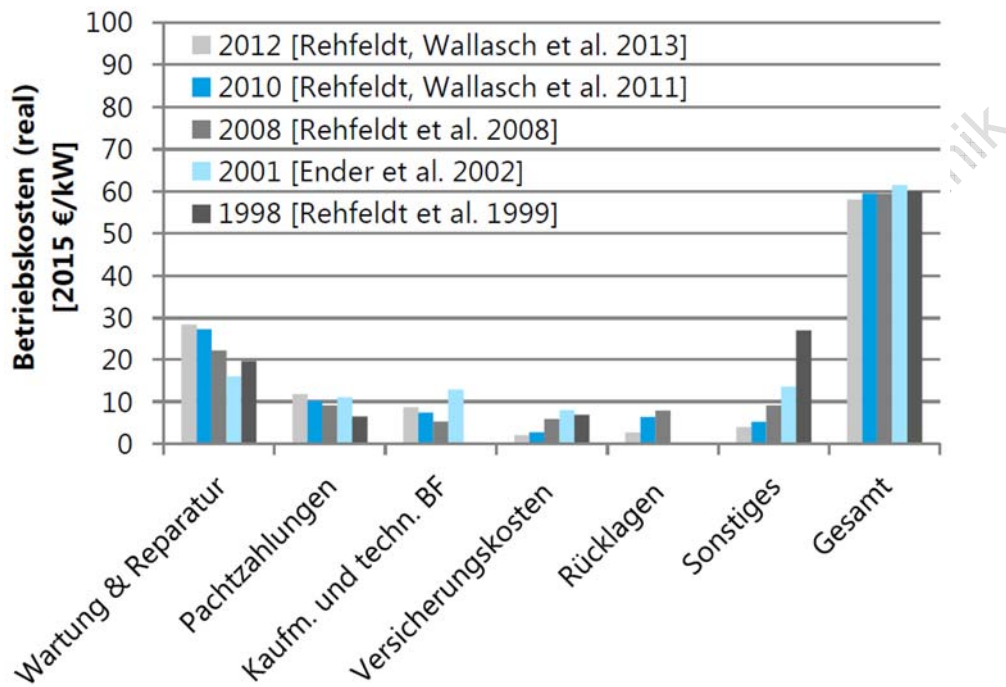


Bild 4 Betriebskosten von Windenergie-Anlagen

Auffällig sind die im beobachteten Zeitraum von knapp 15 Jahren deutlich gestiegenen Kosten für Wartung und Reparatur. Diese waren anfänglich rund 10 EUR/kW geringer als bei später aufgebauten Anlagen. Heute werden diese Kosten auf zunächst etwa 44%, in der zweiten Betriebsdekade auf durchschnittlich 55% der gesamten Betriebskosten abgeschätzt werden. Das sind für eine Windenergie-Anlage mit einer installierten Leistung von 3 MW am 80% Standort immerhin jährliche Aufwendungen in einem Bereich von annähernd 75.000 EUR bis über 90.000 EUR.

Die Betriebskosten von Offshore-Anlagen sind demgegenüber nochmals deutlich höher: Aufgrund vergleichsweise stark erhöhter Aufwendungen für Versicherung und Wartung vervierfachen sich die Betriebskosten.

Die hier dargestellten Zahlen - wir sind ja in jenem Teil des Studiums, in dem wir uns mit quantitativen Merkmalen befassen ... - lassen uns überschlägig feststellen, dass die kumulierten Betriebskosten einer Anlage über deren zwanzigjährige Nutzung in der gleichen Größenordnung liegen wie die anfänglichen Investitionskosten. Mit dem großen

Anteil von Wartungs- und Reparaturaufwendungen an den Betriebskosten wird uns sofort klar, dass Qualität und Zuverlässigkeit einen enormen Stellenwert in einer Gesamtbetrachtung von Windenergie-Anlagen haben. Funktionsunterbrechungen und Schäden an den Baugruppen einer Anlage verursachen nicht allein Reparaturkosten, sondern bedeuten auch Stillstand in der Stromproduktion.

Moderne Anlagen weisen eine technische Verfügbarkeit von bis zu 98% auf, d.h. nur für eine geringe Anzahl von Tagen in einem betrachteten Zeitraum von z.B. einem Jahr können die Anlagen aufgrund technischer Probleme keinen Strom erzeugen.

Die unterschiedlichen Beanspruchungen der Anlagenkomponenten und -baugruppen, die auf die verschiedenen technischen Konzepte oder unterschiedlichen Standorteigenschaften zurückzuführen sind, aber auch die in den Anlagen eingesetzten baugleichen Komponenten unterschiedlicher Hersteller führen zu verschiedenen Bauteillebensdauern und so zu einer Streuung der Ergebnisse. Tatsächlich sind die Beanspruchungen von Komponenten und Baugruppen in Abhängigkeit der Anlagenbetriebsbedingungen wie Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität oder Umgebungstemperaturen noch nicht hinreichend untersucht und verstanden.

Statistiken [BMU09] lassen erkennen, dass vor allem Anlagen an küstennahen und Mittelgebirgs-Standorten überdurchschnittlich häufig von Ausfällen betroffen sind. Die dort vorherrschenden Bedingungen mit größeren Windgeschwindigkeiten und Turbulenzen führen wahrscheinlich zu größeren Belastungen der Anlagen in solchen Regionen. Aber auch mögliche Wartungsrückstände aufgrund der eher weiträumigen Verteilung der Anlagen - besonders an Standorten in Mittelgebirgsregionen - wird als Ursache für deren unterdurchschnittliche Zuverlässigkeit angeführt.

Während bei Anlagen im Mittelgebirge vergleichsweise häufig Bauteile des elektrischen Systems sowie der Regelung, aber auch solche von Rotorblatt und -nabe von Defekten betroffen sind, sind es bei küstennah installierten Anlagen eher die mechanischen Komponenten wie Blattverstellung, Triebstrang oder Windrichtungsnachführung. Vor allem in den höheren Lagen der Mittelgebirge sind auch Eisbildung an den äußeren Anlagenkomponenten, Sturm und Netzausfall häufige Störungsursachen.

Mit heute verfügbaren Daten zu relevanten Störungen und Schäden von Windenergie-Anlagen, die bis zum Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramm ab Anfang der 1990-er Jahre [WMEP03] zurückreichen, lassen sich zuverlässigkeitsbestimmende Bedingungen und Effekte beschreiben. So korrelieren beispielsweise hohe Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit mit einer relativ größeren Auftretenshäufigkeit von Schäden.

Die stärkste Abhängigkeit der Schadenshäufigkeit von der Windgeschwindigkeit zeigen dabei die Komponenten der Elektrik - sehr wahrscheinlich, weil die Anlagen bei höheren Tagesmittelwerten der Windgeschwindigkeit dann einen überdurchschnittlich großen Zeitanteil im Bereich ihrer Nennleistung arbeiten.

Die Abhängigkeit der Schadenshäufigkeit von der Windgeschwindigkeit ist für andere Baugruppen der Anlagen ebenfalls vorhanden, gegenüber den elektrischen Komponenten aber weniger deutlich ausgeprägt. Weiterhin zeigen die Daten, dass bei Anlagen mit großer installierter Leistung die Elektrik deutlich störungsanfälliger ist: Etwa drei Viertel aller Schäden fallen bei den Anlagen im Mega-Watt Leistungsbereich in den Baugruppen Elektrik, Generator, Regelungseinheit und Sensorik an (Bild 5). Allerdings wird mit diesen Daten nicht ganz klar, ob allein die installierte Leistung der ausschlaggebende Faktor für die Störanfälligkeit ist oder ob nicht auch Bauart und -typ der Anlage mitverantwortlich sind.

Die elektrischen und elektronischen Bauteile und Komponenten weisen offensichtlich hohe Fehlerhäufigkeiten auf. Die mit diesen Fehlerzuständen verknüpften Ausfalldauern der Anlagen sind jedoch verhältnismäßig gering, da solche Komponenten leicht zugänglich und austauschbar, also einfach instandzusetzen sind.

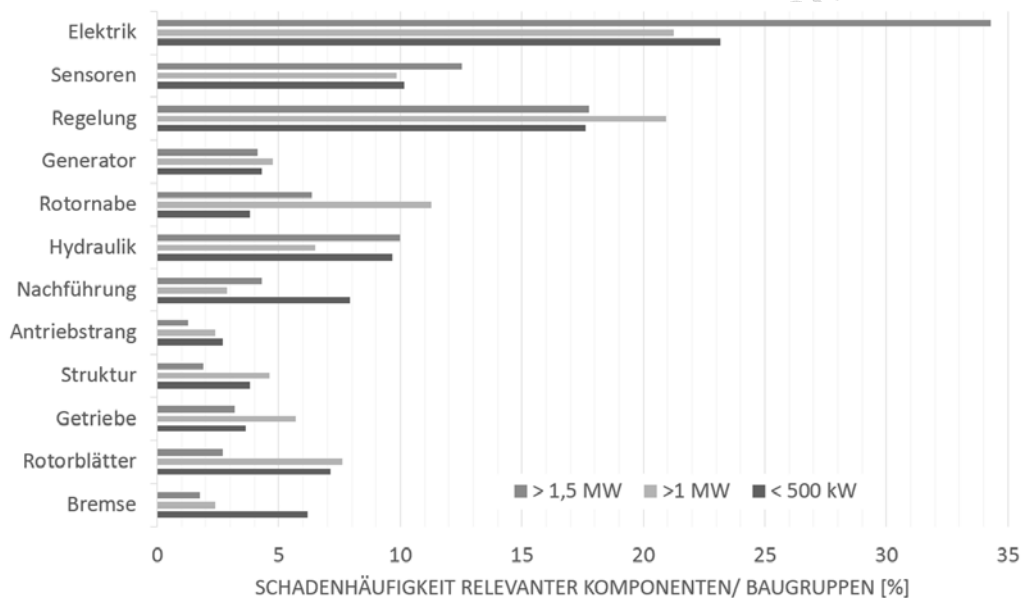


Bild 5 Schadenshäufigkeiten der Hauptbaugruppen

Während die mechanischen Komponenten oftmals aufgrund von Oberflächen- und oberflächennahen Defekten ausfallen - mit den Verschleiß und Ermüdung genannten Mechanismen beschäftigen wir uns im Modul 4.4 - kann es für den Ausfall der elektrischen Komponenten ganz unterschiedliche Fehlerursachen geben. Für diese Bauteile besteht eine grundsätzliche Schwierigkeit, einen sich anbahnenden Fehler frühzeitig zu detektieren und den möglichen Ausfall zu prognostizieren. Elektrische Komponenten fallen oftmals spontan aus und sind hinsichtlich einer Zustandserfassung und -veränderung schwer vorherzusagen.

Aber nochmals: Die Ausfallhäufigkeit einzelner Baugruppen und hierdurch begründete Ausfall- und Stillstandzeiten der Anlagen korrelieren nicht unmittelbar miteinander: