

Andreas Ostertag

Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke

D 93
ISBN 978-3-948308-01-8

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Andreas Ostertag, M.Sc.
aus Nürtingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2021

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
2021

Meiner Familie gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter im Fachbereich Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Sonderforschungsbereichs 1244.

Mein ausgesprochener Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung dieser Arbeit, seine fachliche und wissenschaftliche Unterstützung und sein fortwährend entgegengebrachtes, uneingeschränktes Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff, Institut für Baustatik und Baudynamik, danke ich für die Übernahme des Mitberichts, die kritische Durchsicht und die konstruktiven Hinweise.

Dem Initiator und Sprecher des Sonderforschungsbereichs 1244 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek danke ich für das ins Leben Rufen dieses Projekts und die lehrreichen Beiträge innerhalb der Doktorandenkolloquien. Darüber hinaus danke ich dem stellvertretenden Sprecher Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny für seine nützlichen Anregungen in den Teilbereichstreffen.

Für die enorme Hilfsbereitschaft und Verbundenheit der Forschergruppe danke ich allen beteiligten Wissenschaftlern und Teilprojektleitern, die mit ihrem unermüdlchen Einsatz eine angenehme Arbeitsatmosphäre und damit die Grundlage für ein erfolgreiches Zusammenarbeiten geschaffen haben.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Maschinenelemente, insbesondere aus dem Fachbereich Zuverlässigkeitstechnik und der Verwaltung spreche ich für ihre zuvorkommende Arbeitsweise meinen Dank aus. Besonders bedanke ich mich bei meinen langjährigen Bürokollegen Dr.-Ing. Nika Nowizki und Patrick van Bergen, M.Sc. und meinen freiwilligen Lektoren. Durch zahlreiche wertvolle Diskussionen und nützliche Anregungen haben sie wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein ganz besonderer Dank gilt schließlich meinen Eltern Claudia und Wolfgang und nicht zuletzt meiner Frau Isabel für ihre absolute Unterstützung.

Sindelfingen im Juli 2021,

Andreas Ostertag

Inhalt

Abkürzungen, Indizes und Formelzeichen	x
Kurzfassung	xvii
Abstract	xviii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Ziele der Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Nachhaltigkeit von Bauwerken	8
2.2 Entwicklungen im Bauwesen	9
2.3 Adaptive Tragwerke	12
2.3.1 Sonderforschungsbereich (SFB) 1244	15
2.3.2 Adaptiver Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244	16
2.3.3 Adaptive Tragwerke als adaptronische Systeme	18
2.3.4 Systemmodell und Regelkreis	19
2.3.5 Aktoren und Aktivierungsprinzipien	21
2.3.6 Sensoren und Messprinzipien	23
2.4 Der Eurocode	24
2.4.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	25
2.4.2 Einwirkungen auf Tragwerke	26
2.4.3 Differenzierung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Tragwerken	27
2.5 Grundlagen der Zuverlässigkeitsbetrachtung	29
2.5.1 Zuverlässigkeit in der Mechanik	30
2.5.2 Zuverlässigkeit adaptronischer Systeme.....	35
2.5.3 Zuverlässigkeitsprozess im Maschinenbau.....	36
2.5.4 Methoden der Analyse, Bewertung und Berechnung	37
2.6 Grundlagen der Sicherheitsbetrachtung.....	41
2.6.1 Funktionale Sicherheit nach EN 61508	43

3	Bemessung im Bauwesen und Auslegung im Maschinenbau	47
3.1	Forschungsfrage	48
3.2	Bemessung im Bauwesen nach Eurocode	49
3.2.1	Zuverlässigkeitsniveaus	52
3.2.2	Nutzungsdauer und Lastannahmen	54
3.2.3	Materialparameter und Ermüdungsbemessung	57
3.3	Auslegung adaptiver Tragwerke	61
3.3.1	Zuverlässigkeit adaptiver Tragwerke	63
3.3.2	Sicherheit adaptiver Tragwerke	64
3.3.3	Bestehende Konzepte zur Auslegung adaptiver Tragwerke	68
3.3.4	Konsequenz für die Auslegung adaptiver Tragwerke	70
3.3.5	Anforderungen an die Auslegung adaptiver Tragwerke	75
3.4	Zwischenfazit	76
4	Interdisziplinäre Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke	77
4.1	Iterativer Auslegungsprozess	78
4.2	Modellierung und Parametrisierung	80
4.2.1	Funktion, Topologie und Material	81
4.2.2	Tragstrukturmodell.....	82
4.2.3	Aktorplatzierung & Reglerentwurf	83
4.3	Simulation und Auswertung.....	85
4.3.1	Störgrößensimulation repräsentativer Lastkollektive	86
4.3.2	(Dauer-)Festigkeits- & Steifigkeitsgrenzen.....	89
4.3.3	Operativer Energiebedarf	91
4.4	Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit	92
4.4.1	Zuverlässigkeitsnachweis.....	94
4.4.2	Sicherheitsnachweis	101
4.4.3	Life-Cycle Assessment zur Nachhaltigkeitsbewertung	106
4.5	Fail-Safe und weitere Prinzipien	107
4.6	Zwischenfazit	110
5	Anwendungsbeispiel eines adaptiven Tragwerks.....	113
5.1	Modellierung des Hochhaus-Demonstrators	113

5.2	Störgrößensimulation des Hochhaus-Demonstrators.....	120
5.3	Ergebnisse der Störgrößensimulation.....	122
5.4	Ausfallanalyse des Hochhaus-Demonstrators	126
5.4.1	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	129
5.4.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	136
5.5	Nachhaltigkeitsbilanz des Hochhaus-Demonstrators	140
5.5.1	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	141
5.5.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	143
5.6	Bewertung der interdisziplinären Auslegungsmethode	145
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
7	Literatur	151
8	Anhang.....	167

Abkürzungen, Indizes und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
1001	Hardwarearchitektur ohne Redundanz und Fehlertoleranz (engl.: 1 out of 1)
100X	Hardwarearchitektur mit X-1-facher Redundanz
ATMD	Aktiver Massedämpfer (engl.: Active Tuned Mass-Damper)
BBD	Bauteilblockdiagramm
(C)	Risikoparameter der Auswirkung (engl.: Consequence)
CC	Schadensfolgeklasse des Eurocode
DC	Diagnosedeckungsgrad (engl.: Diagnostic Coverage)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
E	Einwirkung
E/E/PE	Elektrisch/elektronisch/programmierbar elektronisch
EC	Eurocode
(F)	Risikoparameter der Häufigkeit und Aufenthaltsdauer (engl.: Frequency and Exposure)
FBA	Fehlerbaumanalyse
FIT	Failure in Time (Ausfälle je 10^9 h)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FORM	Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung (engl.: First Order Reliability Method)
FuS	Funktionsstruktur
G	Grenzzustand
GWP	Treibhauspotential (engl.: Global Warming Potential)
GZS	Grenzzustand
HFT	Hardwarefehlertoleranz
IEC	International Electrotechnical Commission
IMU	Inertiale Messeinheit (engl.: Inertial Measurement Unit)
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl.: Life-Cycle Assessment)
LQR	Linear-quadratischer-Regler
M1...4	Tragwerksmodul 1/2/3/4
(P)	Risikoparameter der Vermeidungsmöglichkeit (engl.: Prevention)
PFD	Ausfallwahrscheinlichkeit bei niedriger Anforderungsrate (engl.: Probability of Failure on Demand)

Abkürzung	Bedeutung
QM	Qualitätsmaßnahmen
R	Widerstand (engl.: Resistance)
RC	Zuverlässigkeitsklasse des Eurocode (Verknüpft mit CC)
SFB	Sonderforschungsbereich
SIL	Sicherheitsintegritätslevel (engl.: Safety Integrity Level)
SORM	Zuverlässigkeitsmethode zweiter Ordnung (engl.: Second Order Reliability Method)
(W)	Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses (engl.: Unwanted Event)
WL	Windlasten
ZBD	Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Index	Bedeutung
<i>A</i>	Amplitude
<i>B</i>	Biegung
<i>BS</i>	Baustahl
<i>D</i>	Dauerfestigkeit
<i>DMS</i>	Dehnmessstreifen
<i>E</i>	Einwirkung
<i>Fat</i>	Ermüdung (engl.: Fatigue)
<i>G</i>	Grenzzustand
<i>GT</i>	Gebrauchstauglichkeit
<i>Jahr</i>	Bezogen auf ein Jahr / jährlich
<i>Koll</i>	Kollektiv
<i>L</i>	Luft
<i>N</i>	Normal
<i>Öl</i>	Hydraulik-Öl
<i>R</i>	Widerstand (engl.: Resistance)
<i>S</i>	Schrauben
<i>SP</i>	Ersatzteile (engl.: Spare Parts)
<i>SR</i>	Schraubenreihe
<i>SW</i>	Stockwerk
<i>Sys</i>	System
<i>TS</i>	Tragsicherheit
<i>TW</i>	Tragwerk
<i>V</i>	Vergleich

Index	Bedeutung
<i>a</i>	Aktiv
<i>b</i>	Balken
<i>c</i>	Stütze
<i>akt</i>	Aktoren
<i>d</i>	Diagonal(e)
<i>dyn</i>	Dynamisch
<i>h</i>	Horizontal
<i>i, j, k, m</i>	Zählvariablen
<i>m</i>	Mittel
<i>krit</i>	Kritisch
<i>lru</i>	Lastrichtungsunabhängig
<i>max</i>	Maximal
<i>min</i>	Minimal / Mindest-
<i>neu</i>	Neu / angepasst / aktualisiert
<i>opt</i>	Optisches Messsystem
<i>p</i>	Passiv
<i>reg</i>	Regelung
<i>sens</i>	Sensoren
<i>sim</i>	Simulation
<i>sym</i>	Symmetrisch
<i>tot</i>	Total
<i>v</i>	Vertikal
<i>vsym</i>	Vollsymmetrisch
<i>zul</i>	Zulässig

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
A	Querschnittsfläche
A_1	Systemmatrix der primären Modalkoordinaten
B	Breite
B_1	Eingangsmatrix der primären Modalkoordinaten
D	Dämpfungsmatrix
E	Elastizitätsmodul
E_d	Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen (Effect)
E_d	Bemessungswert der Auswirkung
$E(t)$	Regelenergie
F_A	Axialkraft
F_F	Fassadenlast
F_N	Normalkraft
F_{NL}	Nutzlast (ohne Windlast)
F_Q	Querkraft
F_W	Windlast
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit
G	Grenzzustandsfunktion
G^{WP}	Treibhauspotential (engl.: Global Warming Potential, GWP)
H	Höhe
H_f	Auftretenshäufigkeit der Windlast
I_y	Flächenträgheitsmoment
K	Steifigkeitsmatrix
L	Länge
M	Massenmatrix
M_B	Biegemoment
M_e	Mittelspannungsempfindlichkeit
MRT	Mittlere Reparaturdauer (engl.: Mean Repair Time)
$MTTR$	Mittlere Zeitdauer bis zur Wiederherstellung nach einem Ausfall (engl.: Mean Time To Repair)
N	Zyklenzahl, Schwingenspielzahl
N_{sim}	Gesamtzahl der Simulationen
$P_{\bar{0}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit, entspricht der Zuverlässigkeit
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit / Ausfallwahrscheinlichkeit
$P(X)$	Wahrscheinlichkeit des Ereignisses X

Symbol	Bedeutung
R	Mittelspannungsverhältnis
R_d	Bemessungswert des Widerstands (Resistance)
R_e	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
$R(t)$	Zuverlässigkeit
S	Schädigung
S_w	Kaimal Spektrum
SFF	Anteil sicherer Fehler (engl.: Safe Failure Fraction)
T	Lageparameter der Verteilungsfunktion
T_I	Intervall der Wiederholungsprüfung der Sicherheitsfunktion
T_L	Lebensdauer
T_N	Nutzungsdauer
Z	Platzierungsmatrix
a	Profilexponent nach Hellmann
a_M	Konstante zur Bewertung der Mittelspannungsempfindlichkeit
a_s	Kopfpunktbeschleunigung des Tragwerks
b	Formparameter
b_f	Additiver Fehlerterm
b_M	Konstante zur Bewertung der Mittelspannungsempfindlichkeit
b_v	Einwirkung der Störgrößen im Zustandsraum
c	Koeffizient (Fourier, Biegelinie)
c_x	Innenmaß des Hohlprofils
d_v	Auswirkung der Störgrößen im Zustandsraum
e	Anzahl Elemente im Tragwerk
e_{SP}	Ersatzteilbedarf
f	Fehler
f_S	Simulationsschrittweite
$f(t)$	Dichtefunktion
$f^*(t)$	Empirische Dichtefunktion
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
k	Wöhler-Exponent
l	Länge
m	Masse
n	Gesamtzahl, Anzahl
p	Druck

Symbol	Bedeutung
$q_{b,0}$	Basisgeschwindigkeitsdruck
$q(t)$	Knotenverschiebung
s	Hubweg
t	Zeit
t_{CE}	Mittlere Ausfalldauer eines Kanals der Sicherheitsarchitektur
t_{GE}	Mittlere Ausfalldauer des Subsystems der Sicherheitsarchitektur
t_R	Reparaturzeit
t_w	Wandstärke, Erzeugnisdicke
u	Stellgröße
$v_{b,0}$	Charakteristischer Wert der Basiswindgeschwindigkeit
v_b	Basiswindgeschwindigkeit
v_m	Mittlere Windgeschwindigkeit
v_p	Böengeschwindigkeit
v_w	Windgeschwindigkeit
v_*	Variationskoeffizient
x	Abstandsmaß
x_s	Kopfpunktverschiebung des Tragwerks
x_f	Gewünschter Zielzustand
z	Höhe am Tragwerk
$z(t)$	Störgröße
Ω	Diagonalmatrix der Eigenfrequenzen
Φ	Matrix der Eigenvektoren
ϕ	Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
α_w	Anströmwinkel des Windes bzw. Windrichtung
β	Zuverlässigkeitsindex
β_1	Bezugswert des Zuverlässigkeitsindex für ein Jahr
β_A	Faktor der Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache für gefahrbringende, nicht erkennbare Fehler
$\beta_{A,D}$	Faktor der Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache für gefahrbringende, erkennbare Fehler
δ	Logarithmisches Dämpfungsdekrement
η	Vektor der Modalkoordinaten
κ	Anzahl der Akteurplatzierungen
$\lambda_A(t)$	Ausfallrate, zeitabhängig
$\lambda_{A,D}$	Ausfallrate aller gefährlichen Ausfälle
$\lambda_{A,DD}$	Ausfallrate aller gefahrbringenden, entdeckbaren Ausfälle

Symbol **Bedeutung**

$\lambda_{A,DU}$	Ausfallrate aller gefahrbringenden, nicht entdeckbaren Ausfälle
$\lambda_{A,S}$	Ausfallrate der sicheren Ausfälle
$\lambda_{A,SD}$	Ausfallrate der sicheren, entdeckbaren Ausfälle
$\lambda_{A,SU}$	Ausfallrate der sicheren, nicht entdeckbaren Ausfälle
λ_R	Reparaturrate
μ	Mittelwert
ν	Vektor der Störgrößen
ν_q	Querkontraktionszahl
σ_S	Standardabweichung
$\sigma_{S,c}$	Standardabweichung des Kaimal Spektrums
ρ	Dichte
σ	Spannung
τ	Schubspannung
ω	Frequenz

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine Auslegungsmethode für adaptive Tragwerke unter dynamischen Lasten vorgestellt, die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit differenziert untersucht, bewertet und sicherstellt und darüber hinaus eine ganzheitliche, optimale Auslegung im Sinne der Nachhaltigkeit erzielt.

Die seither durch Überdimensionierung der Tragstruktur erreichte zuverlässige Auslegung, die ein Sicherheitsniveau garantiert, setzt sich für adaptive Tragwerke aus der Absicherung der Adaptionfunktion sowie der Tragstruktur zusammen. Die mit adaptiven Tragwerken einhergehenden mechatronischen Komponenten stellen potentielle Fehlerquellen dar, für welche ein Zuverlässigkeits- und Sicherheitsnachweis erforderlich ist. Die Abhängigkeit der Adaptionfunktion von der Bemessung der Tragstruktur sowie die hohe Interdisziplinarität des Forschungsfelds erfordern einen ganzheitlichen Ansatz.

Die ausgearbeitete, interdisziplinäre Auslegungsmethode berücksichtigt die aktive Kompensation von dynamischen Lasten unter Einbezug von Methoden und Modellen des Bauingenieurwesens, der Regelungstechnik und des Maschinenbaus. Im Gegensatz zu den bisher genutzten statischen Ersatzlasten wird ein auf örtlichen Windlasten basierendes Lastkollektiv bestehend aus Last-Zeit-Verläufen zur Lebensdaueranalyse der Tragstruktur und Ermittlung des Energiebedarfs der Aktoren genutzt. Die Bewertung dynamischer Einflüsse erfolgt mittels der Simulation eines linear-elastischen Tragwerksmodells auf Basis der Bewegungsgleichung mit Berücksichtigung der Massen und Steifigkeiten aus einer FE-Analyse. Aus der Simulation werden die Ermüdungsfestigkeit und Betriebsenergie bestimmt. Das Simulationsmodell dient zudem der Untersuchung von Fehlern und Ausfällen der Adaptionfunktion als Grundlage der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse. Abhängig vom Grenzzustand ist eine differenzierte Auslegung anhand von Zuverlässigkeitsmethoden bzw. der Sicherheitsnorm EN 61508 für funktionale Sicherheit vorgesehen. Abschließend ergibt sich die Nachhaltigkeit aus den Auslegungsgrößen Material-, Energie- und Ersatzteilbedarf sowie der möglichen Nutzungsdauer.

Neben dem Vergleich von Varianten wird das Potential einer adaptiven gegenüber einer passiven Ausführung des Tragwerks auf Grundlage des Einsparpotentials an Treibhausgasen ermittelt. Die Anwendung wird in einem Anwendungsbeispiel validiert und ein Einsparpotential an Treibhausgasen von über 50 % identifiziert.

Abstract

Reliability, safety and sustainability of adaptive load-bearing structures

Adaptive load-bearing structures are a promising way to reduce the consumption of building materials and the resulting environmental impact. Until now, conventional Eurocode structural design practice has involved designing the strength and deformability of the structure for the most critical, rarely occurring load cases, the serviceability or ultimate limit states. In general, the load is much lower than the design load, which is why these structures are oversized for most of their service life. In case of high-rise structures examined in this thesis, the exponential increase in required material for adequate stiffness with height is added. Adaptive load-bearing structures allow the active manipulation of internal forces in order to achieve stress homogenization or damping of external loads from wind or earthquake. The Eurocode standard describes the design of conventional load-bearing structures, which do not include the mechatronic components of adaptive load-bearing structures, such as actuators, control and sensors, that are integrated for the manipulation of forces. Existing investigations on the design of adaptive structures are so far mainly limited to static analyses and the overall controllability. A reliability and safety-compatible design of adaptive structures, especially in the context of sustainability, has been neglected up to now.

In this thesis the development of a method for the design of adaptive structures to ensure reliability, safety and sustainability was the main focus. In contrast to the static analyses, the method considers the active compensation of wind loads in a dynamic investigation. A load spectrum based on local wind loads was created to analyze the fatigue life of the load-bearing structure and to determine the energy consumption of the actuation. The disturbance simulation is performed by a linear-elastic model on basis of the equation of motion with a preceding modal analysis for parametrization. Furthermore, the simulation of failure cases for failure analysis of the adaptation function is carried out as a basis for reliability and safety analyses.

The Eurocode differentiates the design into serviceability and ultimate limit states and defines reliability levels to ensure safety. The method provides a separate safety and reliability analysis depending on the limit state, using reliability methods of mechanical engineering and including the safety standard IEC 61508 for functional safety. This determines the system architecture for the adaptation function and the required spare parts. Finally, the environmental impact of the adaptive load-bearing structure

is calculated according to construction material, energy consumption, spare parts and service life. In addition to the comparison of the adaptive variants with different numbers of actuators and masses, the effectiveness is determined on the basis of the potential for greenhouse gas savings compared to a passive design. Finally, measures often referred to as fail-safe were critically discussed.

The example of a high-rise demonstrator explicates the relation between reliability, safety and sustainability of adaptive structures and serves as proof of the applicability of the presented, interdisciplinary method. The actuation of critical loads leads to an extended fatigue life due to local stiffening and weight reduction. This allows an increase of the service life and thus an improvement of the environmental impact. The number of actuators has a negligible effect on the attainable lifetime gain. The placement of the actuators within the support structure and the time of actuation have a greater influence. The reliability and safety-compatible design depends on the limit state conditions. For the serviceability, the design complies with the specifications of the Eurocode, while for the ultimate limit state the safety integrity is ensured, considering the IEC 61508 for functional safety. In this example, an enormous reduction of the environmental impact for adaptive load-bearing structures has been observed in design for serviceability limit states. The greenhouse gas savings potential is more than 50 %, whereby a greater reduction can be achieved by using renewable energy sources.

1 Einleitung

Eine wachsende Weltbevölkerung [1] und die damit einhergehende Nachfrage nach Wohnraum führen zu einer zusehends erkennbaren Erschöpfung der natürlichen Rohstoffvorkommen [2]. Eine fortschreitende Urbanisierung [3] bedarf zeitgleich einer hohen Wohnraumdichte bei begrenzter Grundfläche, welche durch Hochbau mittels Tragwerken erzielt wird. Der hohe Ressourcenbedarf von konventionellen Tragwerken, resultierend aus den Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit, lässt sich mit einem wachsenden Gedanken an Nachhaltigkeit, der in diesem Sinne die Umweltwirkung von Bauwerken bezeichnet, nicht vereinen. Als ressourcenintensivster Wirtschaftszweig weltweit [4] sind im Bauwesen Innovationen und die Weiterentwicklung der Tragwerksauslegung unerlässlich, nicht zuletzt um die Erderwärmung zu beschränken und darauf begründete Vorgaben zur Begrenzung von Emissionen [5] einzuhalten. Bereits existierende Leichtbautragwerke sind ein Kompromiss aus einer Optimierung auf mehrere formbestimmende Lastfälle und beinhalten weiterhin Potential zur Masseneinsparung [6].

Durch Aktivierung der lasttragenden Struktur ist eine Anpassung an den jeweiligen Lastfall und somit eine effizientere Ausnutzung der Struktur möglich [6]. Die Masseneinsparung bei sogenannten adaptiven Tragwerken lässt sich durch den Einsatz von Energie, welche für die Aktivierung benötigt wird, erzielen. Die Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen führt zunehmend zu einer Reduktion der Emissionen und einem Energieüberschuss [7]. Der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Sonderforschungsbereich (SFB) 1244, in dessen Kontext die vorliegende Arbeit entstanden ist, erforscht das Thema „adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“. Die Aktivierung von Hochhaustragwerken und deren Fassadenelementen ist dabei Gegenstand der ersten Phase der Forschung.

Die Aktivierung von Tragwerken erfordert die Integration von Aktoren in die Tragstruktur. Zudem werden Sensoren und Regelungselektronik sowie Software benötigt. Dies ist in den einschlägigen Normen des Bauwesens nicht vorgesehen und bedarf weiterer Untersuchungen. Durch die Strukturintegration und -manipulation stellen diese Komponenten potentielle Fehlerquellen dar, die Grund für Ausfälle mit fatalen Folgen wie Tragwerksversagen sein können. Die Funktionsfähigkeit muss durch eine ausreichende Zuverlässigkeit und Sicherheit gewährleistet sein und dem Aspekt der Nachhaltigkeit gerecht werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Fragestellung der Auslegung adaptiver Tragwerke unter diesen Gesichtspunkten untersucht.

1.1 Ausgangssituation

Die Grundlagen der Auslegung von Tragwerken sind in den Normen des Bauwesens wie der DIN EN 1990 - Eurocode 0 [8] standardisiert und richten sich nach den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Die Tragfähigkeit eines Tragwerks beschreibt den Widerstand gegenüber allen auftretenden Einwirkungen. Die Gebrauchstauglichkeit beschränkt die zulässigen Verformungen. Ein Verlust der Lagesicherheit sowie zeitabhängige Auswirkungen in Form von Materialermüdung müssen berücksichtigt werden. Die Auslegung lässt sich auf eines der drei folgenden Grundprobleme zurückführen:

- festigkeitsdominiert (Tragfähigkeit)
- steifigkeitsdominiert (Gebrauchstauglichkeit)
- dauerfestigkeitsdominiert (Tragfähigkeit)

Der Entwurf eines Tragwerks, im Bauwesen als Formfindung bezeichnet, ist nach Sobek [6] ein Prozess mit dem Ziel der Entwicklung einer für den dominierenden und damit formbestimmenden Lastfall optimal erscheinenden Geometrie. Die Auslegung nach Eurocode auf Grenzzustände sieht Lastannahmen vor, die zu einer statischen Ersatzlast als formbestimmenden Lastfall kombiniert werden. Da diese Lasten jedoch sehr selten auftreten, ist das Tragwerk für einen Großteil der geplanten Nutzungszeit überdimensioniert und die Lebensdauer übersteigt die Nutzungsdauer deutlich. Leichtbaustrukturen mit geringeren Querschnitten und damit einer Masseneinsparung weisen eine stärkere Anfälligkeit gegenüber äußeren Lasten bzw. Lastkombinationen auf. Der formbestimmende Lastfall ist nicht mehr an einem repräsentativen Belastungsszenario festzumachen und stellt eine Optimierung für mehrere Lastfälle dar. Die resultierende Überdimensionierung ist in Anbetracht von Ressourcenschonung und Emissionsminderung nicht nachhaltig und bietet weiterhin Potential für Masseneinsparungen. Dieses Potential soll durch den Einsatz adaptiver Tragwerke erschlossen werden. Aufgrund der erzielbaren Masseneinsparungen bezeichnet Sobek [6] diese Art von Tragwerken erstmals als sogenannte „Ultraleichtbautragwerke“. Das Tragwerk wird durch Adaption aktiv an wechselnde Umgebungsbedingungen angepasst, wodurch sich Spannungen und Verformungen beeinflussen und die Materialausnutzung optimieren lassen. Die Anfälligkeit gegenüber äußeren Lasten ergibt sich aus der Kombination der Steifigkeit der Tragwerksquerschnitte und der Versteifung durch Aktoren. Schmalere Querschnitte führen zu einer höheren Anfälligkeit, da bei abnehmendem Querschnitt Festigkeit und Steifigkeit der Struktur abnehmen, der Einfluss der Aktoren steigt hingegen.

Die Auslegung von Tragwerken innerhalb des Eurocode erfolgt nach dem Teilsicherheitskonzept, indem Teilsicherheitsfaktoren mit den standardisierten Belastungen verrechnet und Lastkombinationen gebildet werden. Eine zuverlässige Auslegung wird durch einen ausreichenden Widerstand der Tragstruktur gegenüber auftretenden Lasten während der Nutzungszeit erreicht. Durch die Teilsicherheitsfaktoren werden Streuungen bei Belastung und Belastbarkeit berücksichtigt. Hieraus ergibt sich eine Auslegungssicherheit. Tragwerke als lasttragende Struktur von Gebäuden, die gebaut werden um das Sicherheitsbedürfnis jedes Einzelnen zu befriedigen, erfordern für adaptive Tragwerke die gleiche, hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit wie für herkömmliche passive Tragwerke. Aus Zuverlässigkeitssicht ist die Funktion des Schutzes der Bewohner oder der Inhalte vor widrigen Umweltbedingungen für die geplante Nutzungszeit mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erfüllen.

Standardisierte Auslegungsmethoden des Bauwesens, wie die Auslegung nach Eurocode, sind auf herkömmliche passive Tragwerke beschränkt und berücksichtigen nicht die Komponenten adaptiver Tragwerke. Ausfälle von Aktoren, Sensoren und Regelung als Komponenten eines adaptiven Tragwerks erfordern eine über den Eurocode hinausgehende Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbetrachtung und können nicht durch einen Sicherheitsaufschlag implizit zuverlässig abgesichert werden. Ausfallmechanismen wie z. B. Alterung durch Umwelteinflüsse lassen sich dadurch nicht vermeiden, genauso wie sich ein fehlerfreies Zusammenwirken der Komponenten damit nicht absichern lässt. Darüber hinaus ist eine Überdimensionierung nicht im Sinne einer nachhaltigeren Bauweise, wie sie durch den Einsatz adaptiver Tragwerke angestrebt wird. Hinzu kommen die enormen im Bauwesen üblichen Nutzungsdauern der Tragstrukturen, welche die Berücksichtigung von Wartung und Reparatur der Komponenten der Adaption erfordern. Deren Lebensdauern erreichen in der Regel nicht die Nutzungsdauer der Tragstruktur, weshalb Ausfallanalysen notwendig sind. Auf der anderen Seite bedarf es einer systematischen Absicherung der Funktionalität, die sich aus dem fehlerfreien Zusammenwirken der Komponenten ergibt. Um eine Überdimensionierung zu vermeiden, werden im Maschinenbau z. B. von Bertsche [9] beschriebene Zuverlässigkeitstests durchgeführt, die eine Wahrscheinlichkeit für das funktionstüchtige Überleben der geplanten Nutzungsdauer des Produkts nachweisen. Je mehr Tests, desto genauer kann die Ausfallverteilung geschätzt und umso besser die Überlebenswahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Da Gebäude häufig mit Stückzahl eins gebaut werden, einem enormen Ressourcenbedarf unterliegen und lange Lebensdauern lange Testzeiten verheißen, ist dieses Vorgehen im Bauwesen zur Systemabsicherung ungeeignet. Genauere Aussagen erfordern Simulationen, denen repräsentative Lastannahmen als Grundlage guter Prognosen zugrunde liegen.

1.2 Ziele der Arbeit

Die höhere Schwingungsanfälligkeit von Leichtbau- bzw. Ultraleichtbautragwerken, insbesondere wenn sich das adaptive Tragwerk bei geringeren Lasten rein passiv verhält, erfordert im Gegensatz zur Grenzzustandsbetrachtung mittels statischer Ersatzlasten nach Eurocode eine Berücksichtigung von dynamischen Lasten. Dynamische Lasten können Wind oder Erdbebenlasten sein, die sich durch eine bedeutende Anregung des Tragwerks auszeichnen. In der Auslegung adaptiver Tragwerke besteht die Schwierigkeit der Dimensionierung des Tragwerks im Zusammenwirken mit der Aktorik. Eine schlankere Dimensionierung der Querschnitte erfordert geringere Kräfte und das Eigengewicht sinkt, andererseits reduziert sich die Steifigkeit, wodurch die Anfälligkeit gegenüber äußeren Lasten steigt sowie der Energiebedarf der Aktoren zunimmt. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist daher die

- Berücksichtigung repräsentativer Lasten in Form von dynamisch wirkenden Lastkollektiven zur lebensdauergerichten Auslegung.

Aktoren, Sensoren und Regelung erweitern darüber hinaus die Ausfallursachen adaptiver Tragwerke im Vergleich zu herkömmlichen passiven Tragwerken. Wie in Bild 1.1 dargestellt, sind neben den Strukturfehlern Aktor-, Sensor-, Regelungs- und Softwarefehler möglich. Die Zuverlässigkeitsbetrachtung dieser Ausfallarten ist für den Nachweis erforderlich und innerhalb des Eurocodes nicht gegeben.

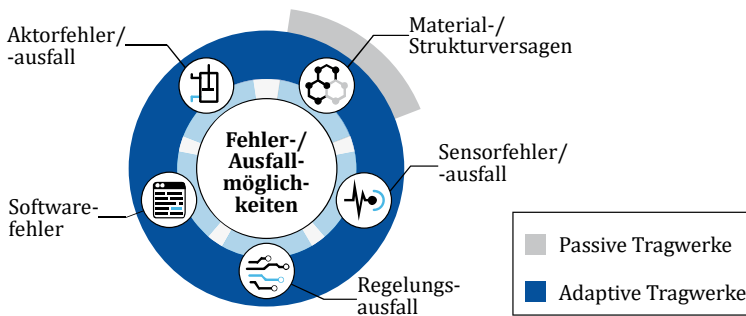


Bild 1.1: Fehlermöglichkeiten herkömmlicher passiver und neuartiger adaptiver Tragwerke

Neben dem möglichen Versagen von Komponenten die zu Ausfällen in der Adaption führen und dadurch eine Unzuverlässigkeit erzeugen, darf das adaptive Tragwerk selbst keine Gefährdung darstellen. Fehlfunktionen im Regelkreis dürfen sich nicht kritisch auswirken und für die Bewohner, Bediener oder das Wartungspersonal zur

Gefahr werden. Die normative Auslegung mittels Teilsicherheitsfaktoren nach Eurocode ist zur Absicherung der Komponenten der Adaption wie beschrieben nicht geeignet. Ein weiteres Ziel für darüberhinausgehende Nachweismethoden ist die

- Ermittlung von Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Sicherheit adaptiver Tragwerke zur differenzierten Betrachtung der Domänen.

Durch adaptive Tragwerke soll eine nachhaltigere Auslegung erreicht werden, indem Materialeinsparungen durch Aktivierung der Tragstruktur kompensiert werden. Die Auslegung muss für einen repräsentativen Vergleich eine Nachhaltigkeitsbilanz beinhalten. Zusammenfassend ergibt sich als Hauptziel dieser Arbeit daher die

- Entwicklung einer Methode zur zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechten Auslegung adaptiver Tragwerke mit Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in Form der Umweltwirkung.

Die Ziele der Arbeit spiegeln sich in der folgenden Gliederung wieder und werden als Forschungsfrage und -hypothesen in Abschnitt 3.1 aufgegriffen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist in Bild 1.2 schematisch dargestellt und gibt einen Überblick der behandelten Inhalte. Kapitel 2 enthält die Aufarbeitung des Stands der Forschung und Technik zu adaptiven Strukturen und die Grundlagen zu den Kernthemen Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit. Eine Kategorisierung und Abgrenzung der Definitionen aufgrund der unterschiedlichen Begrifflichkeiten der Domänen ist neben den gegenwärtigen Normen zur Bemessung und Auslegung in diesem Kapitel erläutert.

In Kapitel 3 wird zunächst die in dieser Arbeit behandelte Forschungsfrage definiert. Motiviert von dem Ziel einer nachhaltigeren Bauweise folgt die Vorgehensweise zur Auslegung herkömmlicher Tragwerke. Die Anforderungen an die Grenzzustände werden aufgezeigt und Unzulänglichkeiten der Auslegung adaptiver Tragwerke diskutiert. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung bestehender Vorgehensweisen und deren Eignung zur Auslegung adaptiver Tragwerke. Abschließend werden die Erkenntnisse als qualitative Anforderungen an eine Methode zur zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechten Auslegung adaptiver Tragwerke im Kontext der Nachhaltigkeit zusammengefasst.

Das Vorgehen zur Auslegung adaptiver Tragwerke auf Grundlage der identifizierten Anforderungen zur Dimensionierung und den zu berücksichtigenden Kenngrößen ist in Kapitel 4 erläutert. Die Auslegungsmethode verknüpft die Vorgehensweisen und Normen der Zuverlässigkeit, funktionalen Sicherheit und Nachhaltigkeit. Darüber hinaus werden Prinzipien zum Umgang mit Ausfällen - wie Fail-Safe - diskutiert und deren Anwendung auf adaptive Tragwerke bewertet.

Abschließend wird in Kapitel 5 die Auslegungsmethode anhand eines Anwendungsbeispiels erprobt. Dabei handelt es sich um den prototypischen, adaptiven Hochhausdemonstrator des SFB 1244 an der Universität Stuttgart, der im Stand der Technik beschrieben ist. Das Potential adaptiver Tragwerke zur Nachhaltigkeitssteigerung sowie der Entwicklungsaufwand werden schließlich einem passiven Tragwerk gegenübergestellt.

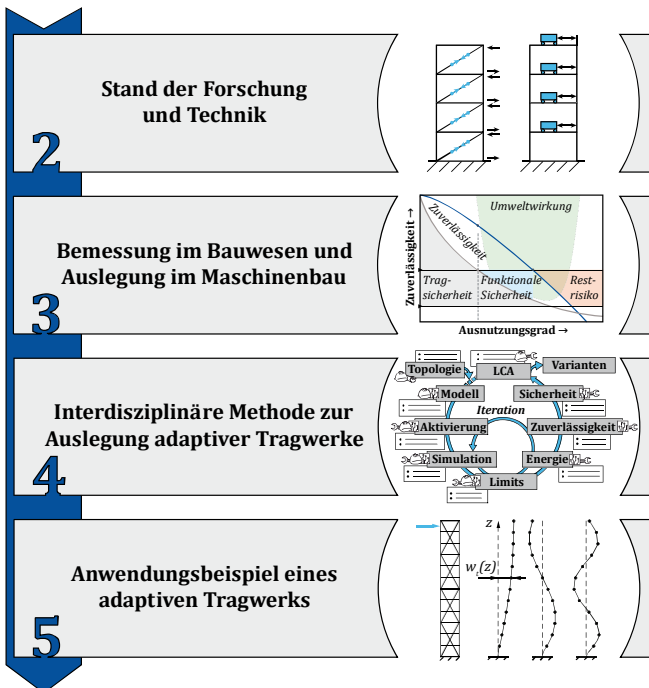


Bild 1.2: Kapitelübersicht der vorliegenden Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Nicht nur im Bauwesen gewinnt das Thema Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung [10–13]. Der Gedanke der Nachhaltigkeit beschreibt zumeist die Motivation der Anstrengungen bezüglich Ressourcenschonung und Emissionsminderung. Im heutigen Sprachgebrauch wird der Begriff vielfältig und häufig nicht in eindeutiger Definition verwendet, weshalb im folgenden Kapitel zunächst die Abgrenzung innerhalb der vorliegenden Arbeit erfolgt.

Abschnitt 2.2 gibt einen Überblick über die Entwicklungen im Bauwesen und die bestehenden Herausforderungen. Ausgehend hiervon wird im darauffolgenden Abschnitt in den Themenbereich adaptives Bauen eingeführt. Forschungsrelevante Vorarbeiten, Aufbau, Komponenten sowie Funktionsweise sind dort beschrieben. Als Auslegungsstandard von Tragwerken wird in Abschnitt 2.4 der Eurocode vorgestellt und seine Gliederung in die Normen EN 1990-EN1998 dargelegt. Anschließend ist in Abschnitt 2.5 die Zuverlässigkeitsanalyse zusammengefasst. Schlussendlich folgen die Grundlagen der Sicherheitsbetrachtung, die Definition der Sicherheit für passive und adaptive Bauwerke und die Festlegung des Forschungsrahmens der vorliegenden Arbeit.

Essentiell für die nachfolgende Betrachtung ist eine einheitliche Begriffsdefinition. Für diese Arbeit wird auf die Definitionen der EN 1990, Eurocode 0 [8] als Grundlagennorm der Tragwerksplanung zurückgegriffen. Der Begriff Bauwerk bezeichnet darin alles Bauliche und umfasst sowohl Gebäude als auch Ingenieurbauwerke. Gebäude werden zum Schutz ihrer Bewohner oder Inhalte errichtet, während Ingenieurbauwerke z. B. Brücken oder Tunnel bezeichnen. Ein Bauwerk besteht aus einem Tragwerk und einer Hülle. Das Tragwerk dient der Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit und Steifigkeit und setzt sich aus systematisch verbundenen Bauteilen zusammen. Die Art des Tragwerks beschreibt die Anordnung der Bauteile, während die Bauart die überwiegend verwendeten Baustoffe der tragenden Bauteile bezeichnet. Die auslegungsbestimmenden Größen eines Bauwerks sind nach Eurocode die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit, welche bisher wesentlich durch das Tragwerk bestimmt werden. Die Bemessung des Tragwerks erfolgt auf der Grundlage dieser Grenzzustände, indem die Bedingungen zur Erfüllung durch quantitative Aussagen beschrieben werden. Anschließend wird der Nachweis erbracht, dass innerhalb eines definierten Zeitabschnitts keine Überschreitung auftritt.

2.1 Nachhaltigkeit von Bauwerken

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ wird heute universell eingesetzt und häufig für Marketingzwecke in unbestimmter Definition genutzt. Nach Vieweg [12] existieren drei grundlegende Definitionen, von denen in der vorliegenden Arbeit die Nachhaltigkeit II mit den wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Aspekten verwendet wird. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgt auf der Grundlage einer Lebenszyklusanalyse (en: Life-Cycle Assessment, LCA). Die DIN EN 15978 [14] standardisiert die LCA für Bauwerke und ist nachfolgend zusammenfassend erläutert. Der Lebenszyklus eines Bauwerks besteht danach aus den folgenden Phasen:

- Planung
- Errichtung
- Nutzung- und Betrieb
- Instandhaltung und Modernisierung
- Umnutzung / Weiternutzung
- Rückbau und Wiederverwendung
- Recycling

Die LCA sieht eine Bewertung jeder Phase unter ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Aspekten vor. In der ökonomischen Betrachtung steht bei Neubauten vornehmlich die Minimierung der Lebenszykluskosten im Vordergrund. Bei Bestandsgebäuden ist es die Reduktion von Umbau- und Erhaltungskosten. Generell wird die Optimierung der Aufwendungen für Infrastruktur angestrebt.

Der wohl am häufigsten mit dem Begriff der Nachhaltigkeit verbundene und auch in dieser Arbeit vornehmlich unter dem Begriff verstandene ökologische Aspekt beinhaltet den schonenden Umgang mit begrenzten Ressourcen und die Senkung der Umweltbelastung aufgrund von Emissionen. Um die Umweltwirkung möglichst gering zu halten, sind außerdem Ziele wie die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme, die Vermeidung weiterer Zersiedelung der Landschaft und die Begrenzung der Bodenversiegelung definiert. Die soziokulturellen Aspekte der Nachhaltigkeit erfassen die Sicherung bedarfsgerechten, gesunden Wohnraums, die Schaffung einer Siedlungsstruktur und die Gestaltung der gebauten Umwelt.

In der vorliegenden Arbeit werden mit dem Begriff „Nachhaltigkeit“ die ökologischen Aspekte verbunden, weshalb synonym der Begriff der „Umweltwirkung“ verwendet wird.

Eine Bewertung der umweltbezogenen Qualität eines Bauwerks erfolgt auf der Grundlage seiner Anforderungen an Funktion, Technik und Umwelt. Eine Systemgrenze definiert den Betrachtungsrahmen für Material- und Energieflüsse. Das Aufrechnen in Form des Treibhauspotentials (engl.: Global Warming Potential, GWP) ermöglicht eine Bilanzierung. Das Treibhauspotential beschreibt die Menge an Emissionen, die über den gesamten Lebenszyklus freigesetzt werden und wird in kg CO₂-Äquivalent pro Jahr angegeben. Zur Berechnung werden alle verwendeten Materialien hinsichtlich Herstellung, Verbrauch und Wiederverwendbarkeit bewertet. Die Gesamtbilanz aller auftretende Ströme, bezogen auf die Lebensdauer des Bauwerks, ergibt das Treibhauspotential als Vergleichswert zur Bewertung der Umweltwirkung. Der Bezugszeitraum hat einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltwirkung eines Gebäudes und hängt vom jeweiligen Gebäudetyp ab. In Form der vorgesehenen Nutzungsdauer kann der Bezugszeitraum den Eurocode-Normen des Bauwesens entnommen werden. Für die Bilanzierung der Baumaterialien wird auf Datenbanken wie die Ökobaudat [15] oder LCA-Software [16] zurückgegriffen. Dort sind quantitative Werte für unterschiedliche Materialien und deren Umweltwirkung über den gesamten Lebenszyklus hinterlegt. Aspekte sind z. B. der Einsatz von Energie, auftretende Massenströme, der Anfall und die Trennung von Abfällen, die Wassernutzung, die Landnutzung oder die Emissionen in die Luft [14].

2.2 Entwicklungen im Bauwesen

Derzeit leben 7,8 Milliarden Menschen auf unserem Planeten und die Bevölkerungszahl nimmt mit einer Wachstumsrate von aktuell etwa 2,6 Menschen pro Sekunde weiter zu [1, 17]. Den Prognosen zufolge wird 2055 die Marke von 10 Milliarden Menschen überschritten sein. Aufgrund von sozialen Ungleichheiten gegenüber den Industrieländern streben weniger entwickelte Regionen einen ähnlich hohen Standard wie die Industrieländer an. Nach der Befriedigung physiologischer Grundbedürfnisse folgt das Bedürfnis nach Sicherheit, das sich im Wohnungs- und Häuserbau äußert. Auf der Suche nach einem sicheren und festen Arbeitsplatz wie er überwiegend in Großstädten geboten werden kann, steigt die Nachfrage nach Wohnraum in Städten, was eine zunehmende Urbanisierung mit sich bringt [3]. Das hat zur Folge, dass die Bevölkerungsdichte stark ansteigt und für Großstädte Konzepte benötigt werden, die Wohnraum für eine Vielzahl von Menschen bei geringem Flächen- und Ressourcenbedarf bieten.

Der Bauindustrie ist 2015 ein Anteil von 11 % des globalen CO₂-Ausstoßes zuzuschreiben [18]. Zunehmender Wohnungs- und Häuserbau treibt die Emissionen weiter in die Höhe und steigert den Abbau von Bau- und Industriemineralien, der 2010 44 % der Gesamtfördermenge an Rohstoffen weltweit entsprach [4] und sich bis 2060 verdoppelt [19]. In Deutschland liegt dieser Wert sogar bei 85 % [10]. Die aufgezeigten Gegebenheiten lassen sich, wie in Bild 2.1 dargestellt, als extrinsische und intrinsische Motivatoren des Bauwesens zusammenfassen.

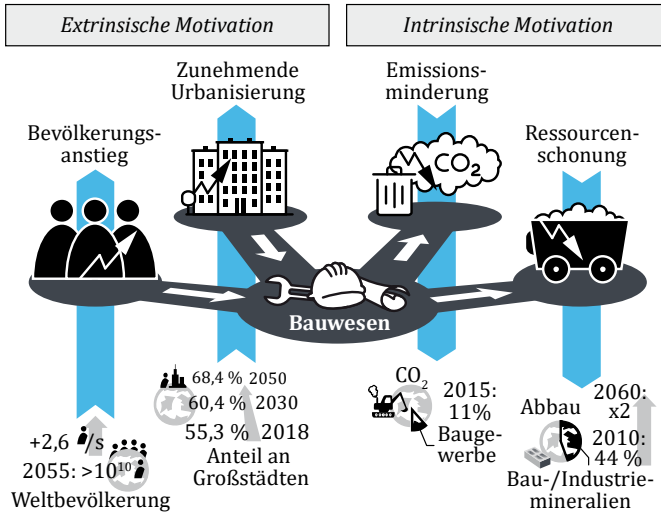


Bild 2.1: Extrinsische und intrinsische Motivatoren des Bauwesens [1, 3, 4, 17–19]

Die Schonung der Ressourcenvorkommen und die Senkung des CO₂-Ausstoßes bei der Herstellung von Baumaterial ist in einem größeren Umfang ohne Massenreduktion nicht möglich. Bereits heute steht Sand nach Wasser an zweiter Stelle der größten Materialflüsse weltweit [4] und der Abbau des wichtigen Baumaterials kennt keine Grenzen [2]. Um dem aufkommenden Bedarf an Wohnungen in dichtbesiedelten Städten bei möglichst geringem Materialeinsatz und CO₂-Ausstoß nachzukommen, muss der Hochbau weiterentwickelt und neue Methoden zur Materialeinsparung und zum Recycling gefunden werden.

Bereits in den 1960er Jahren wurde erkannt, dass mit steigender Anzahl an Stockwerken die Auslegung von Hochhaustragwerken zunehmend von Querkräften aufgrund äußerer Lasten bestimmt wird [20], Bild 2.2. Die Dimensionierung erfolgt steifigkeits- oder dauerfestigkeitsdominiert, da einerseits festgelegte Grenzen der

Gebrauchstauglichkeit nicht überschritten werden dürfen, andererseits die Beanspruchung durch Schwingenspiele nicht innerhalb der Nutzungsdauer zum Versagen führen darf. Wird die Struktur isoliert von Querkräften, wie z. B. durch Wind oder Erdbeben betrachtet, ergibt sich die untere Dimensionierungsgrenze aus der Festigkeit der verwendeten Materialien, da die verbleibende Gravitationskraft nicht durch eine strukturelle Manipulation reduziert oder dissipiert werden kann [21].

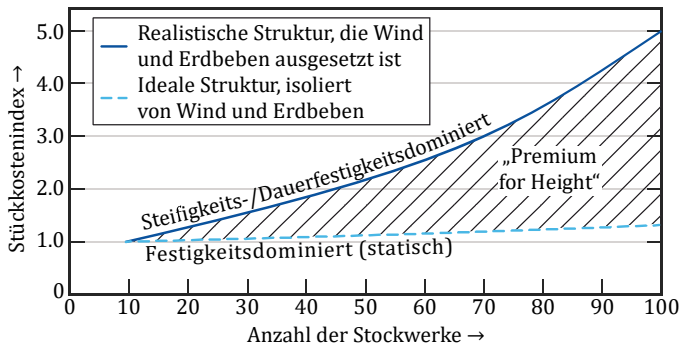


Bild 2.2: „Premium for Height“ bei Hochhaustragwerken, angelehnt an Khan [20, 22]

Während bisherige Vorgehensweisen den Ansatz verfolgten die Tragstruktur so zu entwerfen, dass der Höhenzuschlag „Premium for Height“ möglichst gering ausfällt, muss sich die Vorgehensweise aufgrund der aktuellen Entwicklungen zukünftig auf die Umweltwirkung der Tragstrukturen im Allgemeinen konzentrieren [21].

Die Verbesserung von Werkstoffeigenschaften bspw. bei höherfesten Stählen führte zu Materialersparnissen, die Leichtbaustrukturen mit immer geringeren Querschnitten ermöglichte. Da das Elastizitätsmodul trotz der höheren Festigkeit dabei nahezu konstant geblieben ist [22], überwiegt die mit ansteigender Höhe von Tragstrukturen zunehmend steifigkeits- bzw. dauerfestigkeitsdominierte Auslegung.

Im Gegensatz zur festigkeitsbedingten Tragfähigkeit sind die Auslegungsgrenzen definiert durch die maximale Verformung als Gebrauchstauglichkeitskriterium und die Materialermüdung. Die Schwingungsdämpfung spielt dabei eine wesentliche Rolle. Um Schwingungen zu dämpfen werden heute aktive wie passive Maßnahmen hauptsächlich zur Reduzierung der Anregung durch Windlasten eingesetzt. Passive Systeme sind nicht auf eine externe Energieversorgung angewiesen und besitzen feste Eigenschaften. In aktiven Systemen ist ein Aktor mit aktivem Regelmechanismus

enthalten, um Eigenschaften entsprechend der wechselnden Umgebungsbedingungen unter Energieeinsatz anzupassen [22].

Tragstrukturen mit der Möglichkeit der Erfassung von Lastzuständen durch Sensoren und der darauffolgenden, aktiven Anpassung mittels Aktoren, lassen ein adaptives Verhalten der Tragstruktur zu und werden daher als adaptive Tragwerke bezeichnet. Im Folgenden wird diese Art von Tragwerken genauer erläutert.

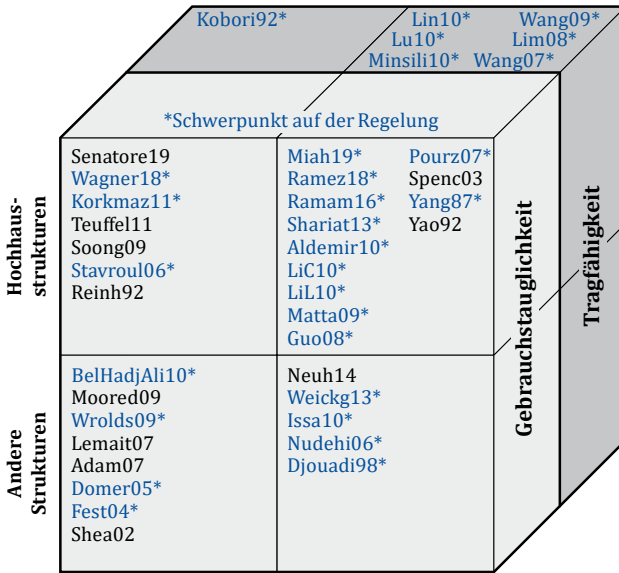
2.3 Adaptive Tragwerke

Die ersten Untersuchungen zu adaptiven Tragwerken reichen nach Soong [23] zurück bis in die 1960er Jahre, in denen Überlegungen zur Schwingungsdämpfung von hohen Tragwerken durch Regelung der Vorspannung von Spanngliedern angestellt wurden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Funktionsfähigkeit setzten sich in der Praxis vorerst jedoch überwiegend passive Systeme wie z. B. Massependel durch. Das Auskommen ohne externe Energieversorgung überwog den Nachteil der festgelegten Eigenschaften passiver Systeme, die keine nachträgliche Anpassung der Eigenschaften zulassen.

Um unvorhergesehene Lasten zu kompensieren sind passive Systeme ungeeignet und es bedarf weiterhin einer Überdimensionierung der Tragstruktur. Untersuchungen folgten, in denen alternative Aktivierungsprinzipien hinzukamen und in den 1990er Jahren setzten sich schließlich adaptive Systeme zur Schwingungsdämpfung, insbesondere in der erdbebenreichen Region Japan, in der Praxis durch [24]. In der Definition nach Connor [25] besitzen adaptive Systeme die Eigenschaft, den Systemzustand mittels Sensoren zu bestimmen und durch eine Anpassung über Aktoren eine Veränderung hin zu einem vorteilhafteren Zustand zu ermöglichen. Diese Veränderung erfolgt dabei in einer geregelten Form und innerhalb einer kurzen Zeitspanne.

In den darauffolgenden Jahren wurden auf dem Gebiet der adaptiven Tragwerke mehrere Forschungsarbeiten veröffentlicht. Ein Überblick angelehnt an die Arbeit von Korkmaz [26] ist in Bild 2.3 dargestellt. Einige Untersuchungen erfolgten im Bereich der „Tensegrity“-Strukturen [27–33]. Dabei handelt es sich um Leichtbaustrukturen die ein stabiles, selbst ausgeglichenes System, bestehend aus diskontinuierlichen, gestauchten Elementen innerhalb eines Kontinuums von unter Zug stehenden Elementen bilden [34]. Eine Aktivierung ist mit geringem Energieeinsatz möglich. Aufgrund ihrer Eigenschaften qualifizieren sie sich jedoch nicht für eine Verwendung als dauerhaft nutzbare Tragstruktur [31]. Daneben wurde die Aktivierung von

Hochhausstrukturen erforscht. Hier wurde gezeigt, dass die vornehmlich zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit eingesetzten adaptiven Tragwerke die lateralen, dynamischen Lasten wie Wind oder Erdbeben aktiv dämpfen und eine Ausregelung der Struktur ermöglichen [24, 26, 35–47].



Aktive Strukturelemente **Andere Aktuierungsprinzipien**

Adam07	[30]	Lemait07	[48]	Neuh14	[49]	Spenc03	[24]
Aldemir10*	[40]	LiC10*	[41]	Nudehi06*	[50]	Stavroul06*	[38]
BelHadjAli10*	[27]	LiL10*	[42]	Purz07*	[44]	Teuffel11	[39]
Djouadi98*	[51]	Lim08*	[52]	Ramam16*	[45]	Wagner18*	[53]
Domer05*	[33]	Lin10*	[54]	Ramez18*	[46]	Wang09*	[55]
Fest04*	[31]	Lu10*	[56]	Reinh92	[35]	Wang07*	[57]
Guo08*	[58]	Matta09*	[43]	Senatore19	[36]	Weickg13*	[59]
Issa10*	[60]	Miah19*	[61]	Shariat13*	[62]	Wrolds09*	[29]
Kobori92*	[63]	Minsili10*	[64]	Shea02	[32]	Yang87*	[47]
Korkmaz11*	[65]	Moored09	[28]	Soong09	[37]	Yao92	[66]

*Schwerpunkt auf der Regelung

Bild 2.3: Veröffentlichungen zur aktiven Strukturmanipulation, angelehnt an [26]

Einige Arbeiten legen ihren Untersuchungen außergewöhnliche Lastfälle wie das häufig als Referenzlastfall verwendete El Centro Erdbeben in Kalifornien im Jahr 1940 zugrunde [52, 54–57, 63, 64]. Aufgrund der Extremität des Lastfalls wurden diese Arbeiten in Bild 2.3 dem Grenzzustand der Tragfähigkeit zugeordnet. Streng genommen ist auch hier die Schwingungsdämpfung als Gebrauchstauglichkeitskriterium maßgebend. Der Einsatz adaptiver Tragwerke für festigkeits- und damit tragfähigkeitsrelevante Anwendungen wurde aufgrund der hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit [26] wenig beforscht. Innerhalb der zitierten Publikationen wird auf diese Problematik nicht eingegangen, sondern lediglich die grundsätzliche Eignung meist zur Schwingungsdämpfung untersucht.

Insgesamt konzentriert sich der überwiegende Teil der Arbeiten auf die Forschung im Bereich der Regelungstechnik und hierbei auf den optimalen Entwurf des Reglers im Sinne der Funktionserfüllung. Sobek [67] erkannte als erster das Potential für den Einsatz von Aktoren in den durch Aktivierung realisierbaren Ultraleichtbautragwerken zur Materialeinsparung [6, 68, 69]. Der optimalen Auslegung und dem Entwurf adaptiver Tragwerke kommt damit mehr Aufmerksamkeit zu, um eine Verringerung des Ressourcenbedarfs und der Umweltwirkung von Bauwerken zu erzielen und den in Abschnitt 2.2 aufgezeigten Herausforderungen im Bauwesen zu begegnen.

Bereits in den 1990er Jahren beschäftigte sich Cha [70] mit dem Optimierungsproblem der Auslegung von Aktorik und Tragstruktur aktiver Strukturen unter einer beweglichen Last. Während seine Vorgehensweise numerisch war, verfolgte Teuffel [71] mittels des von ihm entwickelten Lastpfadmanagements eine Optimierung durch quasi-statische Lastannahmen. Gegenüber einer passiven Optimierung, die anhand der auftretenden Belastung erfolgt, wird hierbei der Kraftpfad optimiert und daraufhin die Auslegung des Tragwerks so vorgenommen, dass der gewünschte Kraftzustand eintritt. Das Lastpfadmanagement wurde von Senatore aufgegriffen und zur Auslegung unterschiedlicher Strukturen genutzt [36, 72–75]. Seine Optimierung erfolgte mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtenergie aus im Material gebundener Energie und notwendiger Betriebsenergie für die Aktivierung als konkurrierende Größen. Das gleiche Vorgehen mit einer optimierten Aktorplatzierung nutzt Rekswardojo [76] zum Entwurf einer adaptiven Tragstruktur zur Beeinflussung der Form und der Schnittkräfte. Die angeführten Untersuchungen ermöglichen die Auslegung auf quasi-statische Lastfälle. Die Verwendung aktiver Systeme zur Manipulation von Spannung oder Verformung erfolgt in der Regel zur Kompensation dynamischer Lasten. Shea [32] unterteilt die wesentlichen Anwendungsfelder für die eine Aktivierung sinnvoll erscheint in Strukturen:

- bestimmt durch Kriterien der Gebrauchstauglichkeit
- mit einer hohen Sensibilität für die Nutzungsbedingungen und bei welchen die Eignung hierfür schwer zu bestimmen ist (z. B. Leichtbaustrukturen)
- unter wechselnden Umweltbedingungen (z. B. Klima)
- in kinetischer Anwendung (z. B. sich öffnende Stadiondächer)
- mit Ermüdungsbeanspruchung (z. B. Brücken)
- deren Instandhaltungskosten vergleichbar mit den Anschaffungskosten sind, wodurch die Bedeutung der Lebenszykluskosten steigt (z. B. Brücken).

Unter der Prämisse des (Ultra-)Leichtbaus von Hochhausstrukturen sind vornehmlich Gebrauchstauglichkeitskriterien und eine hohe Sensibilität für die Nutzungsbedingungen ausschlaggebend. Die angestrebte Materialeinsparung führt zu einer schlanken Tragstruktur. Diese ist anfälliger für Lasten, die durch Aktivierung ausgeglichen werden müssen [38]. Kernthemen von Regelungssystemen für die Regelung solch ausgedehnter Strukturen beinhalten höhere Anforderungen an die Kommunikation, größere Latenzen in der Rückkopplungsschleife und eine abnehmende Systemzuverlässigkeit durch die Vielzahl an Komponenten [55]. Diese Problemstellungen verlangen nach einem Einbezug der jeweiligen Fachdisziplinen und sind nicht die üblichen Problemstellungen des Bauingenieurwesens. Die fehlende Interdisziplinarität im Bereich adaptiver Tragwerke bemängelt unter anderem bereits Korkmaz [26], da nahezu die gesamte Forschung im Bauingenieurwesen durchgeführt wurde. Die Universität Stuttgart hat daher 2016 den interdisziplinären Sonderforschungsbereich (SFB) 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ [77] mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichtet.

2.3.1 Sonderforschungsbereich (SFB) 1244

Der SFB 1244 untersucht, wie aktive Elemente für Tragstrukturen, Hüllen und Innenausbauten eingesetzt werden können. Primär stellt sich die Frage, ob durch die Aktivierung eines Tragwerks Masseneinsparungen möglich sind und ob sich im Vergleich mit einem herkömmlichen passiven Tragwerk in der Bilanz der Umweltwirkung eine Verringerung erzielen lässt. An dieser Frage arbeiten Wissenschaftler aus den Bereichen der Architektur, des Bauingenieurwesens und des Maschinenbaus mit dem Ziel, Methoden und Erkenntnisse der Domänen zusammenzuführen und weiterzuentwickeln. Der Sonderforschungsbereich gliedert sich in seiner ersten Förderperiode in die Bereiche Entwurfs- und Planungsmethodik (A), Systemtechnik und Auslegung (B),

Integrative Elemente (C), Ökobilanz (D), Demonstrator (Z) und Öffentlichkeitsarbeit (Ö). Der Bereich A beschäftigt sich mit dem Entwurf und der Formfindung. Daneben werden Methodiken für Planung und Bau adaptiver Tragwerke und Nutzerkomfort untersucht. Im Bereich B sind Modellierung, Regelung, Visualisierung und Ausfallsicherheit zusammengefasst. Komponenten, Hüllen und Strukturen und deren Integration in adaptive Tragwerke werden im Bereich C erforscht. Der Bereich D untersucht Methoden der Ökobilanz.

Die Forschung dieser Dissertation ist innerhalb des Bereichs B in intensiver Zusammenarbeit mit den Bauingenieuren des Bereichs A, der Regelungstechnik des Bereichs B und der Bilanzierung des Bereichs D entstanden. Der Bereich Z beschäftigt sich mit dem Aufbau eines adaptiven Hochhaus-Demonstrators als Experimentalplattform welcher als Anwendungsbeispiel in dieser Arbeit dient und auf welchen im Folgenden genauer eingegangen wird.

2.3.2 Adaptiver Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244

Das für den SFB 1244 als Großdemonstrator genutzte, weltweit bis dato größte adaptive Tragwerk in dieser Bauweise besteht aus vier kombinierten Modulen, die 12 Stockwerke über einer quadratischen Grundfläche von ca. 5 x 5 m umfassen. Eine Aktivierung des Tragwerks erfolgt über 24 Hydraulik-Aktoren in den diagonalen Aussteifungen und Stützen der Module. Um Schwingungen im Gebäude zu simulieren werden vier parallel installierte Aktoren in den Stützen des untersten Moduls zur Anregung des Tragwerks genutzt, während seriell aktivierte Aussteifungen, die sich über die unteren drei Module verteilen, zur Schwingungsdämpfung dienen. Parallel integrierte Aktoren können den Lastabtrag bei Bedarf unterstützen und sind redundant zum lastabtragenden Element installiert. Serielle Aktoren sind demgegenüber in den Lastpfad integriert.

Zur Regelung der Hydraulik-Aktoren über Ventile sind verschiedene Sensoren für die Erfassung des Ist-Zustands angebracht. An den aktivierten Stützen und Diagonalen befinden sich Dehnmessstreifen (DMS) zur Dehnungsmessung in redundanter Anordnung. Die oberen Module sind zusätzlich mit Inertial-Mess-Einheiten (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) zur Beschleunigungs- und Drehratenmessung ausgestattet. An den Knotenpunkten des Tragwerks angebrachte LEDs dienen als Messpunkte für ein optisches Messsystem, das über zwei Seiten mittels Kameras die Gesamtverformung des Tragwerks erfasst. In Bild 2.4 ist der Aufbau des adaptiven Hochhaus-Demonstrators mit der installierten Aktorik und Sensorik abgebildet.

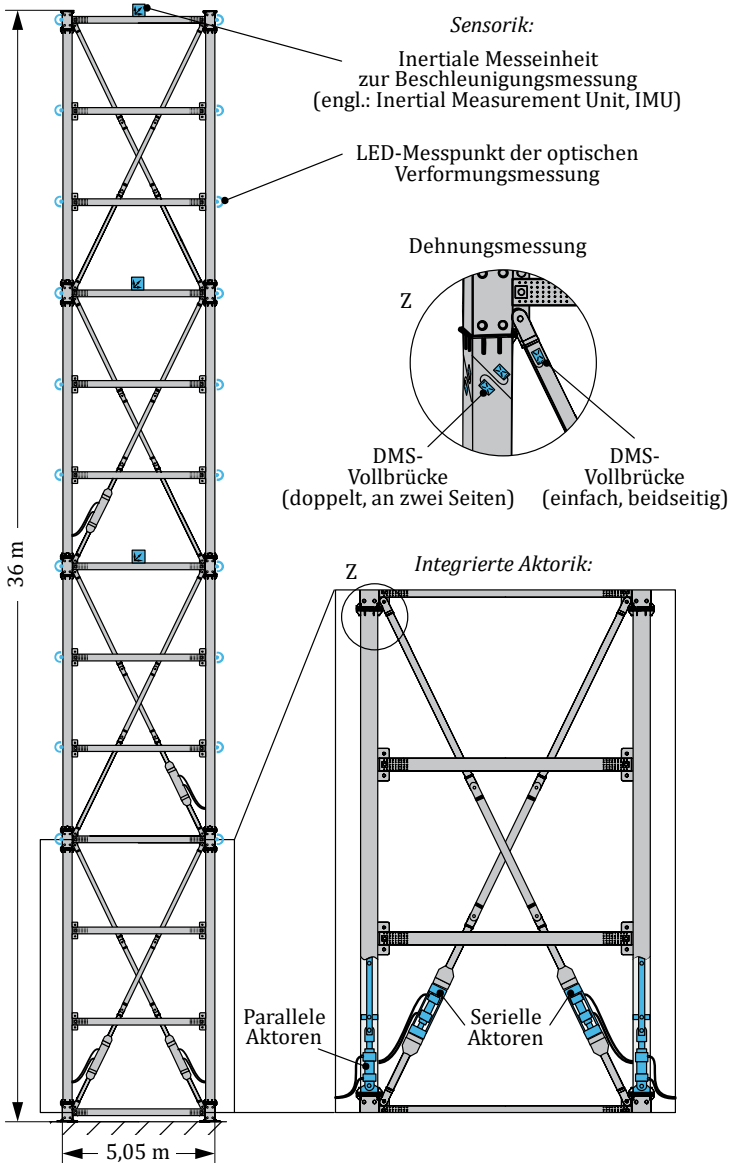


Bild 2.4: Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244 der Universität Stuttgart. Auslegung und Entwurf: Werner Sobek AG [78]

Das Tragwerk besteht aus Baustahl der Festigkeitsklasse S355. Fassadenelemente in Form von adaptiven Hüllen sind vorgesehen und werden schrittweise entwickelt und angebracht. Die Energieversorgung und die Zuleitung von Hydraulik-Flüssigkeit erfolgt bei diesem wissenschaftlichen Versuchsgebäude über einen Erschließungsturm, der sich neben dem adaptiven Hochhaus-Demonstrator befindet und darüber hinaus als Treppenturm für einen Zugang zu den einzelnen Stockwerken dient.

2.3.3 Adaptive Tragwerke als adaptronische Systeme

Zur Kompensation von externen Lasten enthalten adaptive Tragwerke einen Regelkreis, der aus den Komponenten Sensorik, Regelung und Aktorik besteht. In Bild 2.5 sind der schematische Aufbau und der Informationsfluss dargestellt.

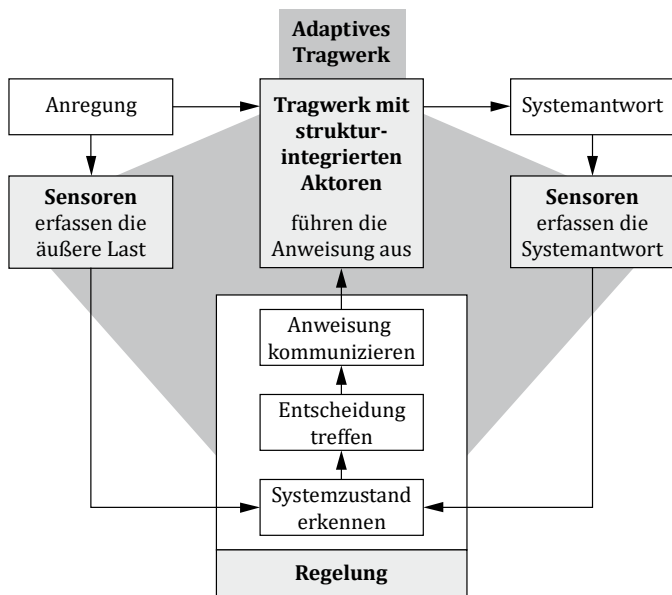


Bild 2.5: Komponenten eines adaptiven Tragwerks nach [25, 71]

Die Anregung erfolgt durch äußere Lasten, die im Bauwesen in ständig, veränderlich und außergewöhnlich einwirkende Lasten unterteilt werden. Über die Erfassung der Anregung und der Systemantwort mittels Sensoren wird der Systemzustand von der

Regelung geschätzt und darauf basierend eine Entscheidung getroffen, die an die Aktoren kommuniziert wird. Diese führen die Anweisung aus und beeinflussen als strukturintegrierte Elemente das Tragwerk. Der Systemaufbau entspricht in dieser Form einem adaptronischen System.

Die Adaptronik als zusammengesetztes Kunstwort aus „adaptiv“ und „Elektronik“ [79] zählt nach der VDI 2206 [80] zu den verwandten Fachgebieten der Mechatronik. Die VDI 2206 definiert mechatronische Systeme als Systeme mit Funktionsintegration und/oder räumlicher Integration von Sensoren, Aktoren, Informationsverarbeitung und Struktur als Grundsystem. Ein Erfassen von Informationen über das System und seine Umgebung, die Verarbeitung der Information und Reaktion geschieht mit dem Ziel, die Eigenschaften des Systems zu verbessern [80].

Ein adaptronisches System grenzt sich nach Neumann [81] dahingehend ab, dass mindestens ein multifunktionales Element enthalten ist und die Systemeigenschaften adaptiv und damit selbstständig angepasst werden können. Die Multifunktionalität setzt sich aus passiven und aktiven Eigenschaften zusammen. Eine ausführliche Abgrenzung mit beispielhafter Unterscheidung nimmt Keller in [82] vor. Danach ist die Funktionsintegration durch vornehmlich untrennbares Einbringen von Sensoren und/oder Aktoren in die mechanische Struktur bzw. der Einsatz von „Werkstoffen mit interessanten Eigenschaften“ [82] wesentlich (auch „smart materials“, „intelligent materials“, „adaptive materials“ genannt [79]). Die intelligente Anpassungsfähigkeit schreibt Keller sowohl mechatronischen als auch adaptronischen Systemen zu und stimmt damit in seiner Definition mit Isermann [83] überein.

2.3.4 Systemmodell und Regelkreis

Adaptive Tragwerke zeichnen sich in der Beschreibung nach Connor [25] dadurch aus, dass sie selbsteinstellend sind, d. h. sie können ihre Eigenschaften und Prozesse anpassen und besitzen strukturintegrierte Aktoren. Dies entspricht der höchsten Stufe der aktiven Tragwerkskontrolle. Im Regelkreis ist hierfür eine Feedback-Schleife notwendig, die im Informationsfluss in Bild 2.6 über die Erfassung der Systemantwort und Rückschleifung über den Beobachter und Schätzer gegeben ist. Bei einfacheren Prozessen wird oftmals aus Kostengründen und aufgrund einer geringeren Komplexität eine „Open-Loop-Control“ ohne Feedback-Schleife der sogenannten „Closed-Loop-Control“ vorgezogen. Für adaptive Tragwerke ist die Rückführung der Messgrößen essentiell und per se in der Definition der adaptiven Tragwerkskontrolle enthalten [84].

Das Potential geregelter, adaptiver Strukturen wurde früh erkannt und die Forschung hierzu reicht zurück bis in die 70er Jahre [85]. Einen Überblick über verschiedene Ansätze zur Regelung adaptiver Strukturen vermittelt Housner in [86]. Bild 2.6 zeigt einen exemplarischen Regelkreis mit Rückführung. Ein bewährter Entwurf sieht für die Adaption an Lasten einen linear-quadratischen Regler (LQR) mit Kalman-Filter als Beobachter und Schätzer vor [84, 86–88]. Das Tragwerk als physikalisches System wird durch Sensoren überwacht, welche die relevanten Größen wie Spannung, Beschleunigung, Geschwindigkeit, Auslenkung und weitere physikalische Messgrößen erfassen [25].

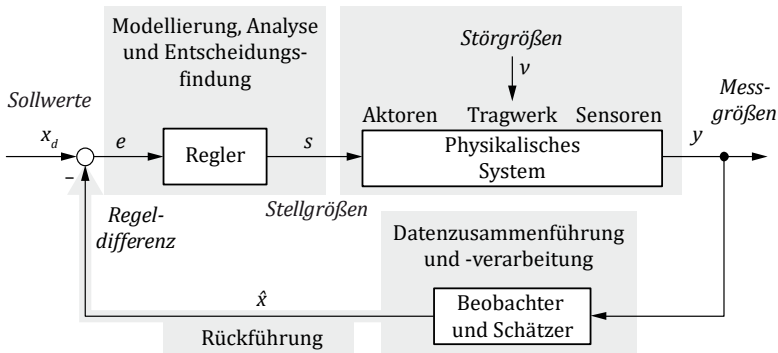


Bild 2.6: Exemplarischer Regelkreis als „Closed-Loop“ nach [25, 88]

Mit Hilfe des Beobachters und Schätzers wird der Systemzustand \hat{x} basierend auf den Messgrößen mittels mathematischer Verfahren geschätzt und an den Regler übermittelt. So können auch unbekannte Systemgrößen bestimmt werden. Durch rückwärtige Zeitintegration ausgehend vom Zielzustand wird eine Lösung für die Stellgröße s zur Überführung des physikalischen Systems in den Zielzustand bestimmt. Die Handlungsanweisung wird durch die Aktoren ausgeführt und wiederum von Sensoren am physikalischen System, in diesem Fall dem Tragwerk, erfasst. Zur Visualisierung, Archivierung und zum Zugriff kann eine Speicherung der Daten erfolgen. Auf dieser Grundlage ist das System in der Lage eine Selbstanpassung vorzunehmen.

Die geläufigste Methode zur Abbildung mechanischer Strukturen ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Das diskretisieren der unendlichen Anzahl an Freiheitsgraden des FE-Modells an den Knoten führt zu der Bewegungsgleichung der Tragstruktur, beschrieben durch die Differentialgleichung zweiter Ordnung [88, 89].

$$\bar{M}\ddot{q}(t) + \bar{D}\dot{q}(t) + \bar{K}q(t) = \bar{F}u(t) + \bar{F}_v(v(t)) \quad (2.1)$$

Zur dynamischen Untersuchung von Tragstrukturen hat sich dieses Vorgehen etabliert und bildet die Grundlage einer Vielzahl von Publikationen. Es gelten die folgenden Randbedingungen:

$$t > 0, \quad q(0) = q_0, \quad \dot{q}(0) = \dot{q}_0 \quad (2.2)$$

Der Vektor $q \in \mathbb{R}^n$ entspricht den Knotenverschiebungen. Die Massenmatrix wird durch $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und die Steifigkeitsmatrix durch $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ beschrieben. Für die Dämpfungsmatrix $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ wird häufig ein Rayleigh Dämpfungsmodell in der Form $D = \alpha_1 M + \alpha_2 K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit den Dämpfungsparametern α_1 und α_2 angenommen. Durch die Matrix $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ wird der Einfluss der Stellgröße $u \in \mathbb{R}^n$ in Form der Aktor-Kräfte auf die Struktur modelliert. Die nichtlineare Wirkung der Störgrößen v auf die Tragstruktur wird durch die Funktion $F_v \in \mathbb{R}^{2+k_{level}} \rightarrow \mathbb{R}^n$ abgebildet. Die Störgrößen beinhalten hierbei die Windgeschwindigkeit v_W , die Windrichtung α_W und die Stockwerkslasten jedes Stockwerks $m_i, i = 1, \dots, k_{level}$ als $v = [v_W, \alpha_W, m_i]^T \in \mathbb{R}^{2+k_{level}}$. Über $F_v(v(t))$ wird die höhenabhängige Windgeschwindigkeit und die Verteilung der Windlasten auf die Fassade und damit den Knotenpunkten der Tragstruktur unter Berücksichtigung der Windrichtung ausgedrückt. Das Regelziel ist bei Hochhaus-Tragwerken die Dämpfung von Schwingungen oder Minimierung der Auslenkung bzw. eine Manipulation der Eigenfrequenz. Hierzu werden unterschiedliche Arten von Aktoren eingesetzt und in der Struktur platziert.

2.3.5 Aktoren und Aktivierungsprinzipien

Ein adaptives Tragwerk ist in der Lage Spannungen bzw. Verformungen durch äußere Lasten auszugleichen. Die Breite unterschiedlicher Einsatzzwecke adaptiver Tragwerke wird durch eine Vielzahl an Aktivierungsprinzipien ermöglicht, die in Fachliteratur z. B. von Connor [25] bzw. Preumont [84] beschrieben ist. Unterschieden werden die Anwendungen Versteifung, Dämpfung und Entkopplung, wobei sich einige Systeme für mehrere Anwendungszwecke eignen. Die Entkopplung dient der Isolation des Bauwerks von der Störquelle und wird oftmals in erdbebenreichen Regionen z. B. mittels magnetischer Schwingspulen in den Auflagern realisiert.

Die Dämpfung von Bauwerken erfolgt aktiv oder semi-aktiv. Semi-aktive Aktoren bezeichnen adaptive Elemente, die einen geringen Energiebedarf aufweisen und in ihrer Funktion Energie dissipieren. Da sie sich in diesem Sinne nahezu wie passive Elemente verhalten werden sie semi-aktiv genannt [25]. Hier kommen hauptsächlich

magnetorheologische Flüssigkeiten zum Einsatz. Diese können bei Ansteuerung auch zur aktiven Dämpfung eingesetzt werden. Darüber hinaus sind elektromagnetische und piezoelektrische Wandler gängige aktive Dämpfungselemente. Elektromagnetische und piezoelektrische Linearaktoren eignen sich sowohl als Dämpfer als auch zur Versteifung, während strukturintegrierte elektrische Linearaktoren ausschließlich zur Versteifung eingesetzt werden. Bestimmende Parameter bei der Auswahl der Aktorik und des Aktivierungsprinzips sind der Einsatzzweck und die erforderlichen Kräfte bzw. Lasten. Eine weitere Einschränkung kann die Umweltwirkung darstellen. Die geforderte Lastkompensation legt das Aktivierungsprinzip fest.

Connor [25] unterscheidet anhand der Integration der Aktoren in die Tragstruktur. Durch aktive Aussteifungen wie in Bild 2.7 a) dargestellt, wird bei Aktivierung innerhalb des Stockwerks durch selbstaussgleichende Kräfte eine Scherwirkung erzwungen. Nicht aktivierte Stockwerke erfahren hierdurch keine Verformung, da die Scherwirkung durch den aktivierten Aktor null ist. Um die Auslenkung mehrerer Stockwerke zu beeinflussen, müssen Aktoren in jedem Stockwerk installiert sein.

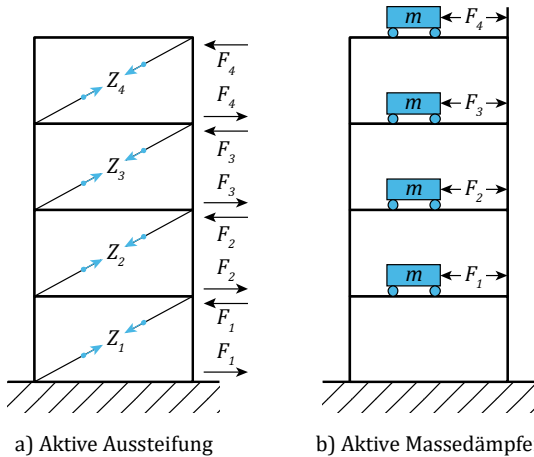


Bild 2.7: Aktivierungsprinzipien adaptiver Hochhaus-Tragstrukturen nach [25]

In Bild 2.7 b) erfolgt die Aktivierung durch aktive Massedämpfer (engl.: Active Tuned Mass-Damper, ATMD). Durch aktive Anregung der beweglich gelagerten Masse mittels Aktoren können Kräfte erzeugt werden, die nicht auf ein Stockwerk bezogen sind und sich auf das gesamte Tragwerk auswirken. Im Vergleich zum Prinzip mit aktiven Aussteifungen lassen sich keine statischen, lateralen Lasten ausgleichen.

Die zusätzliche Masse muss wiederum durch die Tragstruktur unter Materialmeherverbrauch abgetragen werden. Die Schwingungsdämpfung und Eigenfrequenzverschiebung des Tragwerks durch die alternierend bewegte Masse ist dagegen mit weniger aktiven Elementen möglich, da bei Aktivierung die gesamte Tragstruktur beeinflusst wird.

Die optimale Platzierung der Aktoren in der Tragstruktur führt statisch gegenüber dynamisch zu einer unterschiedlichen Konfiguration [90]. Die Vorgehensweise orientiert sich hierfür an den Kriterien Steuerbarkeit und Kosten, wobei die Umweltwirkung nicht zu vernachlässigen ist. Aufgrund ihrer dämpfenden Eigenschaft und der erforderlichen Kraftdichte und Leistung eignen sich zur Aktivierung von Hochhaus-Tragwerken vorrangig Hydraulik-Aktoren. Nachteilig ist, dass für den Betrieb umweltschädliches Hydrauliköl notwendig ist und zudem eine entsprechende Druckversorgung erfolgen muss. Für die Ermittlung von Stellwegen und Kräften ist die Rekonstruktion des Systemzustandes aus Sensordaten notwendig. Die Beschreibung zur Erfassung der relevanten Größen erfolgt anschließend.

2.3.6 Sensoren und Messprinzipien

Sensoren sind notwendig um den Systemzustand zu bestimmen und wechselnde Umgebungsbedingungen wahrzunehmen. Zur Adaption der Tragstruktur werden die relevanten Größen wie Dehnungen oder die Auslenkung gemessen. Die Funktionalität des adaptiven Systems wird durch integrierte Überwachung der Signalverarbeitung bzw. aktive Diagnose, die in [87, 88] beschrieben ist, sichergestellt. Einerseits sind für die Regelung die systemrelevanten Größen zur Ableitung des Tragwerkszustands sensorisch zu erfassen, andererseits sind Fehlfunktionen und Ausfälle zu diagnostizieren. Hierfür werden Mikrokontroller mit Selbstdiagnose eingesetzt. Die Überwachung von Dehnungen in Tragwerksteilen erfolgt mittels Dehnmessstreifen (DMS) [91], die an der Struktur angebracht werden. Durch Erfassen der linearen Widerstandsänderung des DMS bei Dehnung oder Stauchung der Trägerstruktur, kann die Dehnung ermittelt werden. Zur Fehlerkompensation wird häufig die Wheatstone'sche Brückenschaltung, auch als DMS-Vollbrücke bezeichnet, eingesetzt, womit die relative Widerstandsänderung gemessen werden kann. Thermische und mechanische Dehnung quer zur Messrichtung wird durch diese Anordnung elektrisch kompensiert. Im Regelkreis wird durch Kombination mehrerer DMS-Vollbrücken eine Fehlertoleranz durch mehrfach redundante Messung und Abgleich der Ergebnisse erreicht. Beschleunigungen und Rotationen in den sechs Freiheitsgraden sind mittels inertialer Messeinheiten erfassbar. Diese können im Tragwerk verteilt angeordnet werden.

Die Auslenkung des Tragwerks kann über Messpunkte, die am Tragwerk angebracht sind, mittels optischer Sensoren erfasst werden. Dazu wird eine Kamera außerhalb des Tragwerks platziert, die über ein zur Präzisionssteigerung angebrachtes Hologramm die Messpunkte erfasst. Auf eine Entfernung von 40 m sind Messungen mit einer Abweichung von weniger als einem Millimeter möglich [92].

2.4 Der Eurocode

Der Eurocode [8] standardisiert die Auslegung von passiven Tragwerken im Bauwesen und ist neben den Grundlagen und den Einwirkungen aufgeteilt in die für Tragwerke verwendete Materialien und die Geotechnik. Die Norm-Teile des Eurocodes sind in Bild 2.8 gegliedert nach Relevanz und Anwendung dargestellt.

0	EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung					
1	EN 1991: Einwirkungen auf Tragwerke					
Entwurf, Berechnung und Bemessung von...						
2	3	4	5	6	9	
EN 1992	EN 1993	EN 1994	EN 1995	EN 1996	EN 1999	
Stahlbeton- tragwerken	Stahl- tragwerken	Verbund- tragwerken aus Stahl- Beton	Holz- tragwerken	Tragwerken aus Mauer- werk	Tragwerken aus Aluminium	
7	EN 1997: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik					
8	EN 1998: Auslegung von Bauwerken in Erdbebengebieten					

Bild 2.8: Gliederung der Normenteile des Eurocodes

In der EN 1990, dem Eurocode 0 [8], sind die Grundlagen der Tragwerksplanung festgehalten. Dazu gehört die Bemessung von Tragwerken nach den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mittels Teilsicherheitsbeiwerten durch Vorgabe von Methoden und Anforderungen. Die EN 1991, der Eurocode 1 [93], definiert die Einwirkungen auf Tragwerke. Inhaltlich sind dies die spezifischen Gewichte von Baustoffen und Lagergütern, das Eigengewicht von Bauteilen und die Nutzlasten. Die Teile Eurocode 2 – 6 und der Eurocode 9 enthalten Ausführungen gegliedert nach

der Bauart des Tragwerks. Enthalten sind jeweils spezifische Bemessungsregeln je Bauart und verschiedene Arten von Tragwerken, erläutert am Beispiel der EN 1993, Eurocode 3 [94] für Stahltragwerke. Neben den allgemeinen Bemessungsregeln zusammen mit denen des Hochbaus ist der Eurocode 3 in Bauwerke aus Stahl, wie z. B. Brücken, Türme und Kranbahnträger aufgeteilt. Insbesondere wird auf den Brandschutz und die Beständigkeit bzw. Beanspruchbarkeit von Bauteilen und Verbindungen eingegangen. Werkstoffspezifische Parameter sind dort tabellarisch aufgelistet. Es folgen die Eurocodes 7 [95] und 8 [96], in denen die Bemessung der Geotechnik und die Auslegung von Tragwerken in Erdbebengebieten definiert sind. Behandelt werden verschiedene Arten von Gründungen und die Bauüberwachung und Instandhaltung bzw. besondere Regelungen in seismisch aktiven Regionen für unterschiedliche Bauarten.

2.4.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit beschreibt den maximalen Widerstand des Tragwerks oder Bauteils gegenüber einwirkenden Lasten, denen das Tragwerk planmäßig standhalten soll, und führt bei Überschreitung zum Einsturz oder Bauteilversagen. In diesem Zusammenhang steht häufig der Begriff Standsicherheit von Tragwerken. Dieser definiert einerseits die Lagesicherheit und andererseits die Tragfähigkeit, sodass unter Berücksichtigung des Sicherheitsniveaus keine Gefährdung vom Tragwerk ausgeht [97].

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird bestimmt durch Grenzen innerhalb derer festgelegte Bedingungen für das Tragwerk oder Bauteil nicht mehr erfüllt sind. Darunter fallen Verformungen und Verschiebungen des Tragwerks, die das Erscheinungsbild, den Nutzerkomfort, die Funktion des Tragwerks oder Beläge und Beschichtungen beeinträchtigen. Außerdem berücksichtigt werden Schwingungen die zur Einschränkung des Nutzerkomforts oder der Funktion des Tragwerks führen und Schäden am Erscheinungsbild oder der Dauerhaftigkeit nach sich ziehen. Die Dauerhaftigkeit legt die Bemessung des Tragwerks für die geplante Nutzungsdauer fest, ohne dass die Alterung das Verhalten des Tragwerks unvorhergesehen beeinflusst. Für die geplante Nutzungsdauer werden Bezugszeiträume vorgegeben, über die das Tragwerk differenzierten Bemessungssituationen genügen muss, die nicht zu einer Überschreitung der Grenzzustände führen dürfen. Es wird in vorübergehende, ständige und außergewöhnliche Bemessungssituationen unterschieden. Vorübergehend ist z. B. die Bauzeit oder Instandhaltung, die lediglich einen kurzen Zeitraum

im Verhältnis zur geplanten Nutzungszeit ausmacht und eine hohe Auftretenswahrscheinlichkeit hat. Die ständige Bemessungssituation entspricht etwa dem Zeitraum der geplanten Nutzung unter üblichen Nutzungsbedingungen. Außergewöhnliche Bemessungssituationen sind bspw. Brand, Explosion, der Anprall eines Objekts oder örtliches Versagen des Tragwerks.

2.4.2 Einwirkungen auf Tragwerke

Jede Bemessungssituation nach Eurocode 0 [8] unterliegt einer definierten Einwirkung, die direkt oder indirekt auf das Tragwerk wirkt. Während Eigen-, Stockwerks-, Wind-, oder Schneelasten eine direkte Einwirkung darstellen, wirken z. B. Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen, ungleichmäßiges Setzen des Untergrunds oder seismische Aktivität indirekt auf das Tragwerk. Die Einwirkungen werden klassifiziert in ständig, veränderlich und außergewöhnlich wirkend. Die Gewichtskraft ist eine ständige Einwirkung, da sie über die geplante Nutzungsdauer unidirektional besteht und eine Veränderung vernachlässigbar klein ist. Veränderliche Einwirkungen wie z. B. Windlasten weisen demgegenüber einen relevanten dynamischen Anteil auf und wirken aus unterschiedlichen Richtungen. Als außergewöhnlich werden Lasten klassifiziert, die immens aber von kurzer Dauer sind.

Das Eigengewicht stellt eine dauerhafte, stationäre Einwirkung dar, während die Nutzlasten die dynamischen Anteile abbilden. Grundsätzlich werden auch die Nutzlasten als quasi-statische Lasten angenähert. Für spezielle Bemessungssituationen wird ein dynamischer Vergrößerungsfaktor berücksichtigt bzw. für schwingungsempfindliche Tragwerke eine dynamische Betrachtung gefordert. Ist ein zeitgleiches Auftreten von Lasten wahrscheinlich, wird durch Lastkombinationen für den ungünstigsten Lastfall bemessen. Zur Ermittlung der Nutzlasten erfolgt eine Klassifizierung in Nutzungskategorien wie Wohnflächen, Büroflächen, Flächen mit Personenansammlungen und Verkaufsflächen mit entsprechenden Flächenlasten. Der Eurocode 1 [93] enthält weitere Teile zur Angabe der Einwirkung von Schneelasten, Windlasten und Temperaturen bzw. Brandeinwirkungen und außergewöhnlichen Einwirkungen.

Nationale Anhänge erweitern den Umfang des Eurocodes durch lokal gültige Spezifikationen und Vorschriften. Sie enthalten quantitative Werte die der Eurocode offen lässt oder anerkannte alternative Werte und Vorgehensweisen. Zudem sind landesspezifische Karten Bestandteil, die geografische und klimatische Daten zur Tragwerksplanung definieren. Dort sind lokale Angaben zu den Einwirkungen festgehalten.

2.4.3 Differenzierung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Tragwerken

Der Eurocode ermöglicht den Tragwerksentwurf und die Berechnung und Bemessung von Tragwerken der täglichen Anwendung. Ungewöhnliche Tragwerke, wie z. B. adaptive Tragwerke, sind nicht in den Ausführungen eingeschlossen. Darüber hinaus gibt der Eurocode vor, dass Tragwerksversagen sowie immense Schädigung der Tragstruktur oder seiner Inhalte und Personen durch Absicherung des Grenzzustands der Tragfähigkeit für extreme Lasten mit relativ geringer Auftretenswahrscheinlichkeit ausreichend unwahrscheinlich ist. Diese Absicherung erfolgt im Eurocode durch Einführung von Schadensfolgeklassen, die über die Vorgabe einer Mindestzuverlässigkeit durch den Zuverlässigkeitsindex β ein Sicherheitsniveau definieren. Ein Versagen wird dadurch vermieden, dass abhängig von der Schadensfolgeklasse ein Sicherheitsabstand durch Überdimensionierung erzielt wird und damit eine Überschneidung der Verteilungen von Belastung und Belastbarkeit unwahrscheinlich ist. Der Mindestwert des Zuverlässigkeitsindex β bezieht sich zudem auf einen Bezugszeitraum, sodass durch Alterungseffekte des Materials ein Versagen während der Nutzungsphase ausgeschlossen ist. Den Zusammenhang von Belastung und Belastbarkeit (Stress-Strength-Interference) über der Zeit bzw. den Belastungszyklen nach Woo [98] zeigt Bild 2.9.

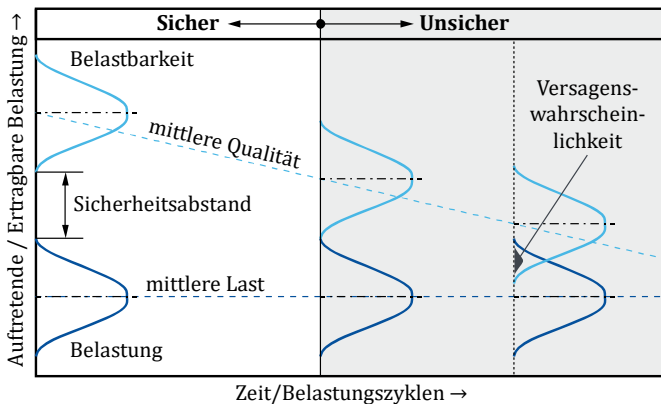


Bild 2.9: Belastung und Belastbarkeit mechanischer Elemente über der Zeit nach [98]

Überschneiden sich die Verteilungen von Belastung und Belastbarkeit ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit. Ein Versagen tritt ein, wenn die Belastung die Belastbarkeit übersteigt. Hieraus wird im Eurocode die Grenzzustandsfunktion gebildet.

In der Auslegung von Hochhaus-Tragwerken nach Eurocode fallen die Disziplin der Zuverlässigkeit und Sicherheit zusammen. Durch eine Überdimensionierung und Steigerung der Zuverlässigkeit lässt sich das Sicherheitsniveau verbessern. Für mechanisch beanspruchte Bauwerke und Bauteile ist diese Annahme zutreffend, sofern die Werkstoffqualität konstant bleibt. Jäger [99] führt diesen Umstand auf die Unwirtschaftlichkeit von Redundanz bei mechanischen Systemen und den beschränkten Funktionsumfang zurück, wodurch ein Ausfall gleichbedeutend mit der Nicht-Funktionsfähigkeit und damit dem physischen Ausfall des Tragwerks ist. Daher ist die Definition der Zuverlässigkeit nicht funktionsbezogen, sondern über das sicherheitsrelevante Versagen der Komponente definiert.

Bei der Aktivierung von Tragwerken wird ein mechatronisches System eingesetzt, für das diese Beziehung ungültig ist, da Komponentenausfälle nach Müller [100] nicht unweigerlich zum totalen Funktionsverlust sondern oftmals nur zu einer Funktionseinschränkung führen. Das Ausfallverhalten muss aufgrund von Multifunktionalität dieser umfangreichen Systeme funktionsorientiert untersucht werden [99]. Für die Vielzahl zur Adaption erforderlicher Komponenten muss eine Zuverlässigkeitsbewertung erfolgen, um die Systemzuverlässigkeit zu ermitteln. Methoden und Modelle, die das Zusammenwirken der Komponenten und das Verhalten des Systems bei Ausfällen abbilden sowie eine Reparatur berücksichtigen, sind erforderlich. Hierzu ist der Stand der Technik zu den Grundlagen der Zuverlässigkeit im folgenden Abschnitt 2.5 aufgeführt.

Bei abnehmendem Querschnitt der Tragstruktur wird das mechatronische System zur Adaption an Lasten mehr und mehr sicherheitsrelevant. Neben der Funktionsfähigkeit der Komponenten kann es bei der Adaption, z. B. durch Softwarefehler oder Fehlentscheidungen des selbstanpassenden Reglers, zu Fehlfunktionen kommen, die eine Gefährdung hervorrufen. Dies ist in jedem Fall zu verhindern, indem Fehler systematisch vermieden bzw. diagnostiziert und behoben werden, da sich die Nicht-Funktion in der Regel erst bei Anforderung der Funktion offenbart. Neben den Zuverlässigkeitsanforderungen ergeben sich hieraus zu differenzierende Anforderungen an die sichere Funktion adaptiver Tragwerke. Die Grundlagen hierzu sind anhand der EN 61508 [101] für funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/ elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme (E/E/PE-Systeme) als Sicherheitsnorm des Maschinenbaus in Abschnitt 2.6 erläutert.

2.5 Grundlagen der Zuverlässigkeitsbetrachtung

Vom mechanischen Verständnis herrührend beschreibt der Begriff Zuverlässigkeit historisch eine fortwährende Funktionserfüllung die durch Versagen der Einheit beendet wird [99]. Im bisher ausschließlich mechanisch geprägten Bauwesen ist daher die folgende Definition für Tragwerke nach Eurocode 0 üblich:

„Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils die festgelegte Anforderung innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird i. d. R. probabilistisch ausgedrückt.“ – Eurocode 0 [8]

Demgegenüber wird im Maschinenbau in der VDI 4003 [102] die funktionsbezogene Zuverlässigkeit definiert, die zudem die Umgebungsbedingungen einschließt und als umfassende Begriffsdefinition geläufig ist:

„Die Funktionszuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen. Die Funktionszuverlässigkeit kann einerseits qualitativ beschrieben und andererseits quantitativ als Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden.“ – VDI 4003 [102]

Dies entspricht der Definition nach DIN 40041 [103]. Dort ist die Funktionsfähigkeit beschrieben als die Eignung einer Einheit zur Erfüllung einer Funktion unter festgelegten Anwendungsbedingungen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wiederum ist die probabilistische Größe mit der die Lebensdauer der Einheit mindestens einer betrachteten Betriebsdauer ab Anwendungsbeginn entspricht, was mit der Definition nach Bertsche [9] übereinstimmt. Die Lebensdauer wiederum definiert die Betriebsdauer vom Anwendungsbeginn bis zum Versagen der Einheit ohne eine Instandsetzung. Das Versagen beschreibt den Zeitpunkt zu dem sich die Nicht-Funktionsfähigkeit offenbart und der Ausfall den spezifischen Zeitpunkt.

Durch die kontinuierliche Funktionsanforderung bei mechanischen Bauteilen sind Ausfall und Versagen gleichbedeutend [99]. Im Gegensatz dazu ist bei einer funktionsbezogenen Betrachtung der Versagensfall zu unterscheiden, da die Nicht-Funktionsfähigkeit erst nach Anforderung in Erscheinung tritt. Der Ausfall beschreibt demnach das Ende der Funktionsfähigkeit und führt zum Versagen nach Anforderung der Funktion. Die Unterscheidung der Definitionen lässt sich, wie in Bild 2.10 gezeigt, grafisch veranschaulichen.

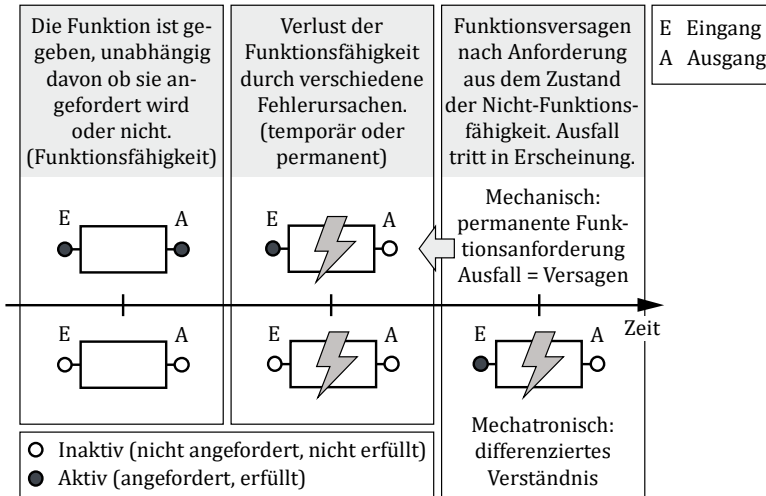


Bild 2.10: Unterscheidung von Ausfall und Versagen mechanischer und mechatronischer Systeme in Anlehnung an Jäger [99]

Bei der Betrachtung von Funktionsausfällen ist zudem die Unterscheidung von Ausfallmechanismen wichtig. Abhängig von den Funktions- und Umgebungsbedingungen werden verschiedene Ausfallmechanismen unterschiedlich stark angeregt. In der Regel führt schließlich ein Ausfallmechanismus zum Versagen. Durch mathematische Modellierung kann hieraus die Bauteilzuverlässigkeit ermittelt werden. Ermüdungs- und Verschleißerscheinungen kennzeichnen Ausfallmechanismen mechanischer Komponenten. Elektronische Komponenten haben in der Regel keine beweglichen Elemente. Daher wird angenommen, dass während der Betriebszeit ein zufälliges Ausfallverhalten vorliegt und die Modellierung erfolgt mittels einer konstanten Fehlerrate [104, 105]. Software unterliegt keinerlei Abnutzungserscheinung und versagt bei Ausführung fehlerbehafteter Programmcodes.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Zuverlässigkeitsberechnung in der Mechanik, bei adaptronischen Systemen und den Zuverlässigkeitsprozess eingegangen.

2.5.1 Zuverlässigkeit in der Mechanik

Häufig unterliegen mechanische Bauteile einer schwingenden Belastung im Betrieb, die zu Ermüdungserscheinungen führt. Meist ändert sich die Belastungshöhe über der Betriebszeit und man spricht von sogenannten Lastkollektiven. Die Belastung stellt

die von außen auf das Bauteil wirkende Last dar. Daraus resultiert die bauteilinhärente Beanspruchung, im Bauwesen auch als Auswirkung der Einwirkung bezeichnet. Die Belastbarkeit ist der maximale Widerstand des Bauteils gegenüber der Beanspruchung. Die Betriebsfestigkeitslehre beschäftigt sich mit der Absicherung mechanischer, dynamisch beanspruchter Bauteile und liefert einen wichtigen Beitrag für den Zuverlässigkeitsnachweis. Zur Berechnung der Lebensdauer ist die Kenntnis

- des Zusammenhangs zwischen Belastung und Belastbarkeit bezogen auf den Ausfallmechanismus des Elements,
- der auf das Element wirkenden, den Ausfallmechanismus anregenden Belastung in Form von Lastkollektiven und
- ein Verfahren zur Verrechnung der Schädigung unterschiedlich hoher Belastungen erforderlich.

Belastung und Belastbarkeit

Im Wöhler-Diagramm wird der Zusammenhang $\sigma_A(N)$ von Belastung durch die Spannungsamplitude σ_A und Belastbarkeit als Lastwechselzahl N abgetragen und logarithmisch dargestellt, Bild 2.11. Dabei können die Bereiche der Kurzzeitfestigkeit, der Zeitfestigkeit sowie der Dauerfestigkeit unterschieden werden.

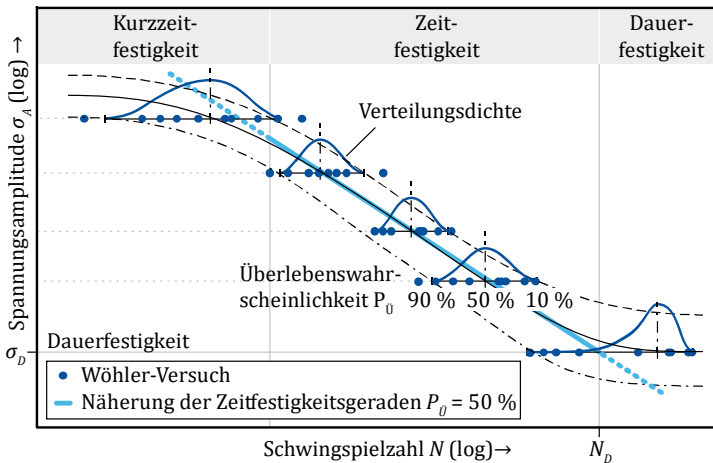


Bild 2.11: Exemplarisches Wöhler-Diagramm mit Verteilungsdichte und Näherungsgerade in Anlehnung an Haibach [106]

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Wöhler-Gerade ist das von Haibach [106] beschriebene Horizontenverfahren. Dazu werden auf verschiedenen Lastniveaus Versuche mit dem gleichen Bauteil bis zum Ausfall durchgeführt. Die Streuung der Versuche auf den Lastniveaus lässt sich für eine hinreichende Anzahl als Verteilungsdichte $f(t)$ ausdrücken und über ein Wahrscheinlichkeitsnetz in eine Überlebenswahrscheinlichkeit P_0 überführen. Die Verbindung der Lastniveaus erfolgt bei logarithmischer Darstellung im Zeitfestigkeitsbereich in guter Näherung durch eine Gerade, die dem jeweiligen Lebensdauerquantil entspricht. Häufig wird die 50%-Wöhler-Kurve dargestellt. Am Übergang zu den Bereichen der Kurzzeitfestigkeit sowie der Dauerfestigkeit weicht die Gerade ab, da die Näherung nur für den Zeitfestigkeitsbereich gilt. Unterhalb der Spannungsamplitude der Dauerfestigkeit σ_D ist nach Miner original eine theoretisch unendlich ertragbare Anzahl von Schwingspielen möglich. In Realität versagen auch solche Bauteile, weshalb oft mit einer modifizierten Steigung der Wöhler-Linie gerechnet wird.

Im Wöhler-Diagramm nicht ersichtlich ist der oftmals erhebliche Einfluss der Mittelspannung σ_m auf die ertragbare Spannungsamplitude σ_A und damit auch auf die Lebensdauer. Hierzu hat sich neben dem Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith das Schaubild nach Haigh durchgesetzt. Ausgehend vom Mittelspannungsverhältnis R kann hiermit die Mittelspannungsempfindlichkeit M bewertet werden. Eine Erläuterung findet sich z. B. ebenfalls bei Haibach [106].

Lastkollektiv und Zählverfahren

Für die Lebensdauerbestimmung sind Lastkollektive, die möglichst genau den realen Belastungen des Bauteils im Betrieb entsprechen sollten, erforderlich. Aus gemessenen oder simulierten Belastungs-Zeit-Verläufen erfolgt die Transformation in ein Lastkollektiv. Vorrangig ist die Größe der Belastung und die Häufigkeit von Interesse. Vernachlässigt werden in der Regel die Reihenfolge des Auftretens, die Schwingungsform und die Frequenz, was je nach Ausfallmechanismus bewertet werden muss. Zur Transformation und Reduktion der Informationen haben sich verschiedene ein- und zweiparametrische Zählverfahren, auch Klassierverfahren genannt, durchgesetzt, die bspw. von Bertsche [9], Haibach [106] und Köhler [107] beschrieben werden. Belastungs-Zeit-Verläufe unterscheiden sich je nach Anwendungsfall und relevantem Ausfallmechanismus stark und erfordern abhängig davon andere Zählverfahren. Das Ergebnis der Lebensdauerberechnung wird durch das Zählverfahren beeinflusst. Für die Lebensdauerberechnung und Erfassung von lokalen Spannungs-Dehnungs-Hystereseverläufen eignet sich nach Bertsche und Köhler bevorzugt die Rainflow-Methode.

Als zweiparametrisches Zählverfahren erfasst die Rainflow-Methode die Anzahl geschlossener Hysterese-Schleifen eines Belastungs-Zeit-Verlaufs. Eine nicht geschlossene Hysterese wird als Residuum abgelegt. Ausgehend von dem auf die Umkehrpunkte reduzierten Verlaufs erfolgt die Zählung und Klassierung als Ober- und Unterwert oder Amplitude und Mittelwert in einer Rainflow-Matrix, siehe Bild 2.12.

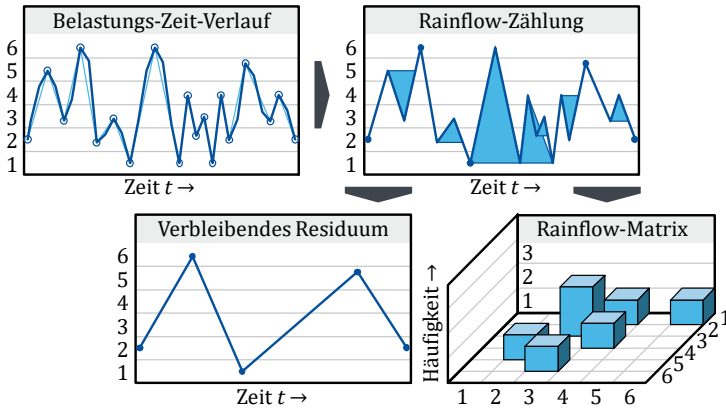


Bild 2.12: Zählverfahren nach Rainflow-Methode in Anlehnung an Haibach [106]

Schädigungstheorie

Die Lebensdauerberechnung in der Betriebsfestigkeitslehre basiert nach Köhler [107] auf drei unterschiedlichen Grundkonzepten:

- Nennspannungskonzept → makroskopischer Anriss bzw. Bruch
- örtliches Konzept → makroskopischer Anriss
- Bruchmechanik Konzept → makroskopischer Rissfortschritt

Innerhalb des am häufigsten verwendeten und einfachsten Nennspannungskonzepts wird die Schädigung durch den Ermüdungsvorgang im Bauteil pauschal betrachtet, d. h. sie unterliegt keinen spezifischen Schädigungsmechanismen [106]. Die tatsächliche Spannungsverteilung im Querschnitt wird nicht erfasst. Diese Vereinfachung muss für den Anwendungsfall geprüft werden. Eine Kombination mit örtlichen Konzepten ist möglich und verbessert die Aussagefähigkeit. Das Bruchmechanik Konzept wird nach Auftreten eines Risses oder mangels eines Nennquerschnitts relevant. Die Anwendung zur Lebensdauerberechnung im Maschinenbau ist begrenzt.

Sind die Wöhler-Kurve und das Lastkollektiv des Bauteils bekannt, ist ein Verfahren zur Ermittlung der Gesamtschädigung erforderlich. Die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren [108] und Miner [109] hat sich dazu bewährt. Zur Berechnung der Lebensdauer wird, wie von Wächter [110] et al. beschrieben, für jede Stufe des Lastkollektivs eine Teilschädigung bestimmt. Diese ergibt sich als Quotient aus den auftretenden Schwingspielen n_i und den ertragbaren Schwingspielen N_i auf der jeweiligen Stufe. Die Gesamtschädigung des Kollektivs S_{Koll} wird durch Summation der Teilschädigungen jeder Stufe nach Gleichung (2.3) gebildet.

$$S_{Koll} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.3)$$

Ein Versagen tritt ein, wenn die Gesamtschädigung den theoretischen Grenzwert eins erreicht hat. Demnach lässt sich über den Kehrwert die Anzahl an Zyklen ermitteln, die maximal ertragbar ist. Aufgrund von Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelter Werte der Lebensdauer wurden Modifikationen zur Berücksichtigung von Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit vorgeschlagen. Dabei wird gegebenenfalls ein von k abweichender Wöhler-Exponent angenommen. Die Modifikationen und die Schadensakkumulation sind in Bild 2.13 dargestellt.

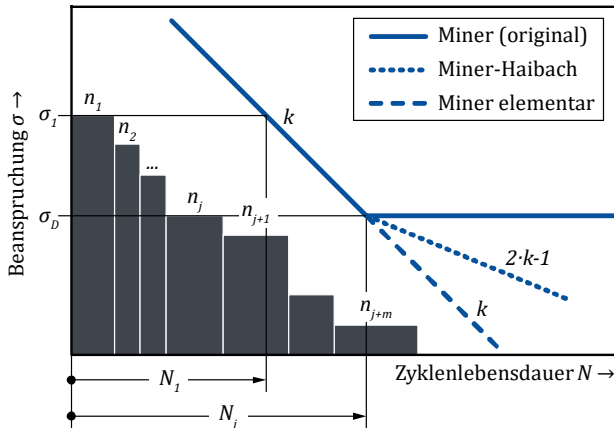


Bild 2.13: Schadensakkumulation und Modifikation der Miner-Regel in Anlehnung an Bertsche [9] und Köhler [107]

Die Schwingspiele einer Einstufen-Beanspruchung oberhalb der Dauerfestigkeit lassen sich anhand von Gleichung (2.4) ermitteln.

$$N_j = N_D \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_D} \right)^{-k} ; \quad \sigma_j \geq \sigma_D \quad (2.4)$$

Die zu erwartende Zyklenzahl gilt abhängig von der genutzten Wöhlerlinie für ein bestimmtes Lebensdauerquantil, wie in Bild 2.11 verdeutlicht. Unterhalb der Dauerfestigkeit ist der Exponent je nach Modifikation anzupassen.

2.5.2 Zuverlässigkeit adaptronischer Systeme

Der Einsatz adaptiver Tragwerke und die damit verbundene, in Abschnitt 2.3.3 erläuterte Funktionsintegration bzw. Multifunktionalität, erfordern eine differenziertere Betrachtung der Zuverlässigkeit als momentan im Bauwesen üblich. Im beispielhaften Fall einer aktiven Tragwerksstütze, die sich nicht mehr aktivieren lässt, ist der Lastabtrag und damit die Tragfähigkeit für gewisse Lasten weiterhin erfüllt. Für die Funktion der Aktivierung des Tragwerks, z. B. zur Schwingungsdämpfung, wird dagegen erst die Anforderung der Funktion das Versagen offenbaren. Zur Analyse dieser Systeme identifiziert Jäger [99] Kriterien die durch geeignete Modellierungsmethoden abgedeckt sein sollten:

- Reparierbarkeit
- Anzahl der Fehlfunktionen
- Art der Verschaltung
- Multifunktionalität
- vorhandene, gebundene/passive Redundanz.

Adaptive Tragwerke mit langen Lebensdauern erfordern die Berücksichtigung von reparierbaren bspw. elektronischen Elementen zur Erhaltung der Systemzuverlässigkeit. Die Multifunktionalität macht die Betrachtung verschiedener Funktionen notwendig, wodurch jede Funktion modelliert werden muss. Die Zuverlässigkeit ist in diesem Fall als Wahrscheinlichkeit für den Erhalt der untersuchten Funktion zu verstehen und nicht als Wahrscheinlichkeit für den Erhalt der Systemfunktion. Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit ist die Verschaltung der Komponenten des Systems relevant, um vorhandene Redundanzen in der Analyse zu berücksichtigen. Die gebundene Redundanz beschreibt dabei, ob ein redundantes Element bereits durch eine Funktionsübernahme, ausgelöst durch einen Fehler, belegt ist und im Fall eines zweiten Fehlers daher nicht als Redundanz zur Verfügung steht. Passive Redundanz liegt vor, wenn ein redundantes Element erst an der Funktionsausführung beteiligt wird, wenn der Fehler auftritt.

Die Anforderungen an Modellierung und Nachweis der Zuverlässigkeit adaptiver Tragwerke erfordern ein Vorgehen zur Auslegung auf Grundlage des Maschinenbaus, das nachfolgend beschrieben wird.

2.5.3 Zuverlässigkeitsprozess im Maschinenbau

Zur Analyse des Systemausfallverhaltens bildet der in Bild 2.14 dargestellte Prozess in Anlehnung an Bertsche [9] die Grundlage. Die Detaillierung erfolgt abhängig vom Informationsgehalt der Entwicklungsphase.

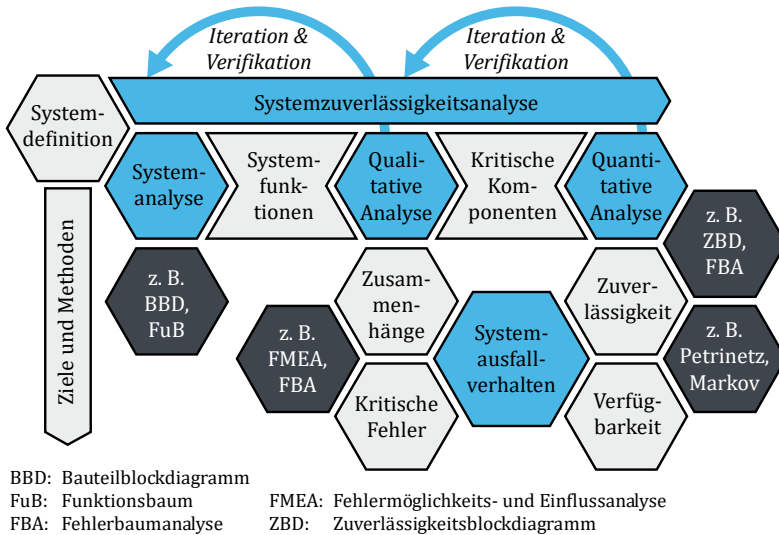


Bild 2.14: Systemzuverlässigkeitsanalyse in Anlehnung an Bertsche [9]

Durch Iteration und Verifikation wird der entwicklungsbegleitende Prozess systematisch detailliert. Die Darstellung, Modellierung und Auswertung beginnt in der Systemanalyse zunächst mit einer Systemübersicht, meist in Form eines Bauteilblockdiagramms (BBD) und eines Funktionsbaums (FuB). Qualitative Analysen der Systemfunktionen erfolgen z.B. mittels einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) oder der qualitativen Fehlerbaumanalyse (FBA). Die quantitative Analyse mittels Boole'scher Systemtheorie lässt sich sowohl mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) als auch mit der quantitativen FBA durchführen. Die FBA kann gegenüber dem ZBD multifunktionale Komponenten abbilden und ist zudem übersichtlicher bei komplexen Systemen. Für reparierbare Systeme sowie Systeme mit

gebundener oder passiver Redundanz werden zustandsbasierte Modellierungsmethoden wie z. B. Petrinetze oder Markov-Graphen benötigt. Die Methode nach Markov sieht eine analytische Berechnung mit konstanten Ausfallraten vor. Eine numerische Auswertung von Petrinetzen erfolgt durch wiederholte stochastische Monte-Carlo-Simulation, da bei hinreichender Wiederholung, gemäß dem Gesetz der großen Zahlen, die Häufigkeit in eine Wahrscheinlichkeit übergeht [111].

2.5.4 Methoden der Analyse, Bewertung und Berechnung

Zur Analyse der Systemzuverlässigkeit ist ein grundlegendes Systemverständnis erforderlich. Auf der Systemanalyse aufbauend haben sich qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsmethoden etabliert. Qualitative Methoden dienen der systematischen Untersuchung von Fehlern und Ausfällen. Die Berechnung der Zuverlässigkeit ist Gegenstand der quantitativen Methoden, für die eine mathematische Beschreibung der Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit erfolgt. Die Verteilungsfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Lebensdauer T_L einer Einheit eine betrachtete Betriebsdauer t nicht erreicht, also vorher ein Ausfall auftritt:

$$F(t) = P(T_L \leq t) \quad (2.5)$$

Das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit ist die Zuverlässigkeit $R(t)$. Sie ist die Eigenschaft einer Einheit beschrieben durch die Wahrscheinlichkeit, dass eine neu in Betrieb genommene Einheit unter gegebenen Bedingungen während der betrachteten Betriebsdauer ohne eine Reparatur seine Funktion erfüllt, d.h. nicht ausfällt [112]:

$$R(t) = P(T_L > t) = 1 - F(t) \quad (2.6)$$

Für die Charakterisierung der Lebensdauerverteilung eignet sich die Beschreibung als Verteilungsfunktion nach Weibull. Zufällig verteilte Ausfälle lassen sich damit ebenfalls modellieren, werden hingegen häufig durch eine Exponentialverteilung beschrieben [9]. Ausgehend von der Häufigkeitsverteilung der Ausfälle lässt sich die Ausfalldichte $f(t)$ bestimmen. Daraus ergibt sich die Ausfallrate $\lambda_A(t)$, welche das Ausfallrisiko einer Einheit, die bis zum Zeitpunkt t überlebt hat, darstellt:

$$\lambda_A(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.7)$$

Qualitative und quantitative Methoden unterscheidet Bertsche [9] daher auch in Ausfallarten- und Ausfallratenanalyse. Nachfolgend sind die Methoden erläutert.

Funktionsbaum

Zur Analyse der Funktionen bzw. Fehlfunktionen wird der Aufbau eines Funktionsbaums durch Untergliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, wie in Bild 2.15 dargestellt, genutzt.

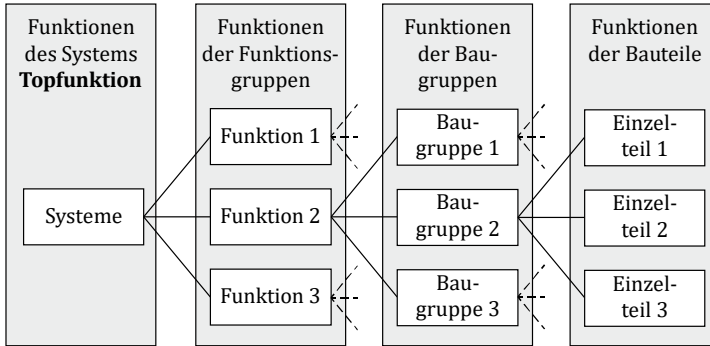


Bild 2.15: Funktionsstruktur nach Pahl/Beitz [113]

Eine Aufteilung kann durch Unterscheidung in Haupt- und Nebenfunktionen erfolgen. Hauptfunktionen dienen unmittelbar der Erfüllung der Topfunktion, während Nebenfunktionen unterstützend bzw. ergänzend wirken.

Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD)

Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) dient der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse basierend auf Boole'scher Algebra. Die einzelnen Komponenten eines Systems werden durch Blöcke ersetzt und zu einem Systemmodell verknüpft. Vom Eingang E zum Ausgang A werden die Komponenten zu Erfolgspfaden verbunden. Die Komponenten befinden sich entweder in einem funktionierenden („Klarzustand“ $x/1$) oder einem ausgefallenen Zustand („Unklarzustand“ $\bar{x}/0$). Sind alle Erfolgspfade durch Ausfall der Komponenten unterbrochen, tritt der Ausfall der Systemfunktion ein. Unterschiedliche Betriebsarten erfordern ein separates ZBD. Die quantitative Auswertung erfolgt meist mittels Boole'scher Algebra, wobei die Komponenten sich hierfür in ihrem Ausfallverhalten nicht gegenseitig beeinflussen dürfen und die Reihenfolge in der die Komponenten ausfallen nicht von Belang sein darf. Bild 2.16 zeigt die einfachsten Möglichkeiten zur Verknüpfung von zwei Komponenten C1 und C2 und den Bezug zur Zuverlässigkeit nach Bertsche [9].

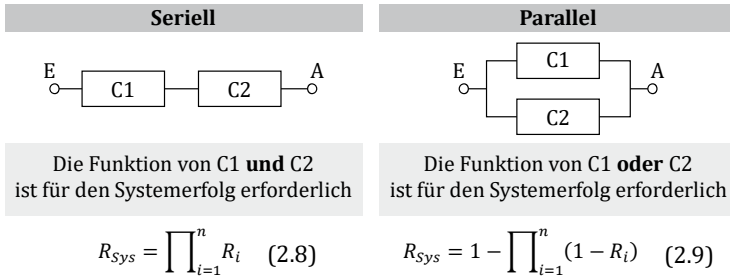


Bild 2.16: Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) nach [9]

Fehlerbaumanalyse (FBA)

Ein sowohl zur qualitativen als auch quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse eingesetztes Instrument ist die Fehlerbaumanalyse (FBA), die als Fehlzustandsbaumanalyse in der DIN EN 61025 [114] standardisiert ist. Ausgehend von einem Hauptereignis als kritischer Systemzustand werden die Bedingungen für das mögliche Auftreten desselben untersucht. Logische Verknüpfungen der Systemkomponenten beschreiben das Eintreten des Hauptereignisses und ergeben einen Fehlerbaum. Die wichtigsten Gatter sind in Bild 2.17 dargestellt.

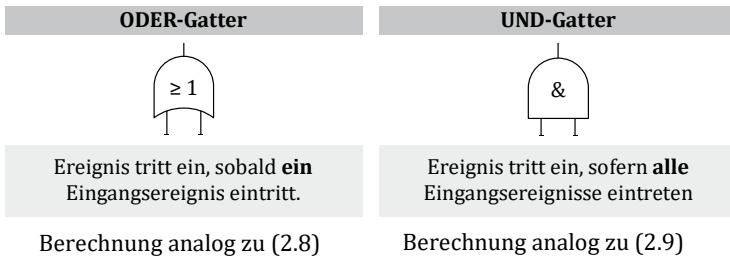


Bild 2.17: Symbole des Fehlerbaums nach [114]

Bei der qualitativen Analyse steht die Untersuchung von Kombinationen von Komponentenausfällen, die zum Eintreten des Hauptereignisses führen im Vordergrund. In der quantitativen Analyse werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten berücksichtigt. Dadurch lassen sich kritische Fehlerpfade ermitteln und die Eintrittswahrscheinlichkeit des Hauptereignisses berechnen. Die Ausfallereignisse werden

durch Textfelder beschrieben und durch Gatter verknüpft. Ausgehend von der Topfehlfunktion werden die Fehlfunktionen, die zum Eintritt der Topfehlfunktion führen bis auf Einzelteilfunktionsebene entwickelt.

Petrinetze und Monte-Carlo-Simulation

Petrinetze werden zur expliziten Modellierung von Prozessen und deren dynamischer Veranschaulichung eingesetzt. Eine Weiterentwicklung zur Zuverlässigkeitsanalyse beschrieben von Pozsgai [115] stellen die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (engl.: Extended Colored Stochastic Petri Nets, ECSPN) dar. Die Modellierung von Systemen erfolgt mittels Marken, Stellen, Kanten und Transitionen. Stellen werden durch Kanten mit Transitionen verbunden. Abhängig von den Marken führen die Transitionen Schaltvorgänge aus. Ist eine Stelle mit einer Transition über eine Normalkante verbunden, so erfolgt ein Schaltvorgang wenn die Eingangsstelle mindestens die Anzahl an Marken aufweist, die durch das Kantengewicht vorgegeben ist. Die Markenanzahl wird beim Schalten um das Kantengewicht reduziert. Nach dem Schalten der Transition werden in der Ausgangsstelle Marken entsprechend dem Kantengewicht platziert. Die Transitionen können in unmittelbar schaltende oder zeitbehaftete Transitionen unterschieden werden. Bei einer unmittelbaren Transition findet der Schaltvorgang, vorausgesetzt es sind alle Bedingungen erfüllt, umgehend statt. Der Schaltvorgang einer zeitbehafteten Transition wird bei Aktivierung nach einer bestimmten Zeitdauer oder Zufallsgröße aus einer Verteilungsfunktion ausgeführt. Mit Hilfe von Lesekanten kann der Zustand einer Stelle ohne Verringerung von Marken abgefragt werden. Zur Vereinfachung des Aufbaus werden Referenzstellen zur Verknüpfung einer Stelle eingesetzt. Ein einfaches Petrinetz ist in Bild 2.18 dargestellt.

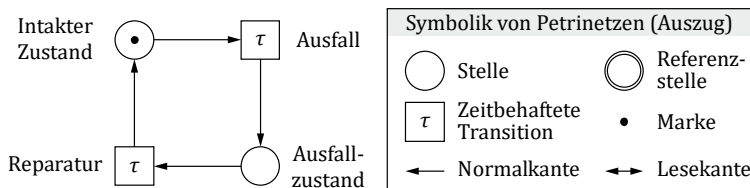


Bild 2.18: Einfaches Petrinetz mit Reparatur

Die Petrinetze dienen der dynamischen Modellierung des Systems. Die Analyse erfolgt durch Monte-Carlo-Simulation. Für komplexe Systeme mit umfangreichen Wechselbeziehungen kann damit numerisch ein Erwartungswert einer Zufallsgröße ermittelt werden. Der Erwartungswert wird als arithmetischer Mittelwert für N unabhängige

Ergebnisse der Zufallsgröße abgeschätzt. Bei einer entsprechend großen Anzahl an Wiederholungen ($N \rightarrow \infty$) ergibt sich eine asymptotisch erwartungstreue Schätzung [116]. Petrinetze ermöglichen die Modellierung temporaler Ereignisse und Abhängigkeiten, insbesondere der Reparatur von Komponenten und Systemen. Damit lassen sich Verfügbarkeiten berechnen, die aus dem Quotienten der Funktionsfähigkeit bezogen auf die Gesamtzeit der Systembetrachtung resultieren [117].

Durch gestiegenen Wettbewerbsdruck und verstärkten Leichtbau ist die Zuverlässigkeit technischer Systeme zu einem wichtigen Teilgebiet in der Produktentwicklung avanciert. Eine exaktere Auslegung auf die Produktlebensdauer wurde durch beständigere Materialqualität, bessere Simulationsmethoden, effizienteres Testen und der Auswertung und Berücksichtigung von Felddaten möglich. Im Maschinenbau steht daher der Nachweis der Mindestzuverlässigkeit durch Näherung von der Underdimensionierungsseite aus Wirtschaftlichkeitsgründen im Vordergrund. Hohe erforderliche Sicherheiten, die im Bauwesen durch eine hohe Zuverlässigkeit erreicht werden, erfordern dort eine Auslegung von der Überdimensionierungsseite zur Kompensation von Unsicherheiten. Die Übernahme von Funktionen der bisher rein mechanischen Tragstruktur durch ein adaptives System bei adaptiven Tragwerken, bedingt eine Absicherung der Funktionalität, um die Sicherheit solcher Bauwerke zu gewährleisten. Eine Überdimensionierung der Funktion ist nicht möglich, weshalb auf Methoden des Maschinenbaus zurückgegriffen werden muss.

2.6 Grundlagen der Sicherheitsbetrachtung

Nach Spaethe [118] ist die Sicherheit herkömmlicher Tragwerke, wie zuvor in Bild 2.9 gezeigt, im Wesentlichen durch den Sicherheitsabstand der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit bestimmt. Das Risiko ergibt sich aus der Unbekanntheit der Verteilungen in der statistischen Berechnung und der damit verbundenen Ungewissheit. Ein Versagen ist nicht auszuschließen, wodurch weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen. Dazu gehört der Einsatz von Werkstoffen mit großem Verformungsvermögen oder einer sichtbaren Rissbildung, um eine Ankündigung des Versagens bspw. durch übermäßige Verformung zu erreichen. Durch konservative Berechnungswerte auf Belastungs- und Belastbarkeitsseite, die sehr selten über- oder unterschritten werden, wird eine hohe Sicherheit erzeugt. Die intransparente Akkumulation von Sicherheitswerten ist nach Spaethe ein Nachteil dieses Verfahrens. Hinzu kommt die Festlegung der Sicherheitswerte in den Normen, die auf der Grundlage der Erfahrung mit Orientierung an der Wirkung und nicht auf den kausalen Zusammenhängen

basieren. Redundante Konstruktionen können im Versagensfall gewisse Reserven bieten.

In Anbetracht der anfallenden Überdimensionierung für seltene Lastfälle ermöglicht der Einsatz adaptiver Strukturen die Kompensation der Lasten durch adaptive Anpassung und nicht durch Materialmehrverbrauch. Da sich der Aufbau adaptiver Tragwerke stark von herkömmlichen passiven Tragwerken durch Komponenten wie Aktoren, Sensoren und Regelung unterscheidet, ist eine über den Eurocode hinausgehende Sicherheitsanalyse erforderlich.

Bei Zuverlässigkeitsbetrachtungen wird die Funktionsfähigkeit über der Lebensdauer untersucht. Sicherheitsbetrachtungen erfolgen mit dem Ziel der Minimierung des Risikos für eine Gefährdung und deren Auswirkung auf ein akzeptables Niveau. Das Risiko beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens kombiniert mit dessen Ausmaß [119]. Die Grafik in Bild 2.19 zeigt den Zusammenhang der Zuverlässigkeit mit der Betriebssicherheit und die resultierende Schnittmenge der funktionalen Sicherheit nach Nowizki [120].

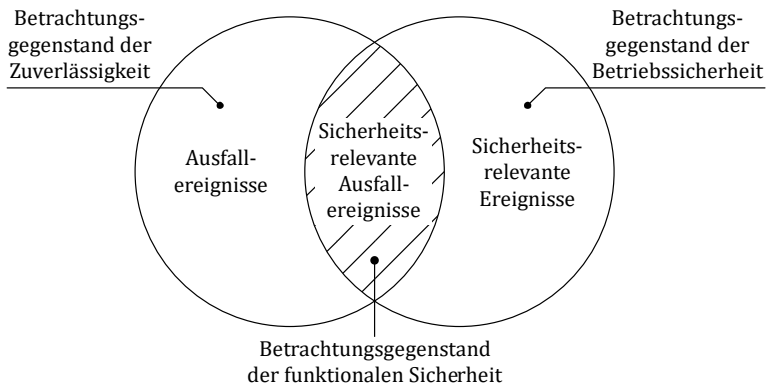


Bild 2.19: Abgrenzung von Sicherheit und Zuverlässigkeit nach [120]

Zuverlässigkeitsrelevante Ereignisse sind Ausfälle und damit verbundener Funktionsverlust, während sicherheitsrelevante Ereignisse in unsicherem Verhalten mit Gefährdungspotential resultieren. Die Schnittmenge enthält die Ereignisse in denen ein Ausfall den Verlust der Funktionsfähigkeit und eine mögliche Gefährdung mit sich bringt. Bei herkömmlichen Tragwerken überlagern sich beide Mengen zu einer vollständigen Schnittmenge, da Ausfälle und Versagen gleichbedeutend und damit

sicherheitsrelevant sind. Die Größe der Schnittmenge hängt von der Sicherheitsfunktion ab [120] und ist Gegenstand der Betrachtung der funktionalen Sicherheit nach DIN EN 61508 [121], die nachfolgend erläutert wird.

2.6.1 Funktionale Sicherheit nach EN 61508

Teil 4 der DIN EN 61508 zur Analyse der funktionalen Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme (E/E/PE-Systeme) [101] definiert Grundbegriffe, die im Folgenden zur Analyse adaptiver Tragwerke erläutert werden.

Je nach Grad der Funktionsübernahme des adaptiven Systems zur Manipulation der Steifigkeits-, Festigkeits- oder Dauerfestigkeitseigenschaften adaptiver Tragwerke erfüllt dieses eine Sicherheitsfunktion. Durch den Ausfall der Sicherheitsfunktion ist ein unmittelbarer Anstieg des Risikos gegeben. Der Begriff „Fehler“ wird in dieser Arbeit in seiner Definition nach DIN EN 61508 verwendet und bezeichnet den nicht normalen Zustand einer Einheit, in dem sie nicht oder nur in vermindertem Maße zu einer Funktionserfüllung fähig ist. Der Unterschied zur Definition des „Ausfalls“ nach DIN 40041 aus Abschnitt 2.5 besteht darin, dass der Ausfall das Ereignis bezeichnet. Eine hinreichende Risikominderung zielt darauf ab das Risiko unter Beachtung des Stands der Technik so zu minimieren, dass es mindestens den gesetzlichen Anforderungen genügt. Das verbleibende Restrisiko ist das Risiko, welches über die getroffenen Schutzmaßnahmen hinaus noch besteht. Die Schutzmaßnahmen dienen der Minderung des Risikos. Die Risikobewertung gibt Aufschluss über das Erreichen der Ziele zur Risikominderung.

Im Mittelpunkt steht die Gefährdung als potentielle Schadensquelle, die entweder dauerhaft durch die Benutzung vorhanden ist oder unerwartet auftreten kann. Der Schaden äußert sich im Sinne einer physischen Verletzung oder einer Gesundheitsschädigung bzw. als Schaden von Gütern oder der Umwelt. Schutzmaßnahmen sind nach DIN EN 61508 im Wesentlichen technische Systeme. Weitere inhärent sichere Konstruktionen z. B. das Fail-Safe-Prinzip sind nicht definiert, eine zusätzliche Absicherung hierüber wird aber eingeräumt. Aspekte von inhärent sicheren Konstruktionen sind in der Grundlagennorm DIN EN ISO 12100 [122] und als Konstruktionsbeispiele z. B. von Neudörfer [123] definiert.

Als technische Schutzmaßnahme unterliegt die Sicherheitsfunktion durch programmierbare elektronische Systeme besonderen Anforderungen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems aufgrund systematischer und zufälliger Ausfälle der Hardware

muss ausreichend gering sein. Die Leistung der sicherheitsrelevanten Steuerungsfunktion darf nicht beeinträchtigt sein, was für jede Sicherheitsfunktion durch Entwicklung nach Anforderungen eines festgelegten Sicherheitsintegritätsniveaus (engl.: Safety Integrity Level, SIL) garantiert wird. Dabei stellt SIL 1 die geringsten Anforderungen an die Sicherheitsintegrität und SIL 4 die höchsten. Eine mit QM bezeichnete Abstufung kann unterhalb SIL 1 eine durch Qualitätsmaßnahmen erreichbare Absicherung darstellen. Neben einer geringen Ausfallwahrscheinlichkeit ist das ordnungsgemäße Zusammenarbeiten der Komponenten ohne unbeabsichtigte Funktionen nachzuweisen. Die Strategie zur Risikobeurteilung und Risikominderung gliedert sich in die in Bild 2.20 gezeigten Schritte.

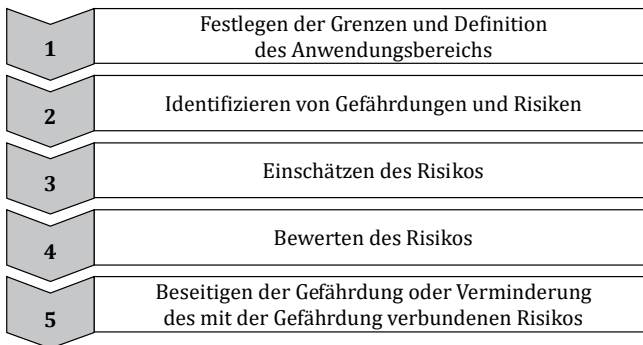
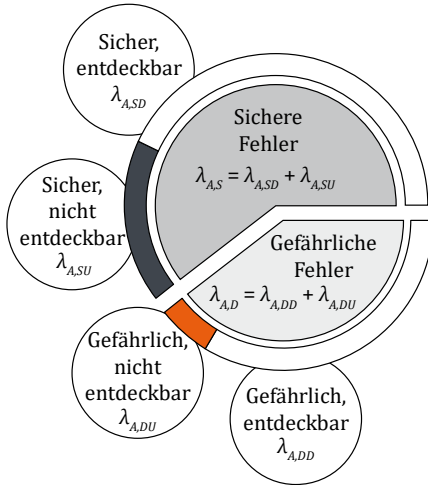


Bild 2.20: Schritte einer Sicherheitsanalyse nach [113]

Als Methode zur Identifikation und Bewertung der Risiken wird häufig der qualitative Risikograph verwendet. Dazu erfolgt eine Bewertung abhängig von den Parametern der Auswirkung des Vorfalls (C), der Häufigkeit und Aufenthaltsdauer (F), der Möglichkeit einer Vermeidung des Vorfalls (P) und der Wahrscheinlichkeit für das unerwünschte Ereignis (W). Für die quantitative Bewertung sind Ausfallarten und Ausfallraten erstere z. B. mittels einer FMEA und letztere aus Versuchen oder Literatur zu ermitteln.

Maßgeblich ist die Aufteilung der Ausfallrate in sichere $\lambda_{A,S}$ und gefährliche Fehler $\lambda_{A,D}$. Diagnosemaßnahmen werden über den Diagnosedeckungsgrad DC (engl.: Diagnostic Coverage) erfasst. Dieser beschreibt den Anteil gefahrbringender, diagnostizierbarer Ausfälle $\lambda_{A,DD}$ im Verhältnis zur Gesamtzahl aller gefährlichen Ausfälle $\lambda_{A,D}$. Es verbleiben die nicht durch Diagnose entdeckbaren gefährlichen Fehler $\lambda_{A,DU}$.



Diagnosedeckungsgrad:

$$DC = \frac{\sum \lambda_{A,DD}}{\sum \lambda_{A,D}} \quad (2.10)$$

Niedrig: DC = 60 %

Mittel: DC = 90 %

Hoch: DC = 99 %

Anteil sicherer Fehler *SFF*
(engl.: Safe Failure Fraction)

$$SFF = \frac{\sum \lambda_{A,S} + \sum \lambda_{A,DD}}{\sum \lambda_{A,S} + \sum \lambda_{A,D}} \quad (2.11)$$

Bild 2.21: Aufteilung der Ausfallrate nach [124] sowie DC und SFF nach [119]

In Bild 2.21 ist die Aufteilung der Ausfallrate grafisch veranschaulicht. Für Möglichkeiten der Diagnose und des erzielbaren Diagnosedeckungsgrads wird auf EN 61508-2 [125] verwiesen. Die grundlegende Unterscheidung erfolgt in „niedrig“, „mittel“ und „hoch“. Der Anteil sicherer Fehler *SFF* (engl.: Safe Failure Fraction) eines Elements nach Gleichung (2.11) dient als Anforderung je nach Hardware-Architektur und ist abhängig vom erforderlichen SIL. In der EN 61508 sind hierzu Vorgaben an das Gesamtsystem und die Komponenten definiert. Aus Tabelle 2.1 geht hervor, welche Hardwarefehlertoleranz (HFT) bestehen muss, um bei gegebenem Anteil sicherer Fehler der Komponenten die SIL Einstufung zu erreichen.

Tabelle 2.1: Maximal zulässiger SIL je SFF und HFT nach [125]

Anteil sicherer Ausfälle (SFF)	Typ A			Typ B		
	Hardwarefehlertoleranz			Hardwarefehlertoleranz		
	0	1	2	0	1	2
< 60 %	SIL 1	SIL 2	SIL 3	Nicht erlaubt	SIL 1	SIL 2
60 % ... < 90 %	SIL 2	SIL 3	SIL 4	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90 % ... < 99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4	SIL 2	SIL 3	SIL 4
≥ 99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Unterschieden werden Typ A und Typ B Elemente. Erstere erfordern umfassende Ausfalldaten mit bekanntem Ausfallverhalten aller verwendeten Bauteile. Typ B Elemente zeichnen sich durch unzureichend vorhandene Ausfalldaten aus. Bei gegebener Hardwarefehlertoleranz ergeben sich hardwarebedingte Ausfälle durch gemeinsame Ursache (engl.: Common Cause Failure). Diese können nach EN 61508-6 [126] anhand eines Punktesystems mittels des β_A -Faktors berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung *PF_D* (engl.: Probability of Failure on Demand) sind zudem die Mittlere Reparaturdauer *MRT* (engl.: Mean Repair Time) und die Mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung ab Auftreten des Ausfalls *MTTR* (engl.: Mean Time To Repair) festzulegen. Die im Intervall T_I erfolgende Wiederholungsprüfung des Systems ermöglicht die Erkennung von unentdeckten, gefahrbringenden Ausfällen, um durch Reparatur einen mit dem Neuzustand vergleichbaren Zustand wiederherzustellen. Hieraus ergibt sich die mittlere Ausfalldauer eines Kanals t_{CE} bzw. bei $HFT > 0$ die Ausfalldauer des Subsystems t_{GE} . Für die Berechnung der *PF_D* weiterer Hardwarearchitekturen wird auf EN 61508-6 [126] verwiesen.

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{A,DU}}{\lambda_{A,D}} \left(\frac{T_I}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{A,DD}}{\lambda_{A,D}} MTTR \quad (2.12)$$

$$PF_{D_{1001}} = (\lambda_{A,DU} + \lambda_{A,DD}) t_{CE} \quad (2.13)$$

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{A,DU}}{\lambda_{A,D}} \left(\frac{T_I}{3} + MRT \right) + \frac{\lambda_{A,DD}}{\lambda_{A,D}} MTTR \quad (2.14)$$

$$PF_{D_{1002}} = 2 \left((1 - \beta_{A,D}) \lambda_{A,DD} + (1 - \beta_A) \lambda_{A,DU} \right)^2 t_{CE} t_{GE} + \beta_{A,D} \lambda_{A,DD} MTTR + \beta_A \lambda_{A,DU} \left(\frac{T_I}{2} + MRT \right) \quad (2.15)$$

$PF_{D_{sys}}$ ergibt sich schließlich aus der Summe der Subsysteme Sensorik, Logik und Stellglieder sowie Energieversorgung und muss innerhalb des zulässigen Wertebereichs des nach EN 61508-1 [121] geforderten Sicherheitsintegritätslevels liegen.

3 Bemessung im Bauwesen und Auslegung im Maschinenbau

Die Aktivierung von Tragwerken ist im Bauwesen seit längerem Gegenstand der Forschung. Mit Hilfe unterschiedlicher Aktivierungsprinzipien sollen Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit oder Dauerfestigkeit des Tragwerks manipuliert werden. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, fokussiert sich die Forschung vornehmlich auf die grundsätzliche Eignung adaptiver Tragwerke zur Kompensation von Lasten und hierzu auf den Entwurf geeigneter Regler. Erforderliche Eigenschaften werden durch das adaptivische System, bestehend aus Aktoren, Sensoren und Regelung, sichergestellt. Hieraus ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen Tragstruktur und Adaptronik, die in der Auslegung adaptiver Tragwerke berücksichtigt werden muss.

Die Auslegung herkömmlicher passiver Tragwerke erfolgt nach den Eurocode Normteilen, vorgestellt in Abschnitt 2.4. Eine darin festgelegte Bemessung mittels statischer Ersatzlasten und Teilsicherheitsfaktoren dient der Absicherung der Tragstruktur gegen Tragwerksversagen. Durch Vorgabe eines Zuverlässigkeitsindex wird ein Überschreiten der Belastbarkeit durch die Belastung vermieden und eine ausreichende Sicherheit erreicht. Die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit bestehen für adaptive Tragwerke in gleichem Maße wie für herkömmliche passive Tragwerke. Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben ist dabei eine Differenzierung unter Einbezug von Methoden des Maschinenbaus erforderlich.

Einer hohen Zuverlässigkeit gegenüber steht die Nachhaltigkeit in Form der Umweltwirkung des Tragwerks, eingeführt in Abschnitt 2.1. Die Aktivierung von Hochhaus-Tragwerken geschieht mit dem Kerngedanken eine Überdimensionierung durch die Bemessung für dezidierte Grenzzustände mittels Aktivierung zu kompensieren und dadurch eine Materialersparnis und somit einen Nachhaltigkeitszuwachs zu erzielen. Hierfür sind die Berechnung und Bewertung der wesentlichen Auslegungsgrößen adaptiver Tragwerke erforderlich, um eine Nachhaltigkeitsbilanz zu ziehen. Eine Verringerung der Materialquerschnitte bewirkt zudem eine höhere Anfälligkeit gegenüber äußeren Lasten, insbesondere wenn sich das adaptive Tragwerk für schwächere Lasten rein passiv verhält. Aufgrund der Unwirtschaftlichkeit von Tests ist das Ermüdungsverhalten des Tragwerks simulativ durch repräsentative Lastkollektive zu bewerten. In den bestehenden Untersuchungen zu adaptiven Tragwerken aus Abschnitt 2.3 sind die Zusammenhänge der Zuverlässigkeit und Sicherheit unberücksichtigt.

Die Ableitung von Anforderungen anhand der Auslegung von passiven Tragwerken nach Eurocode stellt das Ziel dieses Kapitels dar. Dazu werden Anforderungen an passive Tragwerke analysiert, sowie deren Übertragbarkeit auf adaptive Tragwerke untersucht. Zunächst folgt aus dem Stand der Technik die Ableitung der Forschungsfrage, die die Motivation dieser Arbeit darstellt und den Forschungsbedarf präzisiert.

3.1 Forschungsfrage

Wie durch den Stand der Forschung und Technik ausgewiesen, erfordert der Einsatz adaptiver Tragwerke eine differenzierte Bewertung von Zuverlässigkeit und Sicherheit, die über die Analysen des Eurocode hinaus geht und seither vernachlässigt wurde. Der Zielkonflikt einer hohen Zuverlässigkeit gegenüber einer gesteigerten Umweltwirkung muss überdies bewertet werden und ein Vergleich zu passiven Tragwerken möglich sein. Der vorliegenden Arbeit liegt daraus abgeleitet die folgende zentrale Forschungsfrage zugrunde:

Wie lassen sich Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke durch eine Methode zur Auslegung bewerten und sicherstellen?

Ausgehend von der Forschungsfrage ergeben sich die folgenden Hypothesen:

1. Die Auslegung adaptiver Tragwerke unterscheidet sich von der Auslegung passiver Tragwerke in der Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit.
2. Der Zusammenhang von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit ist innerhalb einer Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke neu zu bewerten.
3. Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit können durch die neue Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke gewährleistet werden.

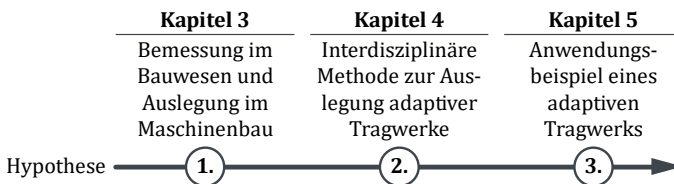


Bild 3.1: Kapitelaufteilung der vorliegenden Arbeit anhand der Hypothesen

Die Hypothesen strukturieren das weitere Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfrage innerhalb dieser Arbeit und die Aufteilung der anschließenden Kapitel, wie in Bild 3.1 veranschaulicht. Der Nachweis der ersten Hypothese ist in Kapitel 3 durch eine Analyse der Bemessung passiver Tragwerke nach Eurocode dargelegt. Zur Kompensation von Unzulänglichkeiten in der Auslegung im Hinblick auf adaptive Tragwerke werden Methoden des Maschinenbaus vorgestellt. Die Ableitung von Anforderungen an eine Auslegungsmethode stellt das Ziel dieses Kapitels dar. In Kapitel 4 erfolgt die Entwicklung der Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke und die Beantwortung der zweiten Hypothese. Die Anforderungen aus Kapitel 3 bilden die Grundlage für die zu entwickelnde Methode in Kapitel 4. Die Aussage der dritten Hypothese lässt sich durch eine Validierung der Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke durch Anwendung an einem adaptiven Beispieltragwerk überprüfen. Hierzu wird in Kapitel 5 ein Anwendungsbeispiel vorgestellt. Zunächst folgt die Untersuchung der Auslegung von Tragwerken nach Eurocode.

3.2 Bemessung im Bauwesen nach Eurocode

Die im Bauwesen nach der DIN EN 1990, dem Eurocode 0 [8], durchgeführte Bemessung beinhaltet die Dimensionierung der Bauteilquerschnitte und ist Teil der Auslegung von Tragwerken. Ausgehend von einem Tragwerksentwurf wird die Dimensionierung so angepasst, dass die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit bzw. erforderliche Zuverlässigkeit für einen Grenzzustand erreicht wird. Der dafür erforderliche Sicherheitsabstand zur Grenzzustandsfunktion wird durch den Zuverlässigkeitsindex β ausgedrückt. Der Grenzzustand lässt sich im einfachsten Fall durch die Beziehung des Bemessungswerts der Auswirkung der Einwirkung E_d kleiner oder gleich dem des Widerstands R_d ausdrücken. Die Auswirkung der Einwirkung entspricht der Beanspruchung oder der Reaktion des Tragwerks durch Biegen oder Verdrehen. Der Widerstand ist abhängig von den Materialeigenschaften.

$$E_d \leq R_d \quad (3.1)$$

Die Bemessung erfolgt mittels Teilsicherheitsbeiwerten für die stochastischen Variablen, die Unsicherheiten im Modell, bei den Materialfestigkeiten und den repräsentativen Werten der Einwirkungen kompensieren. Die Grenzzustandsfunktion G lässt sich aus der Differenz der beiden Zufallsvariablen wie folgt formulieren:

$$G = R - E \quad (3.2)$$

Für $G < 0$ tritt Versagen ein, d. h. für eine Differenz aus Einwirkung und Widerstand von Null ist genau der Grenzzustand erreicht. Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f definiert sich über die Wahrscheinlichkeit, mit der innerhalb des Bezugszeitraums der Grenzzustand durch eine bestimmte Versagensart überschritten wird. Einwirkung und Widerstand sind stochastische Variablen. Hieraus ergibt sich eine Verteilung für die Grenzzustandsfunktion. Als Maß für die Zuverlässigkeit wird im Eurocode 0 der sogenannte Zuverlässigkeitsindex β eingeführt. Er beschreibt den Zusammenhang mit der Versagenswahrscheinlichkeit P_f . Über die kumulative Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung ϕ lässt sich diese wie folgt bestimmen:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (3.3)$$

Handelt es sich bei der Verteilungsfunktion von G um eine Normalverteilung beschrieben durch Mittelwert μ_G und Standardabweichung σ_G , ist β das Verhältnis aus μ_G/σ_G der Grenzzustandsfunktion. Daraus folgt für den Grenzzustand:

$$\mu_G - \beta \cdot \sigma_G = 0 \quad (3.4)$$

Der Zusammenhang für eine normalverteilte Grenzzustandsfunktion ist in Bild 3.2 dargestellt.

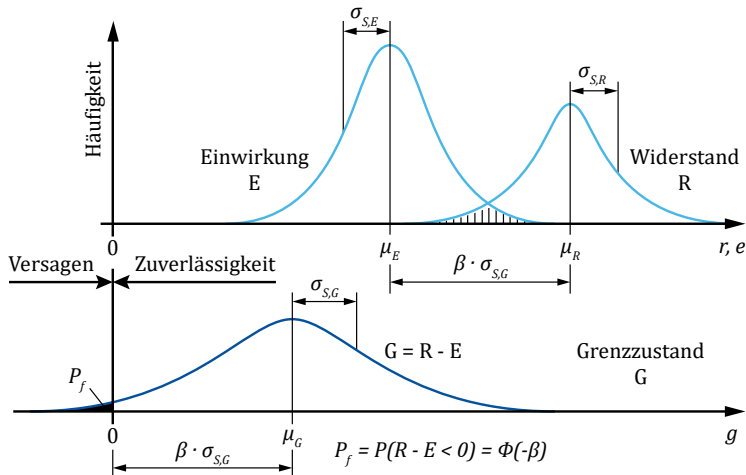


Bild 3.2: Zusammenhang von Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex bei normalverteilter Grenzzustandsfunktion in Anlehnung an Vogel [127]

Die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzzustands zu:

$$P_f = P(G < 0) = P(G < \mu_G - \beta \cdot \sigma_G) \tag{3.5}$$

Für eine nichtlineare Grenzzustandsfunktion oder beim Auftreten mehrerer oder zufällig verteilter Variablen ist für die Bemessung mit Zuverlässigkeitsindex zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit ein Näherungsverfahren notwendig. Im Bauwesen ist das Näherungsverfahren mittels Zuverlässigkeitsmethoden erster Ordnung (engl.: First Order Reliability Methods, FORM) üblich. Das Verfahren wird unter anderem von Nikolaidis [128] oder Papaioannou [129] beschrieben und sieht eine Linearisierung der Grenzzustandsfunktion nach Beschreibung im Standardnormalraum und Annäherung durch eine Normalverteilung vor. Hierdurch kann der Zuverlässigkeitsindex wiederum als konsistente Definition des Abstands des Ursprungs der Verteilung zur Grenzzustandsfunktion im Bemessungspunkt bestimmt werden [129].

Die Grenzzustände werden nach Abschnitt 2.4.1 unterschieden in die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Diese sind mit Unterscheidung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Schutz des Tragwerks in Bild 3.3 dargestellt.

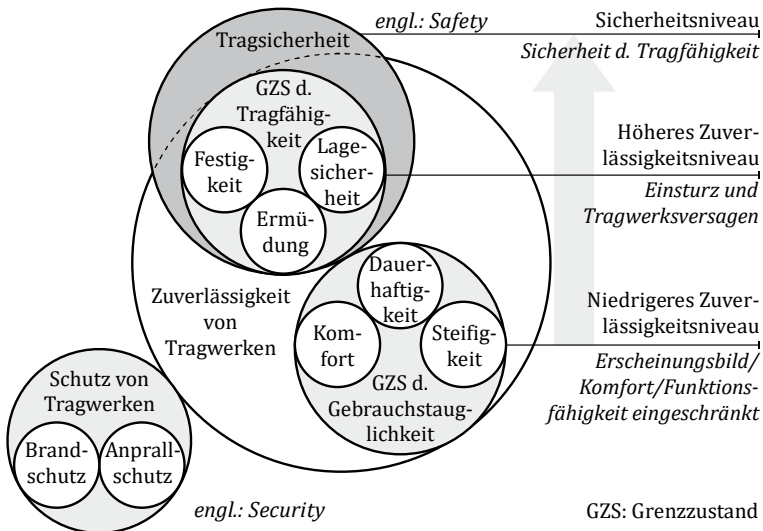


Bild 3.3: Differenzierung der Zuverlässigkeitsniveaus und Grenzzustände bzgl. der Sicherheit und dem Schutz von Tragwerken nach Eurocode

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit betreffen das Erscheinungsbild, den Komfort und die Funktionsfähigkeit, während die Grenzzustände der Tragfähigkeit das Tragwerksversagen oder den Einsturz umfassen. Für die Dauerhaftigkeit sind zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften des Tragwerks während der Nutzungsdauer zu berücksichtigen bzw. auszuschließen. Während die Bemessung für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit unter Lastkombinationen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen erfolgt, werden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit zudem außergewöhnliche Einwirkungen berücksichtigt. Durch spezifische Teilsicherheitsbeiwerte für extreme Bemessungssituationen, wie z. B. Brand, wird ein ausreichendes Sicherheitsniveau erzielt.

Grundsätzlich ist der Schutz von Tragwerken sicherzustellen. Dies ist z. B. durch Präventivmaßnahmen oder durch ausreichende Widerstandsfähigkeit des Materials möglich. Entsprechende Schutzmaßnahmen zum Erreichen des Zuverlässigkeitsniveaus werden in dieser Arbeit vorausgesetzt und sind nach Eurocode 0 wie folgt definiert:

- Präventiv- oder Schutzmaßnahmen (Brandschutz, etc.)
- geeignete Maßnahmen bei der Berechnung (repräsentative Werte der Einwirkungen, Sicherheiten)
- Qualitätsmanagement
- Fehlerreduzierung bei Entwurf, Berechnung und Ausführung
- Überwachung und Instandhaltung und weitere Maßnahmen

Die Präventiv- und Schutzmaßnahmen umfassen z. B. geeignete Beschichtungen für eine Widerstandsfähigkeit bei Brand, genauso wie Beschichtungen zum Korrosionsschutz, um eine Dauerhaftigkeit zu garantieren. Anprallsicherungen können die Kollision von Objekten mit wichtigen Tragwerksteilen verhindern. Durch Berechnung auf der Grundlage repräsentativer Lasten, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt werden, wird ein weiterer Beitrag geleistet. Ein Qualitätsmanagement sowie die Überwachung der Prozessschritte von der Planung bis zur Ausführung sind essentiell.

3.2.1 Zuverlässigkeitsniveaus

Das Zuverlässigkeitsniveau wird im Anhang des Eurocode 0 [8] über Schadensfolgeklassen (CC) festgelegt. Diese sind in Tabelle 3.1 aufgeführt und abhängig vom zu erwartenden Schaden, jedoch nicht von der Wahrscheinlichkeit des Eintritts. Damit erfolgt an dieser Stelle keine Risiko-, sondern eine Gefährdungsbeurteilung.

Tabelle 3.1: Klassen für Schadensfolgen (CC) nach [8]

	Merkmale	Beispiele von Bauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben, sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. Konzerthallen)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn-/Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben, kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Durch Verknüpfung mit den Zuverlässigkeitsklassen (RC) führen diese zu einer Empfehlung für den Zuverlässigkeitsindex β für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, siehe Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Mindestwert des Zuverlässigkeitsindex β nach Zuverlässigkeitsklasse (RC) [8]

	Mindestwert für β	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
RC 3	5,2	4,3
RC 2	4,7	3,8
RC 1	4,2	3,3

Für die Schadensfolgeklasse CC 2 ist der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex exemplarisch weiter in die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unterschieden, aus denen sich die Anforderungen an die Mindestzuverlässigkeit ableiten lassen, siehe Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Zielwert des Zuverlässigkeitsindex β für die Klasse RC 2 in Anlehnung an [8]

RC 2: Grenzzustand	Zielwert des Zuverlässigkeitsindex β	
	1 Jahr	50 Jahre
Tragfähigkeit	4,7	3,8
Gebrauchstauglichkeit	2,9	1,5

Bei einer standardisierten Normalverteilung ist der Bezug zur Versagenswahrscheinlichkeit P_f nach Gleichung (3.3) gegeben. Der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex ist

an eine Nutzungsdauer gebunden. Die Vorgabe erfolgt für ein Jahr und 50 Jahre, wobei nach 50 Jahren eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit und damit ein geringerer Zuverlässigkeitsindex erlaubt ist. Bei vornehmlich von der Einwirkung geprägten Unsicherheit mit statistisch unabhängigen Jahresmaxima, ist die folgende Näherung für eine abweichende Nutzungsdauer n in Jahren nach DIN EN 1990, Eurocode 0 [8], ausgehend vom Bezugswert des Zuverlässigkeitsindex für ein Jahr β_1 , zulässig.

$$P_f = \phi(-\beta_n) = 1 - \phi(\beta_1)^n \quad (3.6)$$

Angaben zu den Nutzungsdauern unter gegebenen Lasten sind nachfolgend erläutert.

3.2.2 Nutzungsdauer und Lastannahmen

Die Bemessung im Bauwesen erfolgt auf der Grundlage von Lastannahmen für eine festgelegte Nutzungsdauer. Die Nutzungsdauer wird abhängig vom Gebäudetyp vorgeschlagen. Der Eurocode unterscheidet dafür 5 Kategorien, welche in Tabelle 3.4 aufgeführt sind. Die Nutzungsdauer reicht für befristete Tragwerke von 10 Jahren bis maximal 100 Jahre.

Tabelle 3.4: Klassen der Nutzungsdauer [8]

Planungsgröße der Nutzungsdauer	Beispiele
10 Jahre	Tragwerke mit befristeter Standzeit
10 – 25 Jahre	Austauschbare Tragwerksteile, z. B. Kranbahnträger, Lager
10 – 30 Jahre	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
50 Jahre	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
100 Jahre	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

Die Nutzungsdauer ist z. B. für den Ermüdungsnachweis relevant. Für die Bemessung werden repräsentative Lastfälle angenommen. Je nach Grenzzustand sind hierfür Lastkombinationen mittels Kombinationsbeiwerten zu bilden. Die Kombination aus statischen Lasten wie Eigengewicht und Ausbaulasten mit dynamischen Lasten z. B. durch Windlasten, stellt eine häufige Lastkombination dar.

Die Windlasten zählen zu den ständig auf Hochhaus-Tragwerke einwirkenden Lasten und sind in der DIN EN 1991-1-4 [130] standardisiert. Als mittlere 10-Minuten-Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über offenem Gelände wird die charakteristische Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ eingeführt. Abhängig von der Höhe über Grund und der

Geländerauigkeit bzw. Topographie wird daraus die standortspezifische Windgeschwindigkeit berechnet. Für $v_{b,0}$ finden sich landesspezifische Daten im nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-4/NA [131]. Abhängig von den kartografierten Windzonen ist über den ungefähren Standort des Tragwerks der zugehörige Wert zu ermitteln, siehe Bild 3.4. Die zur Basiswindgeschwindigkeit gehörenden Geschwindigkeitsdrücke $q_{b,0}$ sind ebenfalls angegeben. Der Geschwindigkeitsdruck berechnet sich aus der charakteristischen Basiswindgeschwindigkeit und der Luftdichte und wird häufig in der Bemessung genutzt. Als Vergleichswert dient nachfolgend die Windgeschwindigkeit.

Der Standort des adaptiven Hochhaus-Demonstrators ist exemplarisch auf der Karte vermerkt und liegt in Windzone 1, die eine charakteristische Basiswindgeschwindigkeit von 22,5 m/s aufweist. Werden für Richtungsfaktor und Jahreszeitenbeiwert die empfohlenen Werte verwendet, gilt für die Basiswindgeschwindigkeit $v_b = v_{b,0}$.

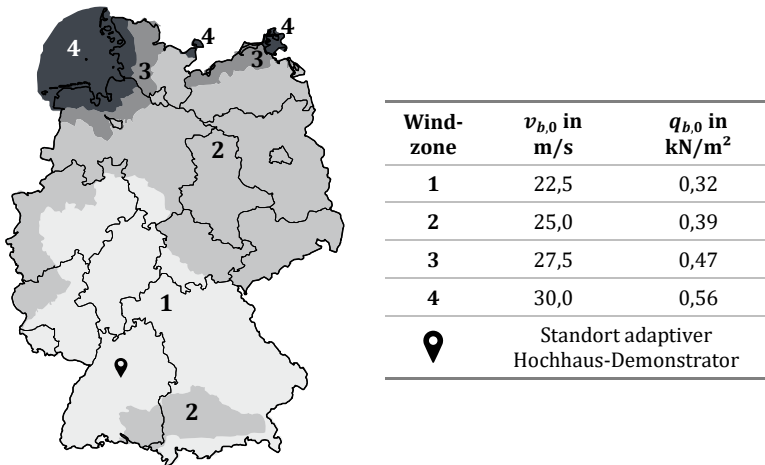


Bild 3.4: Einteilung der Windzonen der Bundesrepublik Deutschland nach nationalem Anhang des Eurocode 1 [131]

Die den Standort umgebende Bodenrauigkeit beeinflusst die mittlere Windgeschwindigkeit v_m , die sich aus der Basiswindgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe z_x ergibt. Hierfür ist im nationalen Anhang des Eurocode eine Kategorisierung in einen von vier Geländetypen vorgesehen. Bild 3.5 zeigt die Geländerauigkeit des Standorts des adaptiven Hochhaus-Demonstrators an der Universität Stuttgart.

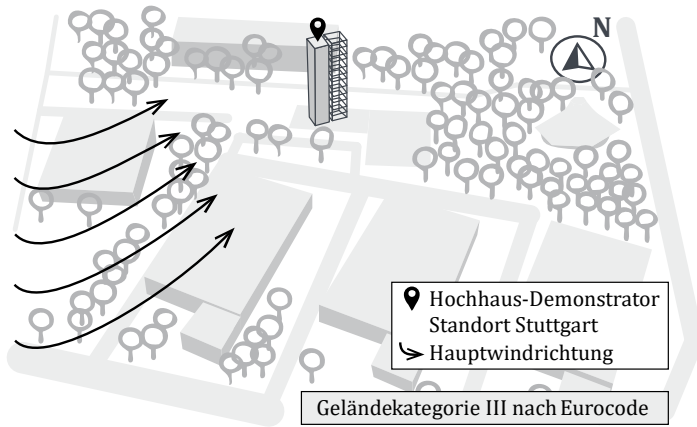


Bild 3.5: Umgebende Oberflächentopografie des adaptiven Demonstrator-Hochhauses am Standort Stuttgart und Hauptwindrichtung nach [132]

Der Standort entspricht der Kategorie III für Vorstädte, Industrie- und Gewerbegebiete bzw. Wälder. In Deutschland gilt das Potenzprofil für das höhenabhängige Windprofil und damit die in Tabelle 3.5 definierten Berechnungsvorschriften für die Geländekategorie III.

Tabelle 3.5: Berechnungsparameter für Geländekategorie III nach nationalem Anhang in Abhängigkeit der Höhe z [131] (Auszug)

Geländekategorie III		
$z_{min} = 8,00 \text{ m}$	$z_x < z_{min}$	$z_x > z_{min}$
Mittlere Windgeschwindigkeit v_m	$0,73 \cdot v_b$	$0,77 \cdot v_b \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22}$
Böengeschwindigkeit v_p	$1,23 \cdot v_b$	$1,27 \cdot v_b \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$

Die Windgeschwindigkeit über der Höhe z_x ergibt sich aus den Angaben in Tabelle 3.5 exemplarisch am Demonstrator-Hochhaus, wie in Bild 3.6 dargestellt. Neben der mittleren Windgeschwindigkeit v_m sind kurzzeitige Geschwindigkeitsänderungen durch die Böengeschwindigkeit v_p berücksichtigt. Unterhalb der Mindesthöhe von acht Metern wird eine konstante Windgeschwindigkeit angenommen.

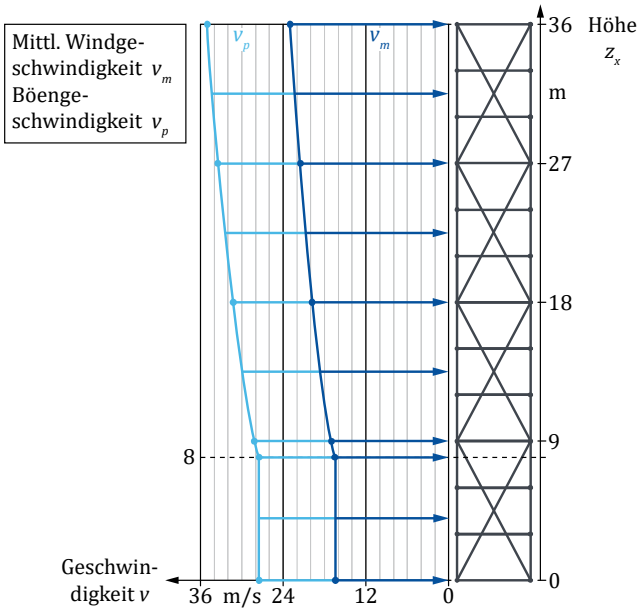


Bild 3.6: Windgeschwindigkeit am Demonstrator-Hochhaus nach Eurocode

3.2.3 Materialparameter und Ermüdungsbemessung

In Abschnitt 2.4 wurde die Aufteilung des Eurocode in die je nach Bauart zu unterscheidenden Normenteile dargelegt. Für Tragwerke aus Stahl sind demnach die Ausführungen der DIN EN 1993, dem Eurocode 3 [94], und die dort spezifizierten Kennwerte relevant. Die Eigenschaften von Baustählen sind z. B. gegenüber Holzwerkstoffen weitgehend beständig und sehr gut erfasst. Die Ausnutzung des Werkstoffs ist aus diesem Grund relativ hoch, d. h. es sind je nach Anwendungsfall lediglich geringe Sicherheitsbeiwerte erforderlich. Darüber hinaus sind Verbindungen herstellbar, die nahezu dieselbe Festigkeit aufweisen wie der Grundwerkstoff. Lagerung und Transport beeinflussen die Bauteileigenschaften nur unwesentlich. Stahlbauteile lassen sich schließlich am Ende der Nutzungsdauer zu 99 % recyceln [10].

Aus Nachhaltigkeitssicht sind Holzwerkstoffe aufgrund ihrer Eigenschaft CO_2 zu binden und der daraus resultierenden positiven Umweltwirkung [10, 133] interessant. Bestrebungen Materialeigenschaften von Holzwerkstoffen besser zu erfassen und die

Zuverlässigkeit nachzuweisen wurden z. B. von Köhler [134] unternommen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine deutlich größere Streuung der Materialeigenschaften vorliegt und die Unsicherheiten demzufolge größer sind. Erschwerend hinzu kommen die langen Nutzungsdauern, über die ein Nachweis erfolgen muss. Belastungsverlauf und Feuchtigkeitsgehalt beeinflussen die Materialeigenschaften stark. Eine Verbindung der Holzbauteile mit ausreichender Festigkeit ist zudem schwierig. Im Gegensatz zu Stahlbauteilen, bei denen sich ein Versagen durch Verformung ankündigt, versagen Holzbauteile unmittelbar durch Spröbruch. Die Betrachtungen innerhalb dieser Arbeit beschränken sich daher auf Stahltragwerke nach Eurocode 3 [94], schließen methodisch die Verwendung alternativer Werkstoffe jedoch nicht aus.

Zuverlässige Stahltragwerke erfordern eine Auslegung für eine der Nutzungsdauer angemessene Dauerhaftigkeit und Robustheit. Dies beinhaltet Maßnahmen für einen ausreichenden Korrosionsschutz. Weiter ist die konstruktive Gestaltung mit ausreichender Sicherheit gegen Ermüdung auszuführen. Inspektions- und Wartungsmaßnahmen sind vorzusehen. Eine zentrale Vorgabe ist die Vermeidung eines Totalversagens des Tragwerks ohne Vorankündigung. Der Baustahl muss daher eine ausreichende Duktilität aufweisen. Bei den im Eurocode aufgeführten Baustählen darf diese Anforderung als eingehalten vorausgesetzt werden. Eine Modellierung des Tragwerks setzt die Kenntnis von Materialparametern voraus. Für den geläufigen Baustahl S355 sind in Tabelle 3.6 beispielhaft die Nennwerte für eine Erzeugnisdicke bis 40 mm aufgeführt.

Tabelle 3.6: Nennwerte für den Baustahl S355 für eine Erzeugnisdicke bis 40 mm nach Eurocode 3 [94]

S 355 (EN 10025-2)	Wert	Einheit
Streckgrenze R_e für ($t_w \leq 40$ mm)	355	N/mm ²
Zugfestigkeit R_m für ($t_w \leq 40$ mm)	490	N/mm ²
Elastizitätsmodul E	210.000	N/mm ²
Schubmodul G	81.000	N/mm ²

Wartung und Inspektion müssen für Bauteile die einer übermäßigen Korrosion, mechanischen Abnutzung oder Ermüdung ausgesetzt sind vorgesehen werden. Dazu sind Zugänge zu berücksichtigen, was für adaptive Tragwerke insbesondere die integrierten Aktoren betrifft. Der Nachweis gegen Ermüdungsversagen wird für Hochhaus-Tragwerke z.B. aufgrund von windinduzierten Schwingungen mittels linear-elastischer Berechnungen im Eurocode 3 eingeräumt.

Für die zuverlässigkeitsgerechte Auslegung sind insbesondere alterungsbedingte Ausfälle durch Verschleiß oder Ermüdung von Interesse. Diese erfordern eine möglichst genaue Berechnung bzw. praxisnahe Versuche und sind insofern vom Konstrukteur beeinflussbar. Eine Berechnung ist ausschließlich für diese Art von Ausfällen möglich und somit eine Prognose der Restlebensdauer oder Systemzuverlässigkeit wie von Bertsche [9] beschrieben. Der Ermüdungsnachweis ist daher von zentraler Bedeutung bei der zuverlässigkeitsgerechten Bemessung des Tragwerks.

In der Ermüdungsbemessung der Tragstruktur unterscheiden sich adaptive und passive Tragwerke nicht, weshalb hierfür das Vorgehen nach der DIN EN 1993-1-9, nach dem Eurocode 3 [135], angewendet werden kann. Eine ausreichende Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne vorige Ankündigung durch Rissbildung oder Verformung ist dabei aufgrund der vorgegebenen Materialparameter gewährt. Die Bestimmung der Spannungen in Form der Längsspannungen σ und Schubspannungen τ ist auf Gebrauchsniveau vorgesehen. Für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit sind Wöhlerlinien definiert, die Standardkerbfälle ausgehend von Nennspannungen und Kerbfälle für Schweißdetails mittels Strukturspannungen berücksichtigen. Ein Konstruktionsdetail unter bestimmter Beanspruchung wird ausgedrückt durch die Kerbfallzahl, als Bezugswert $\Delta\sigma_C$ für die Ermüdungsfestigkeitskurve. Der Bezugswert ist festgelegt für eine Schwingspielzahl von $N = 2 \times 10^6$ Schwingspielen.

Die Ermüdungsfestigkeitskurven für die Nennspannungen sind durch die in Abschnitt 2.5.1 beschriebene Wöhlerlinie und deren Kerbfallzahl erfasst. Die Bestimmung der Kerbfallzahl $\Delta\sigma_C$ erfolgt anhand von Kerbfallkategorien. Die Ermüdungsfestigkeitskurve definiert sich damit für Spannungsschwingbreiten oberhalb und unterhalb der Dauerfestigkeit nach Eurocode 3 [135] durch:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 \times 10^6 \quad (3.7)$$

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_D^m \cdot 5 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8 \quad (3.8)$$

Die Spannungsamplitude der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ ergibt sich hieraus zu:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \quad (3.9)$$

Der Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ definiert die Grenze unterhalb der nach Eurocode Schwingspiele nicht mehr zur Ermüdungsschädigung beitragen:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D = 0,549 \cdot \Delta\sigma_D \quad (3.10)$$

Die Schubspannungsamplitude lässt sich nach Eurocode analog bestimmen. Für die Spannungsamplituden aus Längsspannungen sind die Ermüdungsfestigkeitskurven abhängig von der Kerbfallzahl in Bild 3.7 abgebildet.

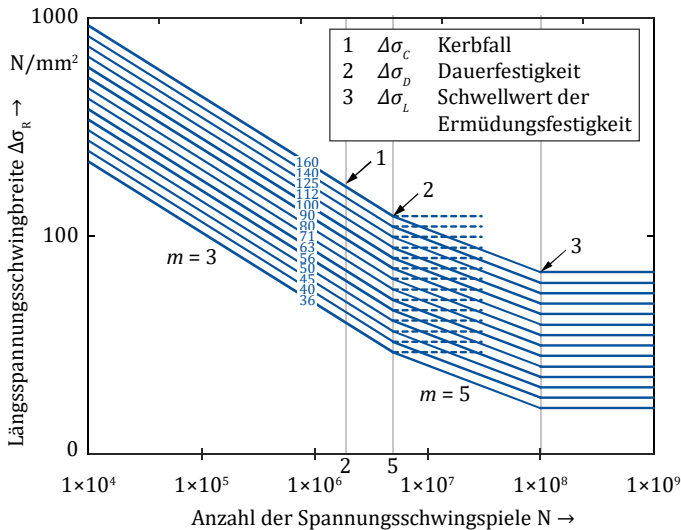


Bild 3.7: Ermüdungsfestigkeitskurven für Spannungsamplituden aus Längsspannungen nach Eurocode 3 [135]

Die Kerbfallkategorien unterscheiden sich in der Verbindungsart. Die Einteilung erfolgt anhand geschweißter oder mechanischer Verbindungen. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeitskurven wurden aus Versuchen mit 95 %-Überlebenswahrscheinlichkeit und 75 % Vertrauenswahrscheinlichkeit bestimmt. Sie stellen damit eine solide Berechnungsgrundlage für die Ermüdungsfestigkeit dar. Für die Ermüdungsbeanspruchung sind Last-Zeit-Verläufe aus den Lastsituationen abzuleiten. Dies führt am Kerbdetail wiederum zu Spannungszeitverläufen, die durch Messung oder dynamische Simulation ermittelt werden. Zur Klassifizierung sind Zählverfahren, wie z. B. die in Abschnitt 2.5.1 vorgestellte Rainflow-Methode, vorgegeben. Mittels Spannungsamplitude und Anzahl der Spannungsschwingspiele sowie der Mittelspannung erfolgt anhand der zugehörigen Wöhlerlinie die Schadensakkumulation.

Die Ermüdungsbemessung adaptiver Tragwerke ist für eine ausreichende Lebensdauer aufgrund der Materialeinsparung, die mit einer Aktivierung einhergeht, erforderlich und mit dem Eurocode konform. Weitere Anforderungen an die Auslegung adaptiver Tragwerke werden im folgenden Abschnitt untersucht.

3.3 Auslegung adaptiver Tragwerke

Durch die vorgestellte Ermüdungsbemessung des Tragwerks auf der Grundlage des Eurocodes wird ein Ermüdungsversagen der Tragstruktur mit ausreichender Wahrscheinlichkeit vermieden. Das Einbringen adaptiver Komponenten eröffnet jedoch die Möglichkeit der Manipulation des Lastabtrags, wodurch sich neue Lastzustände und durch die Komponenten neue Ausfallmöglichkeiten ergeben. Grundlage für die Auslegung ist die Untersuchung dieser Lastzustände in Größe, Art und Dauer, bzw. Häufigkeit [113] und die Analyse von Fehlern und deren Kombination zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit.

Hinsichtlich des Entwurfs adaptiver Tragwerke stellt sich zu Beginn die Frage der optimalen Topologie, die eine Aktivierung der Tragstruktur mit möglichst geringem Energieeinsatz zulässt. Teuffel [71] hat hierzu, abhängig vom zu erwartenden Energieeinsatz der durch die Aktoren zu verrichtenden Verformungsarbeit, ein Entwurfskonzept im Sinne von „form follows energy“ entwickelt. Da für die angestrebten Hochhaus-Tragwerke in der Regel Funktionsanforderungen bestimmend sind, ist der Ansatz von „form follows function“ in diesem Fall zielführend. Optimierungen der Tragwerkstopologie sollen als vorwiegend bauingenieursspezifische Fragen an dieser Stelle nicht behandelt werden. Für Untersuchungen zur optimalen Formfindung wird hierzu neben Teuffel auf Fröhlich et al. [136] bzw. Geiger et al. [137] verwiesen. In dieser Arbeit stehen Fragen der Aktorplatzierung, Anzahl der Aktoren und Bemessung der Querschnitte, zusammengefasst unter dem Begriff der Auslegung, ausgehend von einer festgelegten Tragwerkstopologie im Fokus.

Die in Abschnitt 2.3.5 benannten Aktivierungsprinzipien unterscheiden sich in der Funktionsweise und sind zur Kompensation unterschiedlicher Lastfälle geeignet. Aktive Massedämpfer (ATMDs) können zur Schwingungsdämpfung und Unterbindung einer eigenfrequenten Anregung eingesetzt werden. Nachteil sind die durch die Schwungmasse festgelegten Eigenschaften, die sich nicht mehr beeinflussen lassen. Strukturintegrierte Aktoren sind demgegenüber in der Lage statische Lasten, z. B. aus einer mittleren Windgeschwindigkeit oder der Anfangsschiefstellung des Tragwerks aufgrund baulicher Toleranzen, zu kompensieren. Die Adaption an Lasten durch strukturintegrierte Aktoren als Teil eines adaptiven Systems erfolgt durch Selbstanpassung optimal auf die gegebene Tragstruktur. Die strukturintegrierte Adaption bietet darüber hinaus den Vorteil, dass Lasten mit statischem und dynamischem Anteil kompensiert werden können, die in Form von Lastkollektiven für die Auslegung zu definieren sind. Der Eurocode gibt für die Grenzzustände (GZS)

unterschiedliche Lastannahmen vor. Während der GZS der Gebrauchstauglichkeit für gewöhnliche Lastannahmen einer ständigen Bemessungssituation genügen muss, ist der GZS der Tragfähigkeit unter temporären, außergewöhnlichen Lasten sowie gegen Ermüdung mit einer dynamischen Belastung zu bemessen. Die Funktionsintegration der Adaption erfordert gegenüber den in Bild 3.3 dargestellten Zuverlässigkeits- und Sicherheitsniveaus passiver Tragwerke zusätzlich die Berücksichtigung der Betriebs-sicherheit und Funktionszuverlässigkeit, zusammengefasst unter dem Begriff funktionale Sicherheit, und des Angriffsschutzes wie in Bild 3.8 dargestellt.

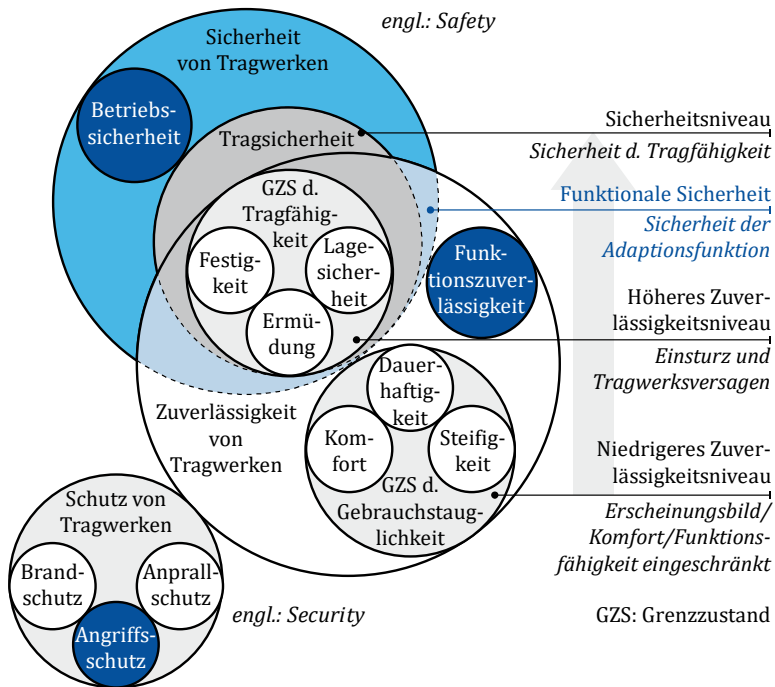


Bild 3.8: Differenzierung der Zuverlässigkeitsniveaus und Grenzzustände bzgl. der Sicherheit und dem Schutz von adaptiven Tragwerken

Die erforderliche Funktionszuverlässigkeit hängt vom Grad der Funktionsübernahme durch die Aktorik ab und orientiert sich an der Zuverlässigkeitsvorgabe für die Grenzzustände. Danach richtet sich auch die funktionale Absicherung der Adaptionfunktion. Ein vorzusehender Angriffsschutz verhindert eine Manipulation des adaptiven Tragwerks durch Zugriff auf die Steuerung und Einflussnahme auf die Aktuierung.

3.3.1 Zuverlässigkeit adaptiver Tragwerke

Die nach Eurocode beschriebene Bemessung von herkömmlichen Tragwerken mittels Zuverlässigkeitsindex der Grenzzustände erfolgt im Rahmen einer semiprobabilistischen Zuverlässigkeitsberechnung als Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung (engl.: First Order Reliability Method, FORM). Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f definiert sich aus der Grenzzustandsfunktion G , die einen Ausfallmechanismus des Tragwerks beschreibt. Der Grenzzustand ist für $G = 0$ erreicht, demnach führt $G < 0$ zum Versagen. Die Grenzzustandsfunktion des Systems lässt sich durch Verfahren der Zuverlässigkeitsmethoden erster oder zweiter Ordnung (FORM/SORM) näherungsweise über eine Normalverteilung lösen. Eine Untersuchung mittels simulativer Methoden erfolgt ohne Näherung und ist bei hinreichender Wiederholung exakt [129]. Für unterschiedliche, gleichermaßen bedeutsame Ausfallmechanismen, wie sie bei adaptiven Tragwerken als Sensorausfälle, Aktorausfälle usw. auftreten, sind Ausfallkombinationen zu untersuchen. Von Interesse ist dabei die Systemzuverlässigkeit, die sich durch parallele und serielle Verknüpfung, meist mittels eines Fehlerbaums, siehe Abschnitt 2.5.4, modellieren lässt. Danach wird jeder Ausfallmechanismus i durch die kumulative Verteilungsfunktion als Ausfallwahrscheinlichkeit F_i beschrieben.

Das Ausfallverhalten des Systems oder dessen Komponenten und deren Zusammenwirken für einen Systemausfall muss für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit bekannt sein. Eine Unterscheidung von Ausfällen erfolgt nach Zeitpunkt des Auftretens anhand der sogenannten „Badewannenkurve“ in die Kategorien Frühausfälle, Zufallsausfälle und Verschleiß- bzw. Ermüdungsausfälle beschrieben von Bertsche [9]. Frühausfälle ereignen sich in der Regel aufgrund von Konstruktions- oder Qualitätsmängeln. Im Bereich der Zufallsausfälle ist kein ausgeprägtes Ausfallverhalten erkennbar. Für Berechnungsmethoden zur Lebensdauerprognose eignen sich lediglich die Ermüdungsausfälle, da Früh- und Zufallsausfälle nicht durch Prognosemodelle abzuschätzen sind.

Ermüdungsausfälle entstehen aufgrund von Alterung über der Nutzungsdauer durch übliche Beanspruchung unter den vorgegebenen Nutzungsbedingungen. Mechanische Elemente des Bauwesens unterliegen wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert einer dynamischen Belastung, die eine Ermüdung und damit einen Verschleißausfall anregt. Übliche dynamische Lasten für Tragwerke sind Windlasten, die für eine Bemessung bekannt sein müssen. Daneben können statische Lasten eine Mittelspannung erzeugen. Für die Zuverlässigkeit des Tragwerks im Sinne einer Funktionserfüllung über der Nutzungsdauer ist eine Ermüdungsbemessung unter realistischen Lastannahmen des bestimmungsgemäßen Gebrauchs maßgebend.

Ausfälle elektronischer Komponenten als Teil des adaptronischen Systems liegen im Bereich der Zufallsausfälle und werden durch die konstante Ausfallrate λ_A ausgedrückt. Diese beschreibt die Anzahl Fehler je Zeiteinheit. Für elektronische Komponenten wird häufig die Einheit FIT (Failure In Time) als ein Fehler in 10^9 Betriebsstunden verwendet.

In der Bemessung von Tragwerken nach Eurocode ist keine Auslegung des adaptronischen Systems vorgesehen. Für die Zuverlässigkeitsanalyse adaptiver Tragwerke erfolgt das Vorgehen nach dem in Abschnitt 2.5.3 aufgezeigten Zuverlässigkeitsprozess des Maschinenbaus. Die Auslegung des Eurocodes für selten auftretende Spitzenlasten und die Kombination von Lastfällen in außergewöhnlichen Bemessungssituationen erfolgt für lange Lebensdauern. Angaben zur Nutzungsdauer belaufen sich nach Eurocode bei gewöhnlichen Tragwerken auf 50 Jahre. Die im Maschinenbau angestrebten Lebensdauern technischer Systeme liegen in der Regel deutlich darunter.

Die für die Adaption des Gebäudes an Umgebungslasten notwendige Aktorik, Sensorik und Regelungselektronik ist daher nicht in der Lage die im Bauwesen üblichen Lebensdauern mit ausreichender Wahrscheinlichkeit zu erfüllen [138]. Für adaptronische Systeme sind diese Vorgaben ausschließlich unter Berücksichtigung einer Wartung umzusetzen, wie sie im Maschinenbau üblich ist. Eine Zuverlässigkeitsbewertung muss aus diesem Grund die Reparatur von Komponenten des adaptronischen Systems vorsehen, um die Anforderungen nach Eurocode auch für adaptive Tragwerke zu erfüllen.

3.3.2 Sicherheit adaptiver Tragwerke

Die Versagenswahrscheinlichkeit als Unsicherheit gegenüber einem Versagen bestimmt im Bauwesen das Sicherheitsniveau von Tragwerken. Da das Versagen eines passiven Tragwerks mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftritt, ist eine statistische Abschätzung mangels eines ausreichenden Stichprobenumfangs der meist individuellen Tragwerksentwürfe nicht möglich. Die statistisch bestimmbaren Verteilungen für Belastung und Belastbarkeit lassen dagegen eine theoretische Berechnung zu [118]. Die sichere Auslegung adaptiver Tragwerke muss die in Abschnitt 2.5.2 vorgenommene Differenzierung eines Versagens von einem Ausfall durch einen Fehler berücksichtigen. Ein Fehler führt danach nicht zwangsläufig zu einer Funktionsunfähigkeit oder einem Versagen des Tragwerks. Erfüllt das Tragwerk weiterhin seine Anforderungen können Einschränkungen der Adaption durch Fehler

hingegenommen werden. Diese Eigenschaft beschreibt die Fehlertoleranz. Eine Ausfallsicherheit besteht weiterhin, womit die Ausfallwahrscheinlichkeit geringer ist als die Fehlerwahrscheinlichkeit [117].

Elektrische, elektronische sowie programmierbare elektronische Systeme, wie sie bei adaptiven Tragwerken zur autonomen Anpassung an wechselnde Umgebungsbedingungen eingesetzt werden und die eine Sicherheitsfunktion ausführen, erfordern eine gesonderte Absicherung. Der Grad der Funktionsübernahme durch die Adaption legt dabei fest, inwieweit eine sicherheitsgerichtete Funktion vorliegt. Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalen-Tragwerks, wie sie bspw. von Sobek et al. [139, 140] durchgeführt wurden, führen zu einer methodischen Absicherung durch frühzeitige Fehlererkennung und -behebung. Die angewandten Methoden wie FMEA und FBA ermöglichen eine systematische Analyse, die von der Forschergruppe als zielführend bei der Absicherung adaptiver Tragwerke befunden wurde.

Ein weiterführendes Vorgehen, das die genannten Methoden einschließt, ist die funktionale Absicherung der Adaptionfunktion nach EN 61508 [121] beschrieben in Abschnitt 2.6.1. Die Absicherung erfolgt durch Klassifikation der möglichen auftretenden Fehler in sichere und gefährliche Fehler. Während sichere Fehler keinen Einfluss auf das adaptive Tragwerk haben, sind gefährliche Fehler weiter zu unterscheiden in entdeckbare und nicht entdeckbare gefährliche Fehler. Der Diagnosedeckungsgrad gibt an, wie viele der gefährlichen Fehler im Verhältnis zu allen gefährlichen Fehlern diagnostiziert werden können. Eine funktionsunfähige Adaption kann im kritischsten Fall eines Totalausfalls bei Anforderung der Funktion keine Lastkompensation ausführen, wodurch eine Gefährdung entsteht.

Die erwähnte Fehlertoleranz stellt eine Systematik dar, durch Redundanz die Funktion, zumindest eingeschränkt zu erhalten, obgleich einer oder mehrere Fehler vorhanden sind. Die Redundanz ist hierbei von der im Bauwesen üblichen Bezeichnung der Redundanz von Tragwerkselementen abzugrenzen, wie sie für adaptive Tragwerke z. B. von Geiger et al. in [137] bewertet wird. Eine Umsetzung kann im Fall adaptiver Systeme als Hardware-, Software-, Zeit- oder Informationsredundanz erfolgen. Hierfür sind Fehler mit gemeinsamer Ursache (engl.: Common Cause Failure, CCF) zu berücksichtigen. Diese können für redundante Ausführungen aufgrund derselben Grundursache zu einem Ausfall der Systemfunktion führen [124].

Für die Sicherheit und Zuverlässigkeit adaptiver Tragwerke ergibt sich angelehnt an Böröcsök [124] eine Unterscheidung nach den folgenden Definitionen:

- Gegenstand der *Zuverlässigkeitsbetrachtung*:
Ermitteln der Wahrscheinlichkeit von Ausfällen der Adaptionfunktion
- Gegenstand der *Sicherheitsbetrachtung*:
Risikominderung der Auswirkung eines Fehlers der Adaptionfunktion

Sofern die Tragsicherheit weiterhin durch die zuverlässige Bemessung der Tragstruktur garantiert wird, ist nach dieser Definition dennoch zu bewerten, ob Fehler im Adaptionprozess durch eine inhärent sichere Konstruktion ausreichend abgesichert sind. Dazu ist eine Fehleranalyse notwendig in der untersucht wird, inwieweit die Auswirkungen von Fehlfunktionen der Adaption Gefährdungspotential aufweisen.

Nach Feldhusen [113] gilt es in deterministische und stochastische Gefährdungen zu unterscheiden. Erstere treten aufgrund funktioneller Anforderungen z. B. durch Sollbewegungen der strukturintegrierten Aktoren auf. Gefährdungen dieser Art sind mit konstant hoher Wahrscheinlichkeit präsent und müssen, in diesem Fall z. B. durch einen Einklemmschutz, konstruktiv abgesichert werden. Stochastische Gefährdungen weisen ein zeitabhängiges Gefährdungspotential auf und lassen sich nicht immer voraussagen. Der konstruktiven Vermeidung von unvorhersehbaren, stochastischen Gefährdungen wird im Bauwesen durch das Prinzip des sicheren Bestehens (Safe Life) begegnet. Die Dimensionierung erfolgt in der Art, dass die Funktion ohne Versagen für die angenommene Lebensdauer erhalten bleibt. Weitere konstruktive Prinzipien sind das Prinzip des beschränkten Versagens (Fail-Safe) und das Prinzip der redundanten Ausführung, die in Abschnitt 4.5 erläutert und bewertet werden. Ein beschränktes Versagen sichert einen vereinbarten sicheren Zustand, der im Fehlerfall eingenommen wird um eine Gefährdung zu vermeiden.

Die EN 61508 gestattet risikomindernde Maßnahmen, wie inhärent sichere Konstruktionen im Sicherheitskonzept, spezifiziert jedoch keine genaueren Anforderungen. Da eine konstruktive Absicherung mit Materialmeherverbrauch verbunden ist und sich negativ auf die Umweltwirkung auswirkt, wird für adaptive Tragwerke eine systematische Fehlerminimierung durch Methoden und Prozesse empfohlen. Die Maßnahmen sind abhängig von der Anforderungsrate, die in der EN 61508 in kontinuierlich und niedrig unterschieden ist. Kontinuierlich ist die Sicherheitsfunktion, wenn sie als Teil des normalen Betriebs oder häufiger als einmal pro Jahr angefordert wird. Eine niedrige Anforderung ist auf einmal pro Jahr begrenzt und liegt bei adaptiven Tragwerken vor, die für eine Kompensation von selten auftretenden Spitzenlasten vorgesehen sind. Die Anforderung an die Sicherheitsintegrität ergibt sich nach Tabelle

3.7 durch Vorgabe der mittleren Wahrscheinlichkeit PFD_{avg} für einen gefahrbringenden Ausfall im Vergleich mit der Versagenswahrscheinlichkeit der Sicherheitsklassen im Bauwesen.

Tabelle 3.7: Gegenüberstellung der Versagenswahrscheinlichkeit der Sicherheitsklassen aus Bauwesen [8] und Maschinenbau [121]

Bauwesen		Maschinenbau	
RC	Gerundete Versagenswahrscheinlichkeit (P_f)	SIL	Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Fehlers der Sicherheitsfunktion mit niedriger Anforderungsrate (PFD_{avg})
1	$\geq 10^{-7}$ bis $< 8 \cdot 10^{-6}$	4	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
2	$\geq 10^{-6}$ bis $< 7 \cdot 10^{-5}$	3	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$
3	$\geq 10^{-5}$ bis $< 4 \cdot 10^{-4}$	2	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$
-	-	1	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$

Die Versagenswahrscheinlichkeit dient im Eurocode 0 [8] als operativer Vergleichswert von Zuverlässigkeitsniveaus und nicht als tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der die Beanspruchung durch die Einwirkung die Widerstandsfähigkeit des Materials übersteigt. Zugrunde liegen die lognormale Verteilung bzw. die Normalverteilung. Dagegen ergibt sich nach EN 61508-1 [121] die Versagenswahrscheinlichkeit aus der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls der Sicherheitsfunktion bei Anforderung. Die Angabe erfolgt als Mittelwert auf Basis der Wahrscheinlichkeit zufälliger Hardwareausfälle und systematischer Ausfälle mit in der Regel konstanten Ausfallraten auf Basis der Exponentialverteilung. Während im Bauwesen die Auftretenswahrscheinlichkeit der extremen Einwirkung in der Angabe des Grenzwerts berücksichtigt ist, handelt es sich im Maschinenbau um die Angabe einer Wahrscheinlichkeit des Ausfalls bei Anforderung der Funktion. Bei niedriger Anforderung darf die Funktion hierbei im Mittel höchstens einmal jährlich angefordert werden. Für die angestrebte, adaptive Kompensation von Extremlasten wie bspw. sogenannten Jahrhundertlasten ist ein weitaus weniger häufiges Auftreten zu erwarten. Aufgrund der Annahmen für die Häufigkeit der Lasten bzw. der Anforderung sind die Angaben nicht vergleichbar.

Bei Auslegung auf die Streckgrenze stehen bei Ausfall der Adaption darüber hinaus Reserven durch Plastifizieren des Werkstoffs zur Verfügung. Abhängig von der Bemessungsstrategie räumt der Eurocode 0 für Bauteile des Tragwerks eine geringere oder höhere Schadensfolgeklasse ein, weshalb in dieser Arbeit die Angaben des Maschinenbaus für die sicherheitsgerechte Auslegung der Adaptionfunktion als verbindlich und gültig erachtet werden.

3.3.3 Bestehende Konzepte zur Auslegung adaptiver Tragwerke

Die Bemessung der Tragstruktur und die Auslegung des adaptiven Systems ist von zentraler Bedeutung für Zuverlässigkeit und Sicherheit. Davon abhängig ist zudem die aufzuwendende Energiemenge zur Aktuierung der Tragstruktur. Zusammen mit dem Materialverbrauch für das Tragwerk und dem des adaptiven Systems bestimmt dies die Umweltwirkung. Durch eine geringere Bemessung ist gegebenenfalls ein höherer Energieeinsatz zur Lastkompensation notwendig. Andererseits reduziert sich das Tragwerksgewicht und damit die zu aktierende Masse, was wiederum zu geringeren erforderlichen Kräften führt.

Neben der Formoptimierung hat Teuffel in [71] ein Konzept zur Auslegung adaptiver Tragwerke vorgestellt. Ein wesentliches Erfordernis ist für ihn die Identifikation von Lastkollektiven der tatsächlichen Belastungsdauer und -höhe, um eine Berechnung der operativen Energie, welche die Aktoren zur Adaption benötigen, durchzuführen. Neben den Definitionen der Eurocode Normenteile sind hierfür erweiterte Annahmen zu treffen. Das Konzept sieht zunächst eine Kraftpfadoptimierung vor, mit dem Ziel durch optimale Kraftpfade ein minimales Tragwerksgewicht zu erreichen. Dazu wird über die Gleichgewichtsbedingungen eine Optimierung der Kraftpfade für mehrere Lastfälle ohne Berücksichtigung von Verformungs- oder Kompatibilitätsbedingungen durchgeführt. Das Minimalgewicht ergibt sich aus den Dimensionierungsgrößen der Elementlängen, Elementquerschnitte und der Materialdichte unter Einhaltung der zulässigen Normalspannung. In einem zweiten Schritt werden durch den Adaptionvorgang die verletzten Verformungs- und Kompatibilitätsbeschränkungen wiederhergestellt und bestimmt, welche Elemente demzufolge aktiviert werden müssen. Der operative Energiebedarf der Aktoren ergibt sich aus der inneren Verschiebungsarbeit, die sich über die Normalkräfte und adaptiven Zusatzkräfte ermitteln lässt. Die Anzahl der Aktoren geht aus der statischen Unbestimmtheit des Systems hervor. Die linear unabhängigen Kraftzustände können in gleicher Anzahl wie die Größe der statischen Unbestimmtheit erzeugt werden. Für weitere Verformungseinschränkungen ist je Freiheitsgrad ein zusätzlicher Aktor notwendig, wobei eine Näherung mit weniger Aktoren möglich ist. Die Anzahl der Aktorplatzierungen κ sieht Teuffel als Funktion aus Anzahl an Elementen im Tragwerk e und Aktoren n_{akt} [71].

$$\kappa = \frac{e!}{(e - n_{akt})! \cdot n_{akt}!} \quad (3.11)$$

Seine Untersuchungen beschränken sich auf die Formoptimierung und optimale Ausnutzung der Strukturelemente der adaptiven Struktur.

Eine Erweiterung der Methode von Teuffel wurde von Senatore in [75] vorgestellt. Der Zusammenhang von Material- und Energiebedarf steht hierbei im Vordergrund. In einem passiven Tragwerk ist die über der Nutzungsdauer anfallende Energie durch die in der Masse des Tragwerks gebundene Energie bestimmt. Die Auslegung erfolgt auf zu erwartende maximale Lastfälle, um Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsgrenzen einzuhalten. Im Gegenzug ist die in der Tragstruktur gebundene Energie eines adaptiven Tragwerks durch Materialeinsparungen geringer, hingegen fällt ein operativer Energieanteil zur Adaption an Lasten an. Folglich ist nach Senatore das Optimierungskriterium der Schnittpunkt aus minimaler gebundener Energie im Tragwerk sowie einer möglichst geringen operativen Energie zur Adaption an Lasten. Seine Berechnungen der operativen Energie basieren auf statischen Lastfallanalysen analog zu Teuffel, unter der Annahme einer Häufigkeitsverteilung der Lasten und daraus resultierend der Aktivierungshäufigkeit mit Hochrechnung auf die Nutzungsdauer [73]. Die Einführung eines Aktivierungsschwellwerts bestimmt den Beginn des Einsatzes der Aktorik zur Lastkompensation.

Die Untersuchungen von Teuffel und Senatore fokussieren eine statische Analyse adaptiver Tragwerke unter konstanten Ersatzlasten. Sowohl Teuffel als auch Senatore vergleichen statisch bestimmte und statisch unbestimmte Systeme. Hierbei ist zu beachten, dass in statisch bestimmten Systemen die Aktoren ausschließlich zur Adaption der Verformungen eingesetzt werden können. Der Einsatz aktiver Systeme zur Adaption von Tragwerken erfolgt aufgrund von Umweltlasten, die mitunter inakzeptable Schwingungen erzeugen. Ein wesentliches Ziel besteht daher in der Schwingungsdämpfung, die dynamisch untersucht werden muss.

Untersuchungen von Weidner et al. [90] zeigen, dass die Kompensation dynamischer Lasten zu einer unterschiedlichen Platzierung der Aktoren gegenüber denen zur statischen Kompensation führen. Kobori und Kamagata verfolgen [63] daher einen dynamischen Ansatz zur Auslegung adaptiver Tragwerke. Mittels der Bewegungsgleichung zweiter Ordnung untersuchen sie die Reaktion des Tragwerks aufgrund seismischer Anregung. In diskretisierten Zeitintervallen erfolgt die Berechnung der Aktorkräfte und die dadurch hervorgerufene Änderung der Steifigkeit der aktiven Elemente. Neben der Optimierung der Regelung werden Aktorplatzierungen und deren Eignung zur Einhaltung der Randbedingungen wie Auslenkung und Beschleunigung untersucht.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurden in der Praxis aufgrund der Bedenken gegenüber Zuverlässigkeit und Sicherheit aktiver Strukturelemente adaptiver Tragwerke bisher mehrheitlich aktive Massedämpfer eingesetzt. Teuffel [71] sichert sich durch

ein von ihm als „Fail-Safe-Konzept“ bezeichnetes Vorgehen demgegenüber ab. Danach verursacht ein Ausfall der Adaption eine geometrische Inkompatibilität und damit eine Zwangsbeanspruchung, die durch Überdimensionierung ertragen werden muss. Für den Ausfall der Regelung, z. B. aufgrund eines Stromausfalls, sieht er daher einen gegenüber dem Eurocode reduzierten Sicherheitsfaktor vor, der eine ausreichende Resttragfähigkeit der Struktur garantieren soll. Senatore stellt in einer weiteren Untersuchung [73] die Gebrauchstauglichkeit in den Vordergrund. Ein Ausfall resultiert nach seinen Ausführungen demnach lediglich in einer Verletzung von Funktions- und Komfortanforderungen und nicht in einem Verlust der Tragfähigkeit, weshalb sich eine Absicherung für ihn erübrigt.

3.3.4 Konsequenz für die Auslegung adaptiver Tragwerke

Die Adaption von Hochhaus-Tragwerken an Umweltlasten geschieht durch Begrenzen der Schwingungsamplituden und durch Dämpfen von Eigenfrequenzen. Extreme Lasten, wie sie z. B. durch Orkan oder Erdbeben auftreten, werden durch Kompensation sowohl statischer als auch dynamischer Lasten ertragen. Aufgrund des dynamischen Anteils der Lasten wird im Gegensatz zu den bisherigen statischen Auslegungsmethoden nach Teuffel [71] und Senatore [75] eine dynamische Analyse, wie von Kobori und Kamagata [63], als geeigneter befunden. Gegenüber den im Eurocode vorgestellten Bemessungslasten als statische Ersatzlasten, sind hierfür, wie auch von Teuffel erkannt, repräsentative Last-Zeit-Verläufe erforderlich. Eine derartige Modellierung hat den Vorteil, dass Einflüsse wie die Regeldynamik berücksichtigt werden können und die Berechnung des Ermüdungsverhaltens der Tragstruktur anhand einer Auswertung der Schwingspiele mit anschließender Schadensakkumulation möglich ist. Darüber hinaus kann der Energiebedarf der Aktoren abgeschätzt werden.

Durch die Strukturintegration von Aktoren in das Tragwerk ergeben sich potentielle Schwachstellen, die im Falle eines Ausfalls einen Steifigkeitsverlust bzw. durch Fehlfunktion eine Gefahr für das Tragwerk darstellen können. Um die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit, die sich einerseits aus den Anforderungen des Eurocode [8] sowie andererseits aus der EN 61508 [101] für funktionale Sicherheit ableiten, einzuhalten, sind Ausfallanalysen und ein Nachweis der Systemzuverlässigkeit notwendig. Gegenüber den Ausführungen von Senatore unterliegen die Gebrauchstauglichkeitsgrenzzustände ebenfalls Zuverlässigkeitsanforderungen. Diese müssen durch eine geeignete Hardwarearchitektur und Komponenteneigenschaften des adaptiven Systems sowie einer Ermüdungsbemessung der Tragstruktur sichergestellt werden.

Als übergeordnetes Ziel einer Reduzierung der Umweltwirkung durch adaptive Tragwerke ist eine Nachhaltigkeitsbilanz zu integrieren, die einen Vergleich mit passiven Tragwerken zulässt. Senatore bezieht in seine Analysen lediglich die Aufwendungen für Betriebsenergie und Material der Tragstruktur ein. Nach seinen Ausführungen sinkt die im Material gebundene Energie durch Massereduktion mit steigendem Anteil der Aktivierung stetig. Ein Einfluss des Anteils der zunehmenden Anzahl an Aktoren ist nicht erkennbar. Dies kann gegebenenfalls auf die Bilanzierung mittels Energie zurückgeführt werden, die den Nachteil hat, dass lediglich Aufwendungen für das Material bewertet werden und nicht der gesamte Wertschöpfungsprozess von der Gewinnung des Rohmaterials über die Verarbeitung bis hin zur Entsorgung bzw. dem Recycling enthalten ist. Darüber hinaus lässt sich die Energiebilanz nicht mit passiven Tragwerken, die üblicherweise mittels des Treibhauspotentials bewertet werden, vergleichen. Eine Nachhaltigkeitsbewertung adaptiver Tragwerke muss zudem die wichtigsten Komponenten des adaptiven Systems sowie die Tragstruktur umfassen. Die zur Erfüllung der Zuverlässigkeitsanforderungen notwendige Hardwarearchitektur nimmt hierauf Einfluss. Die von Teuffel praktizierte Anwendung von Sicherheitsfaktoren für einen Ausfall der Adaptionfunktion kompensiert einen Teil der durch die Adaption erzielten Materialeinsparung und ist aus Nachhaltigkeitssicht zu vermeiden.

Das maximale Einsparpotential, das durch adaptive Tragwerke erzielt werden kann, wird durch die Festigkeit des Materials in einer festigkeitsdominierten Auslegung beschränkt. Für eine über die festigkeitsdominierte Auslegung hinausgehende Materialeinsparnis ist die andauernde Unterstützung des Lastabtrags durch Aktoren erforderlich, um ein Versagen zu verhindern. Ein Ausfall der Versteifung durch die Adaptionfunktion führt in diesem Fall aufgrund der permanenten Funktionsanforderung zu einem Versagen der Tragstruktur und ist aus Sicht der Zuverlässigkeit und Sicherheit nicht zu verantworten. Für Hochhaus-Tragwerke besteht ein exponentieller Zusammenhang von Tragwerkshöhe zu Materialaufwand, um eine ausreichende Steifigkeit zu erreichen. Laterale Lasten, wie z. B. Windlasten, bestimmen die in diesem Falle steifigkeits- oder dauerfestigkeitsdominierte Auslegung. Für die Auslegung adaptiver Tragwerke ist es daher zweckmäßig die Überdimensionierung, resultierend aus der Auslegung auf laterale Lasten zu kompensieren. Dabei verspricht die Adaption der zumeist formbestimmenden, jedoch selten auftretenden Extremlasten eine enorme Materialeinsparnis bei vertretbarem Energieeinsatz. Aufgrund der Materialeinsparungen muss die Ermüdungsfestigkeit als Überlebenswahrscheinlichkeit der Tragstruktur überprüft werden.

Je weiter die Auslegung des adaptiven Tragwerks von einem steifigkeits- bzw. dauerfestigkeitsdominierten hin zu einem festigkeitsdominierten Problem wird, umso notwendiger wird die fehlerfreie Adaption. Einerseits nimmt durch Abnahme der Strukturquerschnitte der Einfluss der Aktoren auf die Struktur zu, andererseits ist die Anfälligkeit für äußere Lasten höher. Das Risiko für ein Überschreiten der Werkstofffestigkeit bei Ausfall der Adaptionfunktion muss durch geeignete Maßnahmen dabei geringgehalten werden. Die Auslegung muss durch ein funktional sicheres Konzept für die in diesem Fall als Sicherheitsfunktion ausgeführte Adaptionfunktion erfolgen. Um eine möglichst hohe Materialeinsparung zur Verringerung der Umweltwirkung adaptiver Tragwerke gegenüber passiven Tragwerken zu erreichen, ist eine funktionale Absicherung einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor vorzuziehen.

Die Umsetzbarkeit adaptiver Tragwerke hängt stark von der nachzuweisenden Zuverlässigkeit und Sicherheit ab, die in der bisherigen Forschung nicht berücksichtigt wurde. Neben einer ausreichenden Tragfähigkeit muss die Funktionszuverlässigkeit zur Kompensation von Lasten durch die Adaption berücksichtigt werden. Je nach Grad der Funktionsübernahme der Adaptionfunktion und der daraus resultierenden erforderlichen Sicherheitsintegrität ist eine Sicherheitsbetrachtung obligatorisch. Bestimmt durch diese Einschränkungen grenzt sich der Bereich der optimalen Auslegung adaptiver Tragwerke, wie in Bild 3.9 gezeigt, ab.

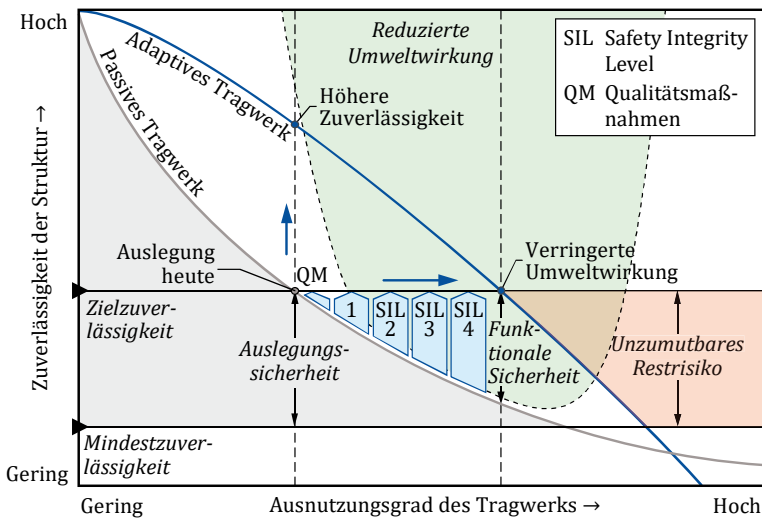


Bild 3.9: Auslegungsfeld adaptiver Hochhaus-Tragwerke ähnlich [141]

Dargestellt ist der qualitative Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit über dem Ausnutzungsgrad des Tragwerks. Die Zuverlässigkeit ist als die Überlebenswahrscheinlichkeit und Funktion definiert. Die Nachhaltigkeit wird ausgedrückt über die Aufwendungen in Form von Treibhausgasen im Verhältnis zur Nutzungsdauer des Tragwerks. Der Ausnutzungsgrad beschreibt die mittlere Werkstoffausnutzung im Tragwerk, die möglichst hoch sein soll. Exemplarisch sind Zuverlässigkeitskurven für ein passives sowie ein adaptives Tragwerk dargestellt, die unmittelbar vom Ausnutzungsgrad abhängen. Bei geringem Ausnutzungsgrad stehen genügend Reserven zur Verfügung, weshalb eine hohe Zuverlässigkeit erreicht wird, die mit steigendem Ausnutzungsgrad abnimmt. Für eine festgelegte Lebensdauer und Funktionalität ist eine Mindestzuverlässigkeit erforderlich, da das Tragwerk ansonsten nicht die gewünschten Anforderungen erfüllt. Die Mindestzuverlässigkeit wird durch Sicherheitszuschläge erhöht, wodurch sich eine höhere Zielzuverlässigkeit ergibt, die im passiven Fall der Auslegungssicherheit entspricht und durch die Fläche unterhalb der Kurve ausgedrückt wird. Die Auslegungssicherheit steigt mit sinkendem Ausnutzungsgrad des Tragwerks und vice versa. Somit ergibt sich der Auslegungspunkt heutiger passiver Tragwerke.

Die Zuverlässigkeit eines adaptiven Tragwerks wird beschrieben durch die exemplarische Kurve oberhalb der des passiven Tragwerks. Da sich die Zuverlässigkeit nunmehr aus der Zuverlässigkeit der Tragstruktur und den Komponenten der Adaption zusammensetzt, ergibt sich ein anderer Kurvenverlauf. Die aktive Manipulation des Tragwerks wirkt sich für einen geringen Ausnutzungsgrad kaum aus, weshalb der Einfluss auf die Zuverlässigkeit ebenfalls unwesentlich ist und das passive sowie das adaptive Tragwerk einen identischen Startpunkt aufweisen. An dieser Stelle ist eine Absicherung der aktiven Strukturelemente, wie sie z. B. für seriell integrierte Aktoren notwendig ist um bei Ausfall ein Erschlaffen des Strukturelements zu verhindern, vorausgesetzt. Andernfalls würde eine Aktivierung die Zuverlässigkeit verringern. In diesem Fall gewinnt die Aktorik mit steigendem Ausnutzungsgrad zunehmend an Einfluss, da die Tragstruktur an Masse verliert. Die höhere Zuverlässigkeit gegenüber dem passiven Tragwerk ergibt sich aus der zusätzlich zur Tragstruktur bestehenden Adaption, die die Anforderungen an das Tragwerk sicherstellt. Damit ergeben sich zu unterscheidende Auslegungspunkte gegenüber der passiven Auslegung heute. Einerseits lässt sich die Zuverlässigkeit eines herkömmlichen Tragwerks steigern indem eine Aktivierung erfolgt, was einer vertikalen Punktverschiebung von der Kurve des passiven Tragwerks zur Kurve des adaptiven Tragwerks entspricht. Andererseits ist horizontal eine Verringerung der Umweltwirkung möglich, unter Berücksichtigung derselben Randbedingungen für Zuverlässigkeit und Sicherheit wie bei passiven

Tragwerken. Daraus ergibt sich bei gleicher Zielzuverlässigkeit eine Materialersparnis, die sich in einer verringerten Umweltwirkung des Tragwerks niederschlägt.

Ist durch den Abstand zwischen Mindest- und Zielzuverlässigkeit, wie im passiven Fall, weiterhin die Sicherheit beschrieben, so ist für adaptive Tragwerke eine Steigerung des Ausnutzungsgrades dadurch begrenzt, dass ein ausreichendes Sicherheitsniveau nicht mehr erreicht werden kann. Die EN 61508 [101] sieht Sicherheitsintegritätslevel (SIL) vor, die durch Vorgaben an Prozesse und Methoden das Restrisiko verringern und zur funktionalen Sicherheit beitragen. Sinkt die Auslegungssicherheit, die durch die Fläche unterhalb der Kurve des passiven Tragwerks beschrieben ist daher zu weit ab, bleibt ein unzumutbares Restrisiko bestehen. Eine methodische Risikominderung ist nach SIL 4 nicht weiter möglich und stellt daher das Maximum an erreichbarer funktionaler Sicherheit und damit möglicher Materialeinsparung dar.

Der Bereich geringerer Umweltwirkung ist zu einem sinkenden Ausnutzungsgrad des Tragwerks hin durch die zunehmende Überdimensionierung begrenzt. Mit steigendem Ausnutzungsgrad verringert sich die Lebensdauer des Tragwerks und die Umweltwirkung verschlechtert sich. Eine optimale Auslegung erfolgt in dem Bereich zwischen den beiden Punkten. Die Umweltwirkung hängt über den Materialeinsatz und die Nutzungsdauer direkt von der Zuverlässigkeit ab. Eine hohe Zuverlässigkeit garantiert eine Funktionserfüllung mit hoher Wahrscheinlichkeit bzw. über eine lange Lebensdauer. Die Lebensdauer bestimmt wiederum die Nutzungsdauer des Tragwerks als Bezugsgröße der Umweltwirkung. Eine hohe Zuverlässigkeit wird in der Regel mit einem höheren Materialeinsatz erreicht, was die Umweltwirkung wiederum negativ beeinflusst.

Anhand dieser qualitativen Darstellung ist zu erkennen, dass das Auslegungsfeld adaptiver Tragwerke begrenzt ist durch die konträren Abhängigkeiten der Auslegungsgrößen. Für eine Auslegung ist die Berücksichtigung des Zusammenhangs aller Disziplinen notwendig. Sowohl die Eurocode-Normteile als auch die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten Methoden werden einer umfänglichen Auslegung adaptiver Hochhaus-Tragwerke nicht gerecht. Die statischen Ansätze mit überschlägigen, mittleren Lastannahmen sowie einer unzureichenden Umweltbewertung erfordern ein systematischeres, genaueres Vorgehen. Zuverlässigkeit und Sicherheit sind hierbei zu differenzieren. Die Interdisziplinarität des Forschungsfeldes muss innerhalb einer neuen Methode berücksichtigt und Anforderungen und Vorgehensweisen der beteiligten Domänen benannt und genutzt werden.

3.3.5 Anforderungen an die Auslegung adaptiver Tragwerke

Die im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigten Herausforderungen werden durch abgeleitete Anforderungen an eine zu entwickelnde Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke in Tabelle 3.8 konkretisiert.

Tabelle 3.8: Anforderungen an die Auslegung adaptiver Tragwerke

Lastannahmen
Bemessung nach Grenzzuständen orientiert am Eurocode
Spezifische, dynamische Lastannahmen für die Auslegung auf Gebrauchstauglichkeit sowie Tragfähigkeit nach örtlicher Gegebenheit
Berücksichtigung von Lastkollektiven zur Lebensdauerabschätzung und Berechnung der operativen Energie
Zuverlässigkeit
Quantitative Anforderung an die Gesamtzuverlässigkeit nach Eurocode
Festigkeits- und ermüdungsgerechte Bemessung in dynamischen Untersuchungen
Untersuchung von Fehlern bei der Adaption
Berücksichtigung des Einflusses der Platzierung der Aktoren
Modellierung von Reparatur und Wartung
Differenzierung nach Untersuchungen der Zuverlässigkeit und Sicherheit
Sicherheit
Sicherheitsgerechte Auslegung mit quantitativen Sicherheitsanforderungen
Gewährleistung der funktionalen Sicherheit
Untersuchung sicherheitskritischer Fehler und Vermeidung von Gefährdungen
Umweltwirkung
Bewertung und Bemessung nach Material- und operativem Energiebedarf des adaptiven Tragwerks über der Lebensdauer
Vergleich der Umweltwirkung adaptiver und passiver Tragwerke nach üblichen Bewertungsverfahren des Bauwesens mittels eines Life-Cycle Assessments
Systematik der Methode
Interdisziplinarität, Erweiterbarkeit und Flexibilität
Nutzung vorhandener Werkzeuge und Methoden der Fachdisziplinen zur Gewährleistung der Anwendbarkeit
Eindeutigkeit, Durchgängigkeit und Wiederholbarkeit

3.4 Zwischenfazit

Als Grundlage für die Bemessung von Tragwerken wird der Eurocode [8] herangezogen. In seiner Ausführung von 2010 ist dieser beschränkt auf bewährte Bauweisen und Aspekte neuartiger Anwendungen. Ungewöhnliche Konstruktionen und Sonderlösungen sind ausgeschlossen.

Durch die Adaption des Tragwerks an Umgebungslasten ist für eine Auslegung sowohl das Tragwerk als auch das adaptronische System zu untersuchen und gegenüber einem ausschließlich passiv agierenden Tragwerk hinsichtlich seiner Umweltwirkung zu bewerten. Bestehende statische Auslegungsmethoden ermöglichen keine umfassende Bewertung der insbesondere zur dynamischen Kompensation von Lasten eingesetzten adaptiven Tragwerke.

Eine zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Bemessung zeichnet sich im Bauwesen nach Eurocode durch Überdimensionierung aus. In Bezug auf die Umweltwirkung ist eine Überdimensionierung zu vermeiden, während es einer funktionalen Absicherung adaptiver Tragwerke bedarf. Aspekte der Zuverlässigkeit und Sicherheit wurden in der Forschung bisher mehrheitlich vernachlässigt, müssen aufgrund der strengen Anforderungen des Eurocode und im Zusammenhang mit der Umweltwirkung innerhalb der Auslegung aber berücksichtigt werden. Um die Systemzuverlässigkeit adaptiver Tragwerke bei einer nachhaltigen Bemessung des Tragwerks mit ausreichender Sicherheit zu gewährleisten, sind über den Eurocode hinausgehende Methoden und Modelle, wie sie im Maschinenbau Anwendung finden, notwendig. Eine interdisziplinäre Vorgehensweise zur Auslegung adaptiver Tragwerke ist hierfür zielführend.

Wie zu Beginn dieses Kapitels als erste Hypothese formuliert, unterscheidet sich die Bewertung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit bzw. Umweltwirkung adaptiver Tragwerke von passiven Tragwerken. Das Vorgehen zur Auslegung muss grundlegend angepasst werden, da die Adaption einen neuen Bestandteil mit zusätzlichen Anforderungen darstellt und von der Bemessung der Tragstruktur abhängt. Darüber hinaus ist für eine Reduzierung der Umweltwirkung eine exaktere Annahme von Lasten gegenüber einer statischen Vereinfachung mittels Ersatzlasten erforderlich.

Das folgende Kapitel behandelt die Ausarbeitung einer Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke unter Einbezug der in Abschnitt 3.3.5 benannten Anforderungen und widmet sich der zweiten Forschungshypothese.

4 Interdisziplinäre Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke

Der wesentliche Unterschied in der Auslegung adaptiver gegenüber passiver Tragwerke besteht in der durch die Abhängigkeit erforderlichen simultanen Bemessung der Tragstruktur sowie des adaptiven Systems. Aus dieser Abhängigkeit ergibt sich die Notwendigkeit einer iterativen Optimierung. Eine Steigerung der Nachhaltigkeit erfordert die Annahme repräsentativer Lasten. Bisherige Auslegungsmethoden vereinfachen dynamische Bemessungslasten durch statische Ersatzlasten. Die Optimierung der Tragstruktur erfolgt hierbei unter Vernachlässigung offensichtlicher Einflussgrößen auf Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit dynamisch beanspruchter Tragwerke, wie Regeldynamik, Energieverbrauch sowie Ermüdungslebensdauer. Diese Auslegungsgrößen müssen berücksichtigt bzw. bewertet und mit vorgegebenen Grenzwerten aus Normen abgeglichen werden. Eine Verringerung der Tragwerksquerschnitte hat sowohl eine höhere Schwingungsanfälligkeit als auch eine geringere Ermüdungsfestigkeit zur Folge. Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit als Eigenschaften adaptiver Tragwerke beeinflussen sich daher unmittelbar innerhalb der Auslegung und müssen durch die Methode gewährleistet werden.

Aufbauend auf den vorigen Arbeiten und den Randbedingungen, spezifiziert als Anforderungen in Abschnitt 3.3.5, wird in diesem Kapitel eine iterative Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke vorgestellt. Ausgangspunkt bildet ein linear-elastisches Tragwerksmodell, wie es in der Regelungstechnik durch parametrische Modellierung zur Beschreibung mechanischer Strukturen, aufbauend auf der Tragwerkstopologie erstellt wird. Das dynamische Verhalten und die aktive Kontrolle durch den Regler lassen sich über Gleichgewichtsbedingungen mittels der Bewegungsgleichung zweiter Ordnung beschreiben. Dies setzt voraus, dass, wie in der Baustatik und -dynamik üblich, für die Tragelemente der Tragstruktur in guter Näherung eine geringe Dimensionalität angenommen werden kann, womit eine Modellierung durch Stabelemente zulässig ist [142]. Auf der Grundlage der Tragwerkstopologie sind mit dem Modell unterschiedliche Aktorplatzierungen und Regelkonzepte zur Kompensation repräsentativer Lasten simulierbar. Über die Auswertung der Simulation eines Lastkollektivs ergibt sich die Ermüdungslebensdauer sowie der Energieverbrauch der Aktorik. Sowohl der Ersatzteilbedarf als auch die erforderliche Hardwarearchitektur sind Einflussgrößen der Nachhaltigkeit und bestimmen sich aus den Zuverlässigkeits-

und Sicherheitsanforderungen des Systems. Hieraus ergibt sich eine nachfolgend im Detail erläuterte Abfolge für die iterative Optimierung adaptiver Tragwerke aufbauend auf den Ausführungen des vorhergehenden Kapitels.

4.1 Iterativer Auslegungsprozess

Der entwickelte und in Bild 4.1 grafisch dargestellte interdisziplinäre Auslegungsprozess berücksichtigt die Integration und Kooperation der beteiligten Disziplinen der Architektur, des Bauingenieurwesens, der Regelungstechnik und des Maschinenbaus sowie dem darin enthaltenen Fachbereich der ganzheitlichen Ökobilanzierung.

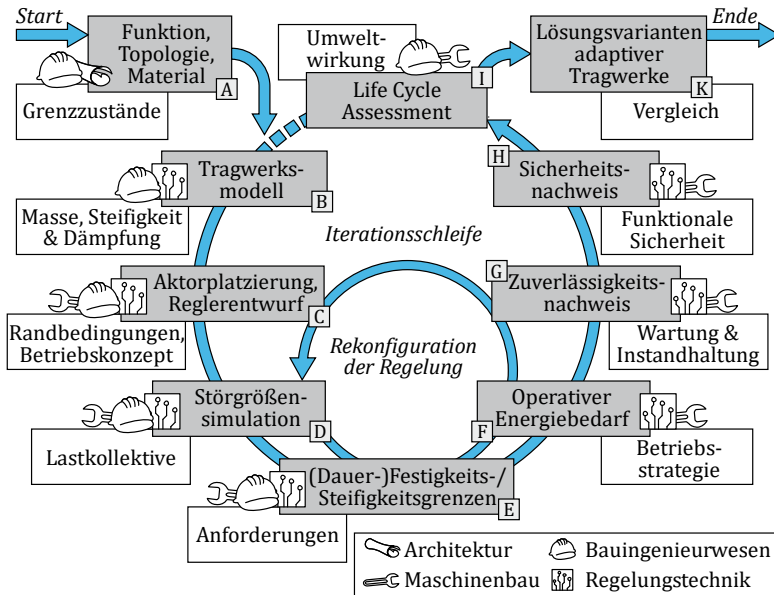


Bild 4.1: Iterativer Auslegungsprozess adaptiver Tragwerke in Anlehnung an [141]

Der Auslegungsprozess beinhaltet zwei Iterationsschleifen und beginnt mit dem Festlegen der Tragwerkstopologie in Schritt A. Die Schritte B-I der Iterationsschleifen werden entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen und ergeben schließlich in Schritt K Lösungsvarianten adaptiver Tragwerke. In der inneren Iterationsschleife ist eine Rekonfiguration der Regelung vorgesehen. Je nach Anzahl und Platzierung der Aktoren stehen zur Adaption an Lasten verschiedene Regelstrategien zur Verfügung, die

sich sowohl in Energiebedarf als auch Ermüdungsgrad bzw. Verschleißerscheinungen unterscheiden. Aus diesem Grund kann durch Rekonfiguration der Regelung eine Optimierung erzielt und die Umweltwirkung weiter reduziert werden.

Basierend auf dem in der Regel aus der Funktion oder Ästhetik des Bauwerks resultierenden Tragwerksentwurf, festgelegt durch den Architekten oder aus einer Topologieoptimierung, beginnt der Auslegungsprozess. Über die Bauart sind die verwendeten Materialien und deren Materialeigenschaften definiert. Das Tragwerksmodell wird im darauffolgenden Schritt B auf der Grundlage des Tragwerksentwurfs parametrisiert und ein linear-elastisches Simulationsmodell erstellt. Die dynamischen Eigenschaften des modellierten Tragwerks, wie Steifigkeit und Dämpfung, werden durch eine FE- und Modalanalyse ermittelt.

Das Platzieren der Aktoren erfolgt in Schritt C. Hierfür können mehrere Kriterien wie z. B. die Steuerbarkeit, die von Weidner et al. [90] mittels der gramschen Steuerbarkeitsmatrix untersucht wurde, maßgebend sein. Ein adaptives Tragwerk ist vollständig steuerbar, wenn ausgehend von einem beliebigen Anfangszustand innerhalb einer endlichen Zeit ein beliebig definierter Endzustand durch eine geeignete Wahl von Eingangsgrößen erreicht werden kann [143]. Weiter kann die Lastrichtung Einfluss auf die Platzierung der Aktoren nehmen.

Es folgt die Störgrößensimulation im Schritt D, in der das Verhalten des Tragwerks unter den dynamischen Lastkollektiven bestimmt wird. Die Lastkollektive sind hierfür als Last-Zeit-Verläufe z. B. aus vorhandenen Messdaten zu bestimmen und gehen damit über die nach Eurocode festgelegten Lastannahmen hinaus. Die aus den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Tragwerks resultierenden Anforderungen sind in Schritt E zu überprüfen. Mit Hilfe der dynamischen Lastkollektive ist eine Analyse des Energiebedarfs zur Adaption der Tragstruktur an die aufgebrachten Lasten in Schritt F vorgesehen. Sofern zur Energiegewinnung Treibhausgase anfallen, was in Deutschland bisher der Fall ist, muss der Energiebedarf in der Berechnung der Umweltwirkung adaptiver Tragwerke berücksichtigt werden.

Abhängig von dem erforderlichen Niveau der Zuverlässigkeit und Sicherheit, basierend auf der Funktionsübernahme durch das adaptronische System, folgt die Auslegung anhand der Grenzwerte für die Grenzzustände. Hieraus definieren sich die Wartungsintervalle für einen Austausch der Komponenten zur Erhaltung der Systemzuverlässigkeit in Schritt G. Der Bedarf an Ersatzteilen sowie notwendige Maßnahmen wie Redundanz zum Erreichen der funktionalen Sicherheit sind Bilanzierungsgrößen der Umweltwirkung. Mittels einem Life-Cycle-Assessment in Schritt I wird die

Umweltwirkung bewertet und ein Vergleich mit der passiven Variante des Tragwerks vorgenommen. Die Iteration bewirkt eine Optimierung des adaptiven Tragwerks durch Anpassung der Bemessung der Tragstruktur und Auslegung der Aktorik. Varianten ergeben sich durch Erhöhen der Anzahl an Aktoren, was mit Materialmehrverbrauch einhergeht, allerdings ist dadurch eine weitere Masseneinsparung innerhalb der Tragstruktur möglich und ein geringerer Energiebedarf erzielbar.

4.2 Modellierung und Parametrisierung

Der in Bild 4.1 dargestellte iterative Auslegungsprozess ist in Bild 4.2, Bild 4.4 und Bild 4.5 in 26 Teilschritte differenziert. Die Unterteilung sowie eine sequentielle Darstellung ermöglichen und vereinfachen die Anwendung. Die Teilschritte enthalten detaillierte Ausführungen zum erforderlichen Vorgehen und den zu bestimmenden Größen.

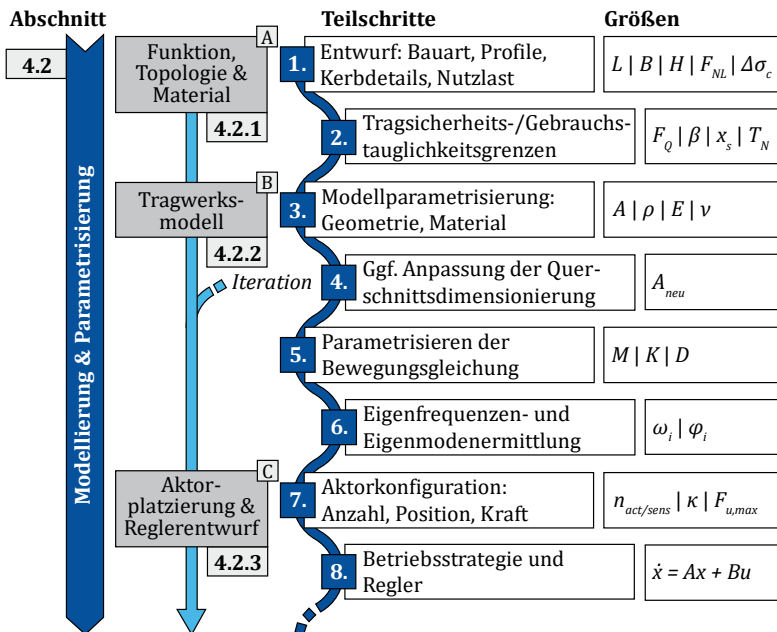


Bild 4.2: Teilschritte des iterativen Auslegungsprozesses adaptiver Tragwerke (1/3) in Anlehnung an [144]

Durch Kategorisierung in die Prozessschritte Modellierung & Parametrisierung, Simulation & Auswertung und Zuverlässigkeits-, Sicherheits- & Nachhaltigkeitsanalyse lassen sich die Schritte aufteilen. Diese Struktur bestimmt die Gliederung der folgenden Abschnitte, auf die in den Bildern mittels Verweis Bezug genommen wird. Die Verknüpfung mit dem in Bild 4.1 dargestellten, kreisförmigen Prozess ist anhand der mit den Großbuchstaben A-K gekennzeichneten Schritte gegeben.

In der Modellierung und Parametrisierung wird ausgehend von den Randbedingungen, aufbauend auf dem architektonischen Entwurf und der damit verbundenen erforderlichen Tragstruktur, ein Tragwerksmodell erstellt. Die dynamischen Tragwerkeigenschaften werden aus einer FE- und Modalanalyse ermittelt. Nachfolgend sind die notwendigen Schritte hierfür beschrieben.

4.2.1 Funktion, Topologie und Material

Für die Modellierung der adaptiven Tragstruktur ist eine Beschreibung des Aufbaus in Länge L , Breite B und Höhe H erforderlich. Die Gestaltung in Modulbauweise vereinfacht eine Modellierung. Für Wartungsmaßnahmen ist der Austausch von aktiven Tragwerksteilen vorzusehen und in den Verbindungsarten zu berücksichtigen. Die Kerbdetails der Verbindungsstellen mit Kerbzahl $\Delta\sigma_c$ sind zur Auswertung der Ermüdungsfestigkeit in einem noch folgenden Schritt relevant. Die zu erwartenden, näherungsweise statischen Nutzlasten F_{NL} , als Stockwerks- und Fassadenlasten sowie Schneelasten, sind für die Dimensionierung mit Lastkombinationen nach Eurocode festzulegen, sodass ein Lastabtrag statischer Lasten gewährleistet wird. Die Bauart bestimmt die verwendeten Materialien und bildet die Grundlage für die Parametrisierung des Modells in Schritt drei.

Zunächst ist im zweiten Schritt die erforderliche Auslegungssicherheit der Tragstruktur festzulegen. Dieser Schritt bestimmt, inwieweit die Aktorik im Betrieb eine Sicherheitsfunktion durch Kompensation lateraler, außergewöhnlicher Lasten ausführt. Hierzu sind entsprechende Lastkombinationen F_Q anzunehmen, die nur durch ein adaptives Verhalten des Tragwerks abgetragen werden können. Der Zuverlässigkeitsindex β ist für ein Versagen der Tragstruktur anhand der Schadensfolge zu wählen. Hierfür ist eine angestrebte Nutzungsdauer T_N für das Tragwerk anzunehmen, die im weiteren Verlauf nachgewiesen werden muss. Auf die funktional sichere Auslegung der Adaptionfunktion anhand der Anforderungen an sicherheitskritische Systeme nach Vorgaben des Maschinenbaus wird in Abschnitt 4.4.2 Bezug genommen. Zu beachten ist die von diesem Schritt abhängige Häufigkeit der Anforderung der

Adaptionsfunktion, bedingt durch die gewünschten zu aktuierenden Lasten. Die Gebrauchstauglichkeitsgrenzen bestimmen sich über die Randbedingungen der maximalen Kopfpunktauslenkung x_s und komfortablen Beschleunigung a_s .

4.2.2 Tragstrukturmodell

In Schritt drei entsteht das Tragwerksmodell aus dem beschriebenen Aufbau mit den Parametern der Querschnittsflächen A , der Materialdichte ρ , dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν_q . Ein linear-elastisches Werkstoffverhalten stellt nach Eurocode 0 [8] für dynamische Untersuchungen eine ausreichend gute Näherung dar. Das Simulationsmodell kann mit üblichen FE-Tools, wie z. B. ANSYS Mechanical [145] erstellt und ausgewertet werden. In einer Iterationsschleife besteht die Möglichkeit die Querschnittsdimensionierung abhängig vom vorigen Ergebnis anzupassen und dadurch weitere Materialeinsparungen zu erzielen.

Mit Hilfe des FE-Programms ist in Schritt fünf eine automatisierte Berechnung der Massenmatrix M und Steifigkeitsmatrix K möglich. Die Dämpfungsmatrix D ergibt sich z. B. als Rayleigh Dämpfung, wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben. Ausgehend vom homogenen, ungedämpften Teil der Bewegungsgleichung zweiter Ordnung (2.1) kann, wie von Heidingsfeld et al. [146] bzw. Wagner et al. [147] beschrieben und nachfolgend zusammengefasst, durch die Kopplung mit der harmonischen Lösung $q(t) = \varphi_i e^{j(\omega_i t)}$ das generalisierte Eigenwertproblem nach Gleichung (4.1) formuliert werden.

$$(K - \omega_i^2 M)\varphi_i = 0 \quad (4.1)$$

Hieraus sind in einer Modalanalyse in Schritt sechs die Eigenfrequenzen ω_i der Eigenmoden φ_i ermittelbar. Ausgedrückt über die modalen Amplituden $\eta(t)$ lässt sich Gleichung (2.1) als entkoppelte, modale Bewegungsgleichung mit $q(t) = \Phi\eta(t)$ formulieren, wobei $\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_n]$ der Matrix der Eigenmoden entspricht. Nach Multiplikation von links mit Φ^T ergibt sich die Formulierung nach Gleichung (4.2).

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}(t) + 2Z\Omega\dot{\eta}(t) + \Omega^2\eta(t) &= \Phi^T f(t) \\ t > 0, \quad \eta(0) &= \Phi^{-1}q_0, \quad \dot{\eta}(0) = \Phi^{-1}q_1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Die modale Eigenfrequenzmatrix $\Omega = \text{diag}([\omega_1, \dots, \omega_n])$ ist in dieser Form eine Diagonalmatrix mit den Anteilen der Eigenfrequenzen auf der Hauptdiagonale. Die sogenannte Identitätsmatrix I entsteht aus $I = \Phi^T M \Phi$. Für die modalen Dämpfungskoeffizienten ζ_i ergibt sich:

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{\omega_i} + \alpha_2 \omega_i \right) \quad (4.3)$$

Damit ist die modale Dämpfungsmatrix $Z = [\zeta_1, \dots, \zeta_n]$. Eine Ordnungsreduktion unter Vernachlässigung von Eigenmoden ist meist notwendig und für einen hinreichend genauen Reglerentwurf gängige Praxis [84].

4.2.3 Aktorplatzierung & Reglerentwurf

In Schritt sieben werden Parameter zur Konfiguration des Reglers festgelegt. Hierzu gehören sowohl die Anzahl der Aktoren und Sensoren $n_{akt/sens}$ als auch die Platzierung κ innerhalb des adaptiven Tragwerks. Die Aktivierung von Hochhaus-Tragwerken erfordert große Kräfte. Die Maximalkraft $F_{u,max}$ ist in jedem Fall beschränkt, was vom Regler zu berücksichtigen ist.

Eine Platzierung der Aktoren kann hinsichtlich statischer Lasten z. B. nach Teufel [71] oder Senatore [75] sowie statischer und dynamischer Lasten wie bei Weidner et al. [90] erfolgen. Die Platzierung der Aktoren stellt einen Kompromiss aus den Zielgrößen minimaler Energiebedarf, geringe Anzahl an Aktoren und gewährleisteteste Steuerbarkeit bzw. Lastkompensation dar. Während in der Luftfahrt und der Automobilindustrie eine primäre Anströmrichtung vorliegt, ist im Bauwesen die Anströmung aus variablen Windrichtungen möglich [39]. Insbesondere Hochhaus-Tragwerke unterliegen keiner definierten lateralen Lastrichtung, was in der Platzierung berücksichtigt werden muss. Im Fall von Brücken ist zu überprüfen, inwieweit eine dominante Lastrichtung, zumeist bestimmt durch die Gravitation, angenommen werden kann. Eine symmetrische Platzierung der Aktoren vermeidet die einseitige Aktivierung, wodurch sich zusätzliche Verformungen und Zwänge ergeben können. Je nach statischer oder dynamischer Lastkompensation ist eine Platzierung der Aktoren, wie von Weidner et al. [90] gezeigt, zudem auf bestimmte sinnhafte Elemente begrenzt, was den Lösungsraum einschränkt.

Für ein beispielhaftes in Bild 4.3 dargestelltes Hochhaus-Tragwerk mit 48 potentiellen Aktorelementen e_{pot} ergeben sich aus dem Binomialkoeffizienten für $n_{akt} = 8$ Aktoren $3,77 \times 10^8$ Platzierungsmöglichkeiten κ . Durch Randbedingungen wie eine vollsymmetrische Aktivierung verringert sich dies auf $\kappa = 66$. Bei Unabhängigkeit von der Lastrichtung, wie nach DIN EN 1991-1-4 [131] gefordert, sowie Platzierung in den Diagonalen, wie von Connor [25] zur Dämpfung dynamischer Lasten vorgeschlagen, bleiben $\kappa = 4$ Möglichkeiten. Für eine Platzierung von $n_{akt} = 8$ Aktoren sind in der vollsymmetrischen Anordnung lediglich $n_{akt,vsy} = 2$ von acht Aktoren frei

wählbar, da sich die Platzierung der restlichen Aktoren aus der Symmetrie ergibt. Bei Lastrichtungsunabhängigkeit und Beschränkung auf die Diagonalen legt die Wahl eines Aktors $n_{akt,lru,d}$ die Platzierung fest, siehe Bild 4.3.

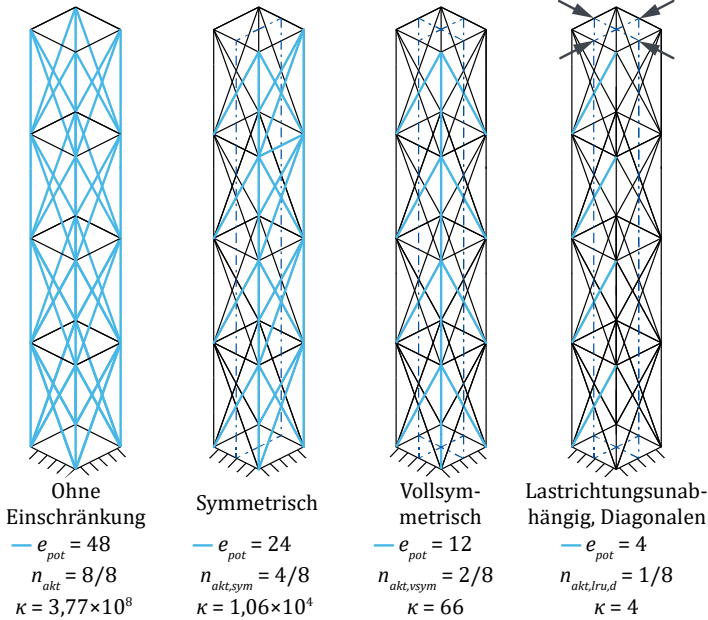


Bild 4.3: Einschränkung der Platzierungsmöglichkeiten der Aktoren im Tragwerk

Da die Hochhaus-Tragstruktur im übertragenen Sinn einem eingespannten Kragträger gleicht, ist die Manipulation an der Einspannstelle effektiv. Abhängig von der Schwingungsform bei dynamischer Anregung sind weitere Platzierungen geeignet. Die Platzierung der Sensoren zur Ermittlung der Führungsgrößen kann analog erfolgen.

Für den Reglerentwurf in Schritt acht ist eine Überführung der modalen Bewegungsgleichung aus (4.2) in die entsprechende Zustandsraumdarstellung, beschrieben durch Differentialgleichungen erster Ordnung, sinnvoll. Diese Beschreibung vereinfacht den Reglerentwurf für multivariable Systeme [25, 84]. Wie von Heidingsfeld et al. [146] und Böhm et al. [89] gezeigt, ist eine systemtheoretische Beschreibung der auf das Tragwerk einwirkenden Kräfte als Stellgrößen $u(t) \in \mathbb{R}^m$ und Störgrößen $F_V(v(t)) \in \mathbb{R}^n$ nach Gleichung (4.4) möglich.

$$f(t) = Fu(t) + F_v(v(t)) \quad (4.4)$$

Über $F \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ist die Wirkung der Stellgrößen auf die Tragstruktur in Form der Aktorkräfte beschrieben. Durch Einführen des Zustandsvektors $x(t) = [\eta_1, \dot{\eta}_1]^T$ ergibt sich die allgemeine Zustandsraumdarstellung für die primären Modalkoordinaten nach Substitution und Umformung zu:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + B_1 u(t) + b_v(v), & t > 0, & \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + d_v(v) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\text{mit} \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega_1^2 & -2Z_1\Omega_1 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_1^T F \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Hierbei ist A_1 die Systemmatrix und B_1 die Eingangsmatrix. Die unbekanntenen Störgrößen v sind durch $b_v(v)$ berücksichtigt. In der Gleichung für den Systemausgang $y(t)$ beschreibt die Ausgabematrix C die Sensorausgänge und sensortypspezifisch ergibt sich die Durchführungsmatrix D . Beide werden in der Modellierung von Sensorfehlern in Schritt 19 beschrieben. Die Auswirkung der Störgrößen ist über $d_v(v)$ erfasst.

4.3 Simulation und Auswertung

Das weitere Vorgehen der Simulation und Auswertung zeigt Bild 4.4 und setzt den in Bild 4.2 begonnenen Auslegungsprozess fort. Die Untersuchung der Lastkompensation der Störgrößen durch die Aktorik ist Ziel der Störgrößensimulation, die in Abschnitt 4.3.1 behandelt wird. Hierzu müssen die erforderlichen Störgrößen zunächst erfasst und festgelegt werden. In Abschnitt 4.3.2 erfolgt die Auswertung anhand der vorgegebenen Randbedingungen, die das Tragwerk nach den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllen muss. Schließlich kann bei Simulation eines repräsentativen Lastkollektivs der operative Energiebedarf ausgewertet werden. Das Vorgehen hierzu ist in Abschnitt 4.3.3 erläutert. Die Störgrößensimulation dient darüber hinaus der Untersuchung von Komponentenausfällen und deren Auswirkung auf die Adaptionfunktion als Gegenstand der Zuverlässigkeitsanalyse in Abschnitt 4.4.1.

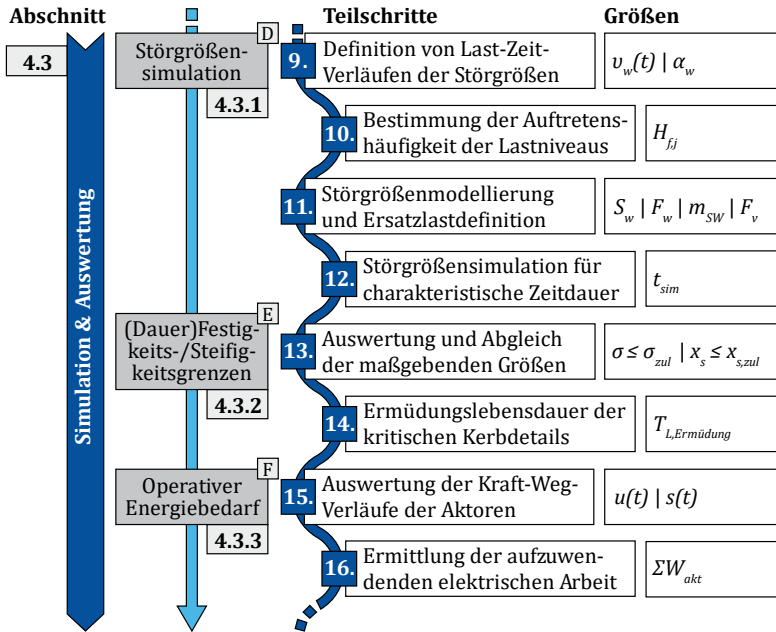


Bild 4.4: Teilschritte des iterativen Auslegungsprozesses adaptiver Tragwerke (2/3)

4.3.1 Störgrößensimulation repräsentativer Lastkollektive

Der Eurocode 0 definiert außergewöhnliche Lasten und Lasten ständiger Bemessungssituationen. Für aussagekräftige Lebensdauerabschätzungen sind Lastannahmen, wie sie für Windlasten nach Eurocode 1 in Abschnitt 3.2.2 als mittlere Windgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer definiert sind, unzureichend. Die den Lebensdauerabschätzungen zugrunde liegenden Lastannahmen bestimmen neben den Modellunsicherheiten im Wesentlichen die Genauigkeit der Aussage. Im Maschinenbau wird daher viel Aufwand betrieben um möglichst repräsentative Lastkollektive zu ermitteln [148, 149]. Einerseits soll ein Ausfall des Produkts durch zu geringe Lastannahmen vermieden werden, andererseits ist eine enorme Überdimensionierung unerwünscht. Für adaptive Hochhaus-Tragwerke sind insbesondere Windlasten eine relevante Bemessungsgröße, welche die Tragstruktur dynamisch anregen. Die Ausführungen in dieser Arbeit konzentrieren sich daher auf die Ermittlung von Last-Zeit-

Verläufen sowie Auftretenshäufigkeiten von Windlasten bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten. Davon unabhängig ist die Implementierung weiterer Lasten wie z. B. Erdbebenlasten, orientiert am Verfahren für Windlasten, möglich.

Schritt neun des Auslegungsprozesses beinhaltet die Ermittlung von Last-Zeit-Verläufen. Für Windlasten ist dies der Schrieb der Windgeschwindigkeit v_w über der Zeit t . Durch die Simulation des dynamischen Verlaufs ist später die Auswertung der operativen Energie der Aktoren für eine Bilanzierung der Umweltwirkung möglich. Das Erfassen der Hauptwindrichtung α_w kann die Lastrichtung einschränken, eine Berücksichtigung in der Auslegung z. B. für die Platzierung der Aktoren ist aufgrund der meist willkürlichen Richtung von Naturereignissen jedoch kritisch zu bewerten. Wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt, berücksichtigt der nationale Anhang des Eurocode 1 [131] landesspezifische und durch Einteilung in Zonen weiter spezifizierte Angaben zu den mittleren Windgeschwindigkeiten. Detailliertere Aussagen der oftmals sehr lokalen Umweltbedingungen müssen daher standortspezifisch vorliegen.

Nach der europäischen Richtlinie 2003/4/EG [150] besteht die Verpflichtung der Mitgliedstaaten Umweltinformationen öffentlich zugänglich zu machen. Für Baden-Württemberg steht hierfür ein Daten- und Kartendienst der Landesanstalt für Umwelt (LUBW) [132] zur Verfügung. Dieser bietet in der Kategorie „Luft“ Angaben zu Windstatistiken. Dort sind synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen in einem Raster von $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ auf der Grundlage der Jahre 2001 bis 2010 definiert. Aus dieser Datenbank lassen sich Angaben zu den Windlasten mit genauerer Berücksichtigung des Standorts entnehmen. Die mathematische Modellierung von Last-Zeit-Schrieben erfolgt anhand des Energiedichtespektrums als Kaimal-Spektrum wie bei Branlard [151], ähnlich der Bestimmung der Böenenergie nach Eurocode 1 [131].

$$S_w(\omega) = v_*^2 \frac{52,5z}{v_m \left(1 + 33 \frac{\omega z}{v_m}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (4.7)$$

Das Energiedichtespektrum $S_w(\omega)$ berücksichtigt den Variationskoeffizient v_* , die Höhe z und die mittlere Windgeschwindigkeit v_m . Die Angaben zur mittleren Windgeschwindigkeit lassen sich aus den Windklassen der Häufigkeitsverteilungen der beschriebenen Ausbreitungsklassenzeitreihen ableiten. Mit der Standardabweichung $\sigma_{s,c}$ des Spektrums werden zufällige Fourier-Koeffizienten c erzeugt.

$$\sigma_{S,c}^2 = \frac{N_{sim}}{4\pi \cdot f_S} \cdot S_w(\omega_l) \quad (4.8)$$

Die Bestimmung der zufällig erzeugten Serie im Zeitbereich $v_{w,k}$ von $k = 1, \dots, N_{sim}$ erfolgt durch inverse Fourier-Transformation der Fourier-Koeffizienten aus dem Frequenzbereich nach (4.9). Die Fourier-Koeffizienten $c = [c_0, \dots, c_{N-1}]$ werden so gewählt, dass die Zeitserie keine komplexen Koeffizienten enthält. Das Zeitsignal wird entsprechend der Schrittweite f_S mit gleicher Anzahl Samples k erzeugt.

$$v_{w,k} = 2\pi f_S \frac{1}{N_{sim}} \sum_{l=0}^{N_{sim}-1} c \cdot e^{i \left(\frac{2\pi l k}{N_{sim}} \right)} \quad (4.9)$$

Der auf diese Weise generierte Last-Zeit-Verlauf muss in Schritt 11 durch Definition von Ersatzlasten auf das Tragwerk aufgebracht werden. Hierfür wird ein Störgrößenmodell wie von Gienger [87] beschrieben verwendet. Da eine numerische Ermittlung der dynamischen Bauwerksreaktion auf den naturgetreu modellierten Wind erfolgt, ist in Übereinstimmung mit dem Eurocode 1-4 [130] eine Berücksichtigung von Strukturbeiwerten nicht erforderlich. Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe z_x und der Referenzgeschwindigkeit v_w in der Referenzhöhe z berechnet sich nach dem in Deutschland gültigen Potenzprofil zu:

$$v_w(z_x) = v_w \cdot \left(\frac{z_x}{z} \right)^a \quad (4.10)$$

Der Profilexponent a nach Hellmann berücksichtigt die Geländerauigkeit. Aus der höhenabhängigen Windgeschwindigkeit wird der dynamische Geschwindigkeitsdruck p_{dyn} ermittelt. Mit ρ_L ist die Dichte der Luft berücksichtigt.

$$p_{dyn}(z_x) = \frac{1}{2} \rho_L \cdot v_w(z_x)^2 \quad (4.11)$$

Die Windkraft F_w auf die Fassadenfläche eines Stockwerks der Breite B_{SW} und Höhe H_{SW} , folgt aus der flächigen Anströmung in Abhängigkeit des Anströmwinkels α_w und der Höhe z_{SW} in der sich das Stockwerk befindet. Die Windkraft ergibt sich hieraus für jede Seite j des Tragwerks zu:

$$F_{w,j}(\alpha_w, z_x) = \int_{z_x}^{z_x + H_{SW}} B_{SW} \cdot c_{w,j}(\alpha_w) \cdot p_{dyn}(z_x) \quad (4.12)$$

Dabei ist der anströmungsabhängige Luftwiderstandsbeiwert $c_{w,j}$ einzusetzen. Die Windkraft teilt sich auf die Befestigungspunkte der Fassade auf, die vereinfacht den

Knotenpunkten des Tragwerks $f_{w,j}$ entsprechen. Durch Superposition mit den Stockwerkslasten $m_{SW,i}$ für jedes Stockwerk $i = 1, \dots, n_{SW}$ folgt nach Gienger für die Kräfte der Störgrößen F_v bei $j = 4$ Außenflächen:

$$F_v(v_w, \alpha_w, m_i) = \sum_{i=1}^{n_{SW}} \sum_{j=1}^4 f_{w,j} \cdot F_{w,i,j}(\alpha_w) + \sum_{i=1}^{n_{SW}} f_{q,i} \cdot m_{SW,i} \cdot g \quad (4.13)$$

Hierbei sind die Befestigungspunkte der Stockwerke als Knotenpunkte des Tragwerks durch den Vektor $f_{q,i}$ beschrieben.

In Schritt zehn ist die Definition der Häufigkeitsverteilung $H_{f,j}$ der einzelnen Lastniveaus j vorgesehen. Zusammengefasst bilden die Lastniveaus das Lastkollektiv, das eine repräsentative Beschreibung der über der Lebensdauer schädigenden Lasten darstellt.

Im folgenden Schritt 12 ist für die Simulation der Störgrößeneinwirkung auf das Tragwerk eine Simulationsdauer t_{sim} zu bestimmen. Bei einer möglichst kurzen Simulationszeit sollen die Einflüsse der dynamischen Einwirkung erfasst werden. Hierfür ist das Schwingungsverhalten der Tragstruktur und die Frequenz der dynamischen Einwirkung zu berücksichtigen, um eine Anregung sowie das Abklingen von Schwingungen der Tragstruktur hinreichend gut zu bewerten. Davon abhängig wird die Simulationszeit festgelegt. Die Modellierung des Tragwerks und des Reglers sowie die Durchführung und Auswertung der Simulation kann bspw. über das Berechnungstool Matlab [152] erfolgen.

4.3.2 (Dauer-)Festigkeits- & Steifigkeitsgrenzen

Für Schritt 13 ist der Abgleich der funktionsmaßgebenden Größen erforderlich. Die Bewertung erfolgt abhängig von festigkeits-, steifigkeits- oder dauerfestigkeitsdominierter Auslegung. Ersteres erfordert die Auswertung der Spannungen σ_i über der Simulationszeit t_{sim} aus dem Quotienten der ermittelten Normalkräfte $F_{N,i}(t)$ sowie der Bauteilquerschnitte A_i und den Biege- bzw. Schubspannungen. Die Vereinfachung der Tragwerksteile durch Stäbe lässt ausschließlich die Betrachtung von Normalspannungen zu. Für die Betrachtung ermüdungskritischer Kerbstellen sind unter Umständen Biegespannungen relevant, die, sofern nicht aus FE-Berechnungen bestimmt, aus der Biegelinie des Tragwerks sowie deren Randbedingung einer festen Einspannung nach Gleichung (4.14) angenähert werden können. Die Näherung durch ein Polynom gelingt aufgrund der verhältnismäßig geringen Auslenkung gegenüber der Tragwerkshöhe in der Regel mit hinreichend gutem Ergebnis. Hierüber folgt aus

Gleichung (4.15) z. B. für ein Polynom fünften Grades das Biegemoment aus dem die Biegespannung mit Hilfe des Widerstandsmoments gegen Biegung ermittelt wird.

$$w_t(z) = c_1 z^5 + c_2 z^4 + c_3 z^3 + c_4 z^2 \quad (4.14)$$

$$M_{B,t}(z) = EI_y \cdot w_t''(z) = [20c_1 z^3 + 12c_2 z^2 + 6c_3 z + 2c_4] \cdot EI_y \quad (4.15)$$

Die Koeffizienten $c_{1...4}$ lassen sich für jeden Simulationszeitschritt über die Bedingung $q_i(t) = w_t(z_i)$ in annehmbarer Rechenzeit auswerten. Für den Vergleich mit den zulässigen Werkstoffkennwerten σ_{zul} nach Gleichung (4.17) ist die Vergleichsspannung σ_V aus Normalspannung σ_N , Biegespannung σ_B und Schubspannung τ für duktile Werkstoffe nach der GEH [153] mittels Gleichung (4.16) zu bilden.

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_B)^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{zul} \geq \sigma_{V,max,i} = \max(\sigma_{V,i}(t)), \quad t \in [0, t_{sim}] \quad (4.17)$$

Die Steifigkeitseigenschaften ergeben sich aus dem Zusammenspiel der Tragstruktur mit dem adaptronischen System. Die vereinbarten Gebrauchstauglichkeitsgrenzen, zumeist Kopfpunktverschiebung x_s und -beschleunigung a_s , müssen unter der maßgeblichen Lastkombination eingehalten werden.

Die Ermittlung der Ermüdungsschädigung erfolgt im 14. Schritt. Hierfür ist eine Auswertung der Simulation des realitätsnahen Lastkollektivs erforderlich. Darüber hinaus sind die ermüdungsrelevanten Kerbstellen nach DIN EN 1993-1-9, dem Eurocode 3 [135], zu bestimmen. Eine niedrige Kerbfallzahl $\Delta\sigma_c$ drückt eine geringe ertragbare Spannungsschwingbreite aus und ist ein Indiz für eine ermüdungskritische Kerbstelle. Aufgrund der strukturintegrierten Aktorik zur Schwingungsdämpfung sollten umliegende Kerbstellen nicht vernachlässigt werden. Die Dämpfung von Schwingungen führt zu einem Eintrag an Kräften durch die Aktorik, weshalb eine vorzeitige Ermüdung der Strukturkerbstellen der Integrationspunkte möglich ist. Die Einteilung der Kerbstellen erfolgt durch Kategorisierung und Bestimmung der ermüdungsrelevanten Parameter (Abschnitt 3.2.3). Aus der Simulation werden die Spannungszyklen jedes Lastniveaus mit Hilfe der Rainflow-Methode unter Berücksichtigung der Mittelspannung ausgewertet. Durch Erfassen der Spannungsamplitude σ_A und der Mittelspannung σ_m kann für jedes Schwingenspiel N_i nach Bewerten des Schädigungsbeitrags auf die Anzahl ertragbarer Schwingenspiele für die Last-Zeit-Simulation hochgerechnet werden. Über die Auftretenshäufigkeit aller Lastniveaus j lässt sich daraus eine Aussage über die Ermüdungslebensdauer unter der Kollektivbeanspruchung treffen. Zu unterscheiden ist zwischen den Schwingenspielen oberhalb und unterhalb der Dauerfestigkeit σ_D .

$$\Delta\sigma_{A,i} \geq \Delta\sigma_D: N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_{A,i}} \right)^{m_1} \cdot 2 \times 10^6, \text{ mit } m_1 = 3 \quad (4.18)$$

$$\Delta\sigma_{A,i} < \Delta\sigma_D: N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{A,i}} \right)^{m_2} \cdot 5 \times 10^6, \text{ mit } m_2 = 5 \quad (4.19)$$

Für Schwingspiele unterhalb der Dauerfestigkeit schlägt Haibach [106] einen Spannungsexponent $m_2 = 2m_1 - 1$ vor, wonach keine echte Dauerfestigkeit bzw. Ermüdungsfestigkeit besteht und konservativ gesehen auch geringe Spannungsamplituden schädigend wirken. Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Die Schädigungsberechnung erfolgt durch Schadensakkumulation nach Gleichung (2.9), wobei jedes Lastniveau als Kollektivbeanspruchung durch die dynamischen Anteile der Lasten wirkt. Zunächst ist die Schädigung als Summe der Teilschädigungen des Last-Zeit-Schriebs und schließlich die Gesamtkollektivschädigung mit Berücksichtigung der Häufigkeiten $H_{f,i}$ zu ermitteln. Die Angabe in Form der Lebensdauer T_L ist meist anschaulicher und lässt sich über die Simulationszeit und Umrechnung mittels t_{Jahr} in Jahren nach Gleichung (4.20) ermitteln. Das Verhältnis t_{Jahr}/t_{sim} bildet den Hochrechnungsfaktor der Schädigung des Simulationszeitraums.

$$T_{L,Ermüdung} = \left(\frac{t_{Jahr}}{t_{sim}} \cdot H_{f,i} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_{j,i}} \right)^{-1} \text{ Jahre} \quad (4.20)$$

Die Ermüdungslebensdauer muss die Nutzungsdauer mit ausreichender Wahrscheinlichkeit übersteigen. Die Ermüdungsfestigkeitskurven des Eurocode berücksichtigen hierbei eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 %.

4.3.3 Operativer Energiebedarf

Im 15. Schritt erfolgt die Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe der Aktoren. Dies dient der Ermittlung des operativen Energiebedarfs für die Bilanz der Umweltwirkung. Wie für den Reglerentwurf in Schritt acht gezeigt, sind die Aktorkräfte durch die Stellgrößen $u(t)$ beschrieben. Für die Stellwege Δs ist eine Auswertung der Verschiebungen notwendig, die aus der Bewegungsgleichung (2.1) als Vektor $q(t)$ für die Knotenpunkte hervorgehen. Die Differenz der Längenänderung durch die Knotenverschiebung Δl_q und der Dehnung des aktiven Strukturelements Δl_ε zu den Zeitpunkten t und $t + 1$ ergibt den erforderlichen Stellweg Δs nach Gleichung (4.21).

$$\Delta s_{akt}(\Delta t) = \Delta l_q - \Delta l_\varepsilon = l_q(t + 1) - l_q(t) - l_\varepsilon(t + 1) - l_\varepsilon(t) \quad (4.21)$$

Der Stellweg wird innerhalb des Zeitintervalls $\Delta t = [t, t + 1]$ zurückgelegt. Aus der Differenz der als konstant angenommenen Aktorkraft $\Delta F_{akt}(\Delta t)$ in diesem Zeitintervall kann die Arbeitsänderung unter Einbezug des Wirkungsgrads η_{eff} , z. B. für eine Hydraulikdruckerzeugung der Aktoren, berechnet werden.

$$W_{akt}(\Delta t) = \frac{1}{2 \cdot \eta_{eff}} \cdot \Delta F_{akt}(\Delta t) \cdot \Delta s_{akt}(\Delta t) \quad (4.22)$$

Die Summe der zu verrichtenden Arbeit stellt schließlich eine Näherung der zu erwartenden elektrischen Arbeit $W_{akt,el}$ unter Vernachlässigung der Bereitstellungenergie und einer theoretisch gewinnbaren elektrischen Arbeit aus dem Rückhub dar.

$$W_{akt,el} = \frac{1}{3,6 \times 10^6} \cdot \sum_{t=0}^{t_{sim}} W_{akt}(\Delta t) \text{ kWh}, \quad W_{akt}(\Delta t) > 0 \quad (4.23)$$

Die Betriebsenergie fällt ausschließlich im aktiven Betrieb des adaptiven Tragwerks an. Für simulierte Windprofile, die passiv ertragen werden, ist kein Energiebedarf zu berücksichtigen. Sofern erforderlich kann nach diesem Schritt bereits die Umweltwirkung zu Vergleichszwecken mit einer passiven Variante des Tragwerks überschlägig abgeschätzt werden, um weiteren Entwicklungsaufwand gering zu halten. Für Ersatzteilkomponenten des adaptronischen Systems sind hierfür Schätzwerte anzunehmen, da diese erst aus der Zuverlässigkeitsanalyse im nun folgenden Schritt hervorgehen.

4.4 Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit

Die nachfolgenden Schritte behandeln die Zuverlässigkeits-, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsanalyse zur Auslegung adaptiver Tragwerke. Wie im Stand der Forschung und Technik differenziert, ist die Zuverlässigkeit funktionsbezogen als Vermeidung von Ausfällen während einer definierte Lebensdauer formuliert. Dagegen beschäftigt sich die Sicherheit mit der Risikominderung und Vermeidung von Gefährdungen. Die Auslegung nach Eurocode für Lastkombinationen verhindert mit ausreichender Sicherheit ein Versagen der Tragstruktur für die gewünschte Nutzungsdauer. Der Zuverlässigkeitsnachweis der Systemzuverlässigkeit adaptiver Tragwerke setzt nun den Nachweis der Überlebenswahrscheinlichkeit als Ermüdungsfestigkeit der Tragstruktur, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, voraus sowie zusätzlich die zuverlässige und sichere Funktion der Adaption, die z. B. im Fall von kritischen Lasten die Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit sicherstellt. Ein Sicherheitsnachweis ist bei

tragsicherheitsrelevanten Funktionen der Adaption notwendig. Aus dem erforderlichen Maß an Sicherheitsintegrität bestimmt sich die Anforderung an die Funktionsfähigkeit bzw. der notwendige Diagnosedeckungsgrad. Der Ersatzteilbedarf sowie die erforderliche Redundanz dienen als Eingangsgrößen der Nachhaltigkeitsanalyse. Eine iterative Vorgehensweise optimiert die Materialersparnis und dient der Anpassung der Auslegungsgrößen. Daraus ergeben sich Lösungsvarianten, die sich in Adaptionsgrad und damit Materialersparnis sowie Anzahl und Platzierung der Aktoren unterscheiden. Der in Teilschritte gegliederte Ablauf mit Aufteilung der nachfolgenden Abschnitte ist in Bild 4.5 dargestellt und knüpft an den in Bild 4.4 gezeigten Ablauf an.

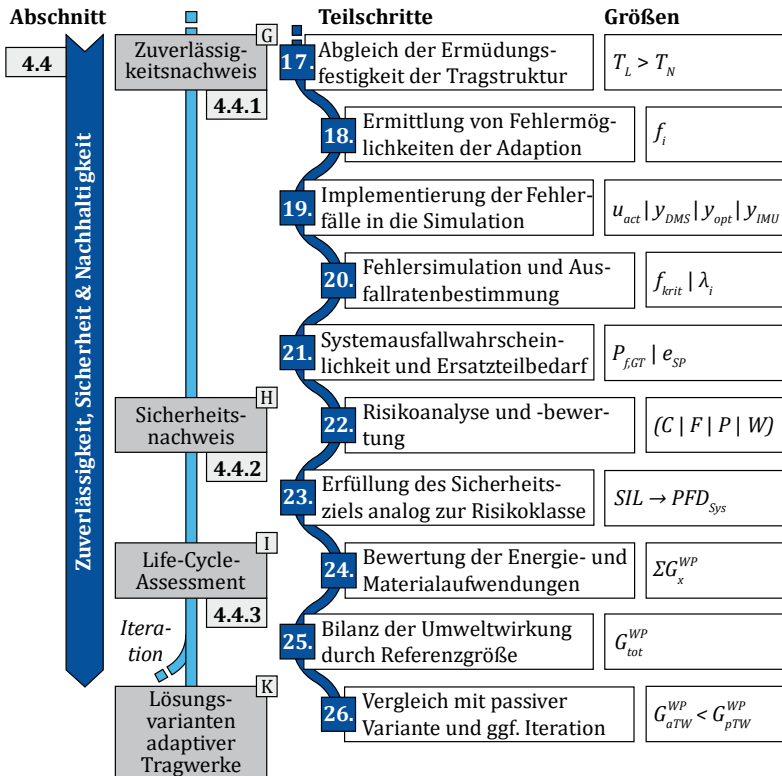


Bild 4.5: Teilschritte des iterativen Auslegungsprozesses adaptiver Tragwerke (3/3) in Anlehnung an [144]

4.4.1 Zuverlässigkeitsnachweis

Mit Schritt 17 folgt innerhalb des Zuverlässigkeitsnachweises zunächst die Auswertung der Ermüdungsfestigkeit und daraus die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit durch Ermüdung. Die Ermüdungsfestigkeitskurven aus Versuchen basieren auf einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{0,Fat} = 95\%$ und damit einer Wahrscheinlichkeit für Ermüdungsversagen von $P_{f,Fat} = 5\%$. Die Anforderung an die Versagenswahrscheinlichkeit durch Ermüdung ist beispielhaft für die Schadensfolgeklasse CC 2 nach Tabelle 3.3 für eine Lebensdauer von 50 Jahren mit einem Zielwert des Zuverlässigkeitsindex $\beta = 1,5 \dots 3,8$ angegeben. Dies entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit P_f von $0,0072\% \dots 6,7\%$ nach der kumulativen, standardisierten Normalverteilung. Der Bereich ist vergleichsweise groß und abhängig von Reparatur und Schadenstoleranz. Wichtig ist in diesem Fall die Aussage der Lebensdauer verbunden mit einer Wahrscheinlichkeit für Überleben oder Versagen.

Schritt 18 sieht die Untersuchung des adaptronischen Systems und seiner Fehlermöglichkeiten vor. Instandhaltungsmaßnahmen sind für die installierten, aktiven Tragwerksteile abhängig von der gewünschten Nutzungsdauer durch Austauschbarkeit und Wartbarkeit vorzusehen. Für diesen Fall ist eine parallele bzw. nicht in tragenden Teilen liegende Installation der Aktoren vorteilhafter. Die Ausfallanalyse erfolgt analog zu dem in Abschnitt 2.5.3 vorgestellten Zuverlässigkeitsprozess. Nach Strukturierung des Systems und seiner Bauteile werden darauf aufbauend die Funktionen in einem Funktionsbaum abgeleitet, siehe Bild 4.6.

Die Hauptfunktion der Tragfähigkeit beinhaltet die Sicherstellung der Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit. Die Funktionserfüllung wird im Wesentlichen von der Tragstruktur übernommen, wobei die Schwingungsdämpfung zur Ermüdungsfestigkeit beitragen kann. Insbesondere extreme Lasten, für die in der Regel eine Adaption erfolgt, tragen durch große Spannungsamplituden einen hohen Anteil zur Ermüdung bei. Daneben ist die Funktion der Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen. Hierfür sind Kopfpunktauslenkung und -beschleunigung zu begrenzen. Die Funktionserfüllung erfolgt bei adaptiven Tragwerken mitunter durch das adaptronische System, weshalb sich Teilfunktionen anhand des Regelkreises ergeben. Sofern das adaptronische System für eine Begrenzung der Maximal- bzw. Minimalspannungen eingesetzt wird, übernimmt dieses ebenfalls Funktionen der Tragfähigkeit, in Bild 4.6 angedeutet mit Hilfe des gestrichelten Pfeils.

Durch Negieren werden ausgehend von den Funktionen die Fehlfunktionen bestimmt und z. B. in einer FMEA näher untersucht. Die Analyse kann bis auf Bauteilebene erfolgen um Fehlerursachen frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Die FMEA erfolgt anwendungsspezifisch, weshalb an dieser Stelle beispielhaft auf Sobek et al. [139, 140] verwiesen wird.

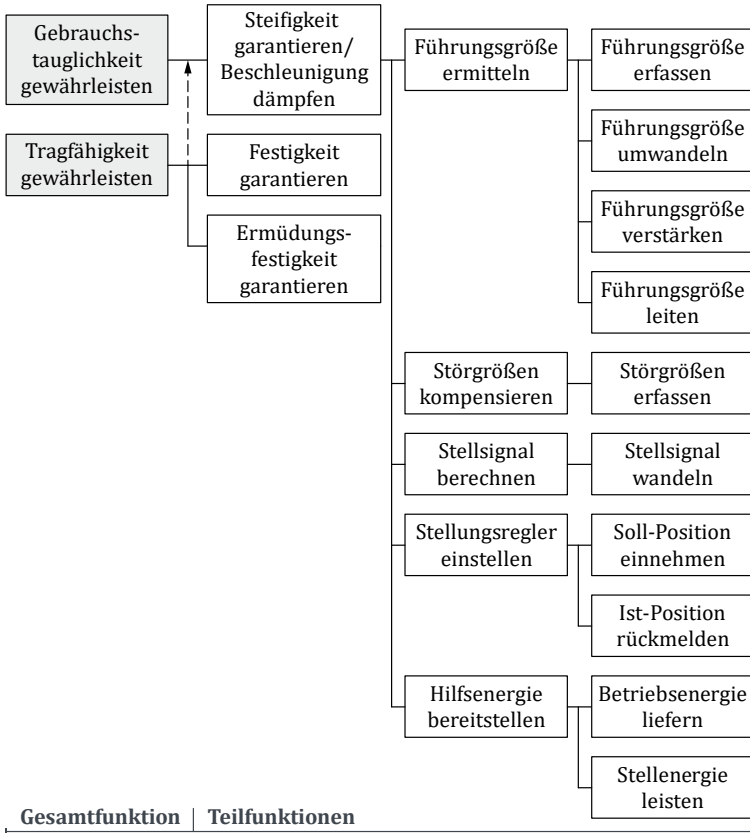


Bild 4.6: Funktionsbaum eines adaptiven Tragwerks

Neben der Ermittlung und Beseitigung von Fehlerursachen ist die Untersuchung der Auswirkung von Fehlern auf die Adaptionfähigkeit des Tragwerks von Interesse. In der Regel besteht keine Kenntnis über die Ausfallkombinationen, die zur Funktionsunfähigkeit der Gesamtfunktion führen. Durch Implementieren von Fehlerfällen in das Simulationsmodell besteht die Möglichkeit deren Auswirkung zu untersuchen.

Fehlermodellierung

Gegenstand des in Bild 4.5 aufgezeigten Ablaufs ist in Schritt 19 das Einbringen von Fehlerfällen in das Simulationsmodell, das eine anschließende Untersuchung der Fehler in Schritt 20 erlaubt. Innerhalb des Simulationsmodells können beliebige Parameter ausgewertet und als Eingangsgrößen des Reglers genutzt werden. In Realität liegen die Eingangsgrößen zur Regelung in Form von Messungen, z. B. durch Dehnmessstreifen, vor. Diese Messungen können unpräzise oder fehlerbehaftet sein. Adaptive Tragwerke weisen gegenüber passiven Tragwerken Fehlerquellen, die sich von den erwähnten Sensorfehlern über Aktor-, Regelungs- und Softwarefehler erstrecken, auf. Die mathematische Modellierung von Fehlern beschreibt Gienger et al. in [87, 88]. In der Regelungstechnik wird diese zum Erstellen von Residuen genutzt. Die Residuen beschreiben die mögliche Abweichung des Ergebnisses durch Anwendung von Näherungslösungen, z. B. aufgrund der Nutzung von Messwerten. Mit diesen Untersuchungen ist eine verbesserte Fehlerdiagnose und Unterscheidung von Fehlerfällen möglich. Die Modellierung spezifischer Fehler zum Nachweis der Zuverlässigkeit ist nachfolgend zusammengefasst.

Die Platzierung der aktiven Elemente wurde bereits in Schritt 7 vorgenommen. Für die Verteilung von Sensoren innerhalb der Tragstruktur ist ebenfalls eine Platzierung vorzugeben. Eine Auswahl geeigneter Sensoren adaptiver Tragwerke umfasst z. B. DMS, IMU und ein optisches Messsystem. Wie bei Gienger et al. [87, 88] beschrieben, werden die Messstellen mittels der binären Platzierungsmatrix $Z_{DMS/IMU/opt}$ auf die Elemente des Tragwerks verteilt. Die DMS liefern als Messgröße die Dehnung ε des Tragstrukturelements. Die Beschleunigung $\ddot{q} = a_{x/y/z}$ in x, y, z -Richtung an den gewählten Knotenpunkten wird von den IMUs erfasst. Das optische Messsystem misst die Knotenverschiebung q_x in x -Richtung.

Mögliche Fehlerfälle von Sensoren und Aktoren ergeben sich aus einer FMEA und äußern sich zumeist in einem z. B. von Boskovic in [154, 155] gezeigten Fehlzustand. Für Sensoren sind dies Bias, Drift, Ungenauigkeit, Einfrieren (engl.: Freeze) und Kalibrierungsfehler. Im Fall eines Bias besteht eine konstante Abweichung des Messwerts, während der Drift erst im Lauf der Zeit zu einer ansteigenden Messabweichung führt. Bei Ungenauigkeiten wird der Messwert schlecht abgebildet. Ein Einfrieren bewirkt die konstante Ausgabe eines Messwerts ungleich null, unabhängig von der Messgröße. Kalibrierungsfehler führen zu einer ungleich schlechten Abbildung der Messgröße durch das Messsignal im Messbereich. Typische Fehler von Aktoren umfassen Bias, Blockieren, Einnehmen der Endlage, kraftfreies bzw. neutrales Verhalten und Wirkungsgradverlust.

Wie bei Gienger [87, 88] gezeigt, sind diese Fehler in der Gleichung (4.5) für den Systemausgang der Zustandsraumdarstellung unter Berücksichtigung des additiven Fehlerterms $b_f(x, u)$, beschrieben durch Parameteränderungen Δc^T und Δd^T , nach Gleichung (4.24) darstellbar.

$$y_{fault} = (c^T + \Delta c^T)x + (d^T + \Delta d^T)u = c^T x + d^T u + \underbrace{\Delta c^T x + \Delta d^T u}_{b_f(x, u)} \quad (4.24)$$

Damit lassen sich die Sensorfehler für die Messverfahren wie DMS, optisches Messsystem und IMU modellieren. Der Ausgabevektor $y_{fault} = [y_{fault,1}, \dots, y_{fault,n}]^T$ enthält dabei die n Messstellen.

Ausfallwahrscheinlichkeit und Ersatzteilbedarf

In Schritt 20 ist die Auswertung möglicher Fehlerfälle innerhalb der Simulation vorgesehen. Hierfür ist aus dem repräsentativen Lastkollektiv der Last-Zeit-Verlauf auszuwählen ab dem eine Adaption notwendig ist, da vorgesehene Randbedingungen nicht mehr eingehalten werden. Die Kombination aller Fehlerfälle ergibt eine Vielzahl möglicher Fehlerkombinationen. Der Simulationsaufwand muss daher durch geeignete Maßnahmen verringert werden. Dies kann durch Priorisierung der Fehler und Vereinfachung aufgrund gleicher Fehlerauswirkung oder sofern möglich einer geringeren Simulationszeit geschehen. Kalibrierungsfehler können z. B. über Ungenauigkeiten abgebildet oder aufgrund von Funktionstests bei Inbetriebnahme gänzlich ausgeschlossen werden. Die Analyse der Fehlerfälle ist mittels eines Fehlerbaums, wie in Bild 4.7 dargestellt, durchführbar. Kritische Elemente können in einer qualitativen Analyse identifiziert werden, um weitere Maßnahmen zur Fehlervermeidung zu ergreifen, was grundsätzlich vorrangig anzustreben ist. Für eine quantitative Analyse sind Hauptfehlermechanismen und Ausfallraten der entsprechenden Komponenten zu ermitteln. Sowohl die konstanten Ausfallraten $\lambda_{A,fault}(t)$ der elektronischen Sensoren als auch die der Regelungshardware sind über Versuche, Expertenwissen, Felddaten oder geeignete Literatur zu bestimmen. Für die Aktoren wird ein verschleißabhängiges Ausfallverhalten angenommen. Hierfür werden die Parameter der Ausfallverteilung benötigt, um eine zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ zu modellieren. Wie vom Autor in [138] beschrieben ist davon auszugehen, dass die nach Eurocode geforderte, hohe Zuverlässigkeit nicht ohne Reparatur über die für den Maschinenbau extrem langen Nutzungsdauern realisierbar ist. Aus der zeitabhängigen Modellierung sind die Wartungsintervalle bestimmbar.

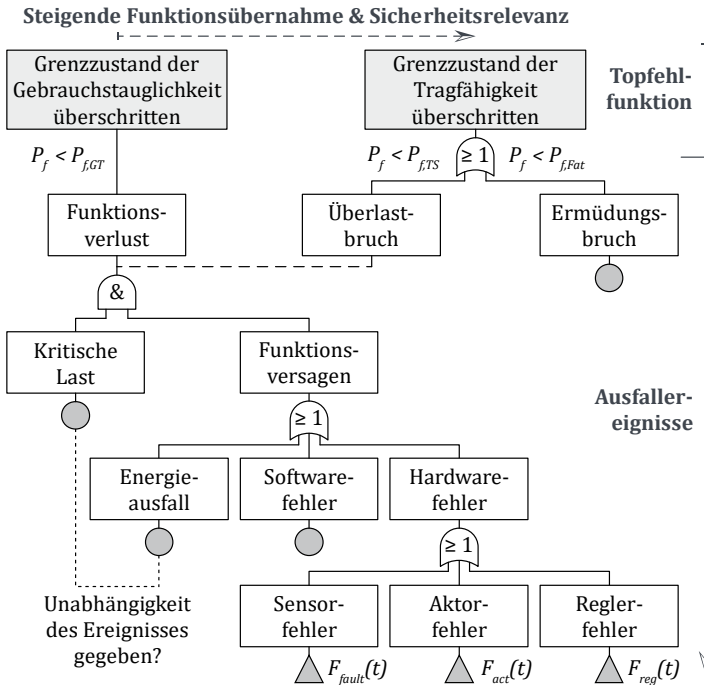


Bild 4.7: Modellierung der Systemausfallwahrscheinlichkeit eines adaptiven Tragwerks mit Hilfe eines Fehlerbaums

Für ein Funktionsversagen sind die im vorhergehenden Schritt simulierten Hardwarefehler im Fehlerbaum mit den ermittelten Ausfallraten zu berücksichtigen. Fehler des Reglers können abhängig von einer zentralen oder dezentralen Regelstruktur durch Totalausfall bzw. lokalen Ausfall einzelner Stockwerke modelliert werden. Softwarefehler äußern sich ähnlich, wobei deren Auftreten schwierig zu bewerten ist. Darüber hinaus ist die Bereitstellung von Hilfsenergie für das aktive System zur Adaption an Lasten essentiell. Gebunden an die Funktionsübernahme steigt die Sicherheitsrelevanz der Adaptionfunktion. Wie zuvor differenziert, stellt die Auslegung der Adaptionfunktion zur permanenten Kompensation von Lasten ein Sicherheitsrisiko dar. Zur Kompensation dynamischer Extremlasten eingesetzt, bewirkt ein Funktionsausfall ausschließlich in Kombination mit dem kritischen Lastereignis einen Verlust der Gebrauchstauglichkeit oder der Tragfähigkeit. Wie aus dem Report der Münchner Rück [156] hervorgeht sind Sturmschäden, die zu Schäden des Freileitungsnetzes führen mit zunehmender Windgeschwindigkeit wahrscheinlicher.

Insbesondere Strommasten sind hierfür anfällig und führen zu einer Unterbrechung der Energieversorgung, weshalb die statistische Unabhängigkeit dieser Ereignisse hinterfragt oder durch andere Maßnahmen wie einer ausfallüberbrückenden Notversorgung Ausfallsicherheit hergestellt werden muss.

Sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t)$ der Ausfallereignisse bekannt, ist über die Gatter des Fehlerbaums die Berechnung der Systemausfallwahrscheinlichkeit der Topfhefunktion möglich. Um eine Alterung und Erneuerung von Systemkomponenten durch Reparatur zu berücksichtigen und den Ersatzteilbedarf für eine Bilanz der Umweltwirkung zu bestimmen, eignen sich die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze als zustandsbasierte Modellierungsmethode. Eine Erneuerung sieht entweder die Reparatur oder den vorzeitigen, durch Ausfallprädiktion ermittelten Austausch der Komponente durch ein Neuteil vor, wodurch die Zuverlässigkeit nach Tausch wieder 100 % beträgt. Eine exemplarischer Modellierung adaptiver Tragwerke als Petrinetz mit Berücksichtigung von Erneuerung ist in Bild 4.8 dargestellt.

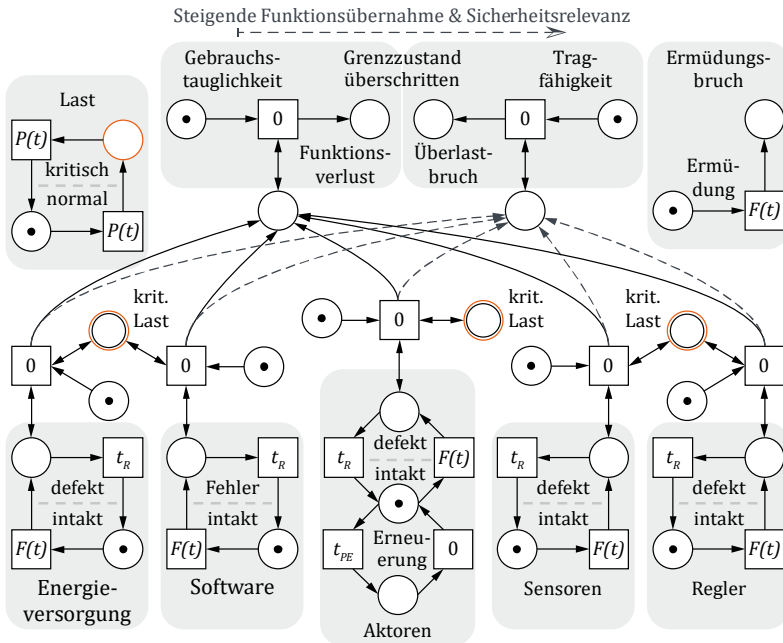


Bild 4.8: Zuverlässigkeitsmodellierung eines adaptiven Tragwerks als Petrinetz

Für die in der Regel durch eine konstante Ausfallrate modellierten elektronischen Komponenten ist die Berücksichtigung einer Erneuerung für das Ausfallverhalten irrelevant, da keine Alterungserscheinung angenommen wird. Das heißt die Ausfallrate ist nicht zeitabhängig und daher ergibt sich keine Verbesserung durch Tausch der Komponente. Für die durch Alterungs- und Verschleißerscheinungen geprägten Aktoren ist nach Erneuerung eine geringere Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls durch die Zeitabhängigkeit der Ausfallrate gegeben. Die Ausfallwahrscheinlichkeit verschleiß-behafteter Komponenten lässt sich daher durch periodische Wartungsintervalle t_{PE} verringern. Für die Erneuerung ist die Art des Schaltvorgangs der Transition zu beachten. Wird die Komponente durch ein Neuteil ersetzt, ist die Zuverlässigkeit nach Tausch wieder bei 100 %. Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ muss demnach zurückgesetzt werden, sobald die Transition der Erneuerung nach der Zeit t_{PE} schaltet. Für die Erneuerung ist eine Wartungsdauer zu hinterlegen, welche die Verfügbarkeit der Adaptionfunktion verringert, sofern hierfür ein Abschalten notwendig ist.

Über das Petrinetz lassen sich diese Zeitabhängigkeiten erfassen und mittels Reparaturzeiten t_R die Funktionsverfügbarkeit berechnen. In Verbindung mit der Auftretenswahrscheinlichkeit der kritischen Last ist die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung der Grenzzustände durch Auswertung der Stellen gegeben. Die Übersichtlichkeit des Petrinetzes wird durch die Verwendung von Referenzsymbolen verbessert. Diese verweisen in diesem Fall auf die kritische Last, die im Zusammenhang mit der Nicht-Verfügbarkeit der Adaptionfunktion auftreten muss. Petrinetze bieten den Vorteil der grafischen Modellierung und Anschaulichkeit. Für umfänglichere Systeme kann dies einen Nachteil darstellen.

Die Monte-Carlo-Simulation ermöglicht die Analyse der Petrinetze und damit die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit. Für genaue Aussagen sind aufgrund der approximativen Methode mehrere Replikationen notwendig. Der Ersatzteilbedarf e_{SP} ergibt sich aus der Häufigkeit eines Defekts der Komponenten im Mittel aller Simulationsdurchläufe oder konservativ als maximal auftretender Bedarf. Aufgrund der geringen Ausfall- und Auftretenswahrscheinlichkeiten ist für die Monte-Carlo-Simulation eine ausreichende Anzahl Replikationen vorzusehen. Damit kann die geringe Ausfallwahrscheinlichkeit simulativ ermittelt werden.

4.4.2 Sicherheitsnachweis

Gegenstand der folgenden Schritte ist die Sicherheitsanalyse, für die in der vorliegenden Arbeit das Vorgehen nach EN 61508 [121] zum Erreichen der erforderlichen funktionalen Sicherheit der Adaptionsfunktion vorgesehen ist. Für die Sicherheit der Tragstruktur wird auf bereits bestehende Vorgehensweisen verwiesen [8, 157].

In Schritt 22 ist zunächst eine Risikoanalyse durchzuführen. In der Risikoanalyse werden Gefährdungen durch Vorfälle oder ausgehend von Situationen ermittelt. Die Analyse erfordert eine Definition der Systemgrenze. Für adaptive Tragwerke müssen die Tragstruktur, adaptives System und Anlagen zur Hilfsenergieversorgung einbezogen werden. Die Netzstromversorgung tritt von außerhalb über die Systemgrenze ein. Gegenstand der Analyse müssen darüber hinaus alle notwendigen Betriebsarten sowie Fehlbedienung sein. Adaptive Tragwerke unterliegen nach Eurocode 0 [8] dem Betrieb während der Nutzungsphase, während des Bauzustands oder einer Instandsetzung sowie Brand, Explosion oder Anprall. Durch die Möglichkeit des Eingriffs in den Adaptionsvorgang, z. B. zur Wartung, besteht eine Gefährdung aufgrund menschlicher Fehlbedienung. Eine Analyse muss daher für jede Betriebsart durchgeführt werden. Die Nutzungsphase erstreckt sich über den größten Teil des Sicherheitslebenszyklus. Die Ausführungen der vorliegenden Arbeit beziehen sich daher exemplarisch auf die Nutzungsphase.

Risikograph

Für die Gefährdungs- und Risikoanalyse schlägt die EN 61508 verschiedene Methoden vor. Eine anschauliche und im Maschinenbau etablierte Methode ist der Risikograph. Hierüber wird durch Einschätzen des Risikos anhand von Parametern eine Einstufung in ein Sicherheitsintegritätslevel (SIL) vorgenommen. Zu beachten ist, dass die Risikograph-Methode keine gemeinsamen Ursachen berücksichtigt, die einerseits die Funktion anfordern, andererseits zum Ausfall des E/E/PE-Systems führen [158]. Eine gemeinsame Ausfallursache sollte aus Sicherheitsgründen vermieden werden. Mittels der Ergebnisse der FMEA einer Zuverlässigkeitsanalyse kann die Risikoanalyse gestützt werden. Für alle identifizierten gefährlichen Vorfälle ist eine Risikobewertung erforderlich. Nach der Definition in dieser Arbeit lassen sich für adaptive Hochhaus-Tragwerke die folgenden Funktionen in der Nutzungsphase unterscheiden und eine Bewertung der Parameter des Risikographs wie in Tabelle 4.1 vornehmen. Eine Manipulation des Tragstrukturverhaltens erfolgt, um im Fall einer kritischen Auslenkung/Anregung

1. die tragende Struktur zu Gebrauchstauglichkeitszwecken zu dämpfen und
2. die Tragfähigkeit der Struktur nicht zu überschreiten.

Nach der Risikograph-Methode geht das Risiko aus der Häufigkeit des gefährlichen Vorfalles ohne sicherheitsbezogenes System und dessen Auswirkung hervor [158]. Die Bewertung erfolgt anhand der definierten Risikoparameter und ist in Tabelle 4.1 in die Funktionsanforderungen für Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit unterschieden.

Tabelle 4.1: Risikobewertung der Funktionen des adaptiven Tragwerks nach [158]

Risiko- parameter	Adaptions- funktion		Klassifizierung	Bewertung
Auswirkung	Gebrauchstauglichkeit	C_1	Geringe Verletzung	Verletzungen aufgrund übermäßiger Beschleunigung oder Auslenkung
	Tragfähigkeit	C_3	Tod mehrerer Personen	Bei Versagen der Tragstruktur ist ein Personenschaden wahrscheinlich
Häufigkeit und Aufenthaltsdauer im gefährlichen Bereich	Gebrauchstauglichkeit	F_2	Häufiger bis dauernder Aufenthalt im gefährlichen Bereich	Als Büro- oder Wohngebäude ist mit dauerndem Aufenthalt von Personen zu rechnen
	Tragfähigkeit			
Möglichkeit der Vermeidung des gefährlichen Vorfalles	Gebrauchstauglichkeit	P_1	Beinahe unmöglich	Funktionsversagen ggf. erst nach Anforderung bei Adaption erkennbar
	Tragfähigkeit			
Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses	Gebrauchstauglichkeit	W_2	Geringe Wahrscheinlichkeit	Geringe Häufigkeit von Lasten die eine Adaption erfordern
	Tragfähigkeit	W_1	Sehr geringe Wahrscheinlichkeit	Sehr geringe Häufigkeit von Lasten die eine Adaption erfordern

Diese lassen sich insbesondere durch die Auswirkung eines Ausfalls und den daraus resultierenden Personenschäden charakterisieren. Letztere sind bei der Adaption zu Tragfähigkeitszwecken mit C_3 oder C_4 zu bewerten. Die Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses kann abhängig von der Auslegung mit gering bis sehr

gering bewertet werden. Beispielhaft ist für die Gebrauchstauglichkeit eine geringe und für Zwecke der Tragfähigkeit eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit angenommen. In der Bewertung der Sicherheitsklasse, nach dem in Bild 4.9 für die praxisrelevanten Kombinationen dargestellten Risikograph, ergibt sich hierfür kein Unterschied in der Sicherheitsanforderung. Je schwerwiegender die Auswirkung (C) zu bewerten ist, desto weniger relevant sind die Möglichkeit einer Vermeidung des Vorfalls (P) sowie die Häufigkeit und Aufenthaltsdauer (F). Mit steigendem Grad der Auswirkung (C) sind diese Parameter im Risikograph daher irrelevant bei der Ermittlung des Sicherheitsziels. Wie zu erwarten werden an die Adaption zu Zwecken der Gebrauchstauglichkeit keine Sicherheitsanforderung gestellt. Eine Absicherung von Fehlbedienung oder von Vorfällen aufgrund von Fehlern im Adaptionsvorgang, als mögliche gefährliche Ereignisse, sind zu überprüfen. Sofern hierbei schwerere Personenschäden möglich sind, erfordert dies eine Entwicklung mit Sicherheitsziel. Die Adaption der Tragfähigkeit stellt eine Sicherheitsfunktion dar, die unter den Annahmen aus Tabelle 4.1 nach Sicherheits-Integritätslevel 3 entwickelt werden muss. Eine Auslegung für selten auftretende Extremlasten hat zur Folge, dass selbst für eine fatale Auswirkung C_4 das Sicherheitsziel SIL 3 anzunehmen ist. Umwelt- und Materialschäden sind nicht erfasst und erfordern eine andere Klassifizierung bei Berücksichtigung.

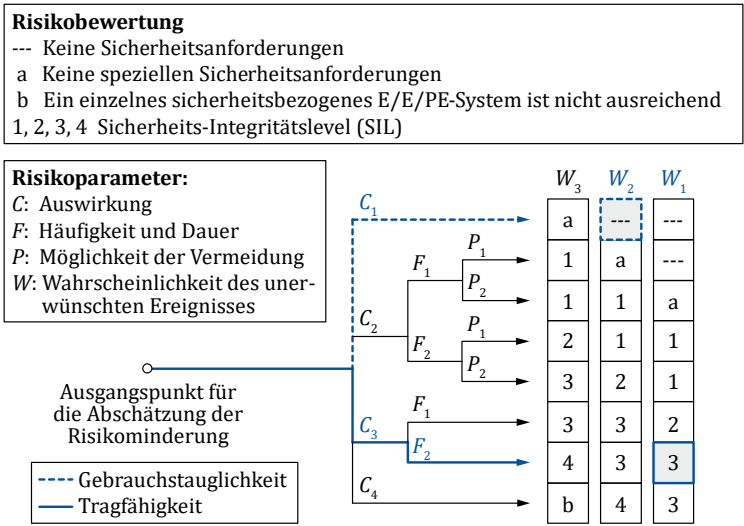


Bild 4.9: Risikograph mit Ermittlung des Sicherheitsziels je Funktion des adaptiven Tragwerks [124, 158]

Für die Auslegung der Adaptionfunktion zu Tragfähigkeitszwecken unter Extrem-lasten wird eine niedrige Anforderungsrate der Adaptionfunktion angenommen, was nach EN 61508-4 [119] einer Häufigkeit von maximal einmal pro Jahr entspricht. Hieraus ergibt sich der Grenzwert für eine mittlere Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei Anforderung PF_D nach SIL 3 zu $\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$. Im Folgenden ist eine Sicherheitsarchitektur zu entwickeln, die diese Anforderungen erfüllt.

Sicherheitsarchitektur

Nach EN 61508-2 [125] bestehen zwei Vorgehensweisen zur Entwicklung der Hardware-Systemarchitektur. Eine Verfahrensweise erfordert Zuverlässigkeitsdaten für zufällige Hardwareausfälle, die auf Felddaten aus ähnlicher Anwendung und Umgebung basieren. Für adaptive Tragwerke ist diese Kenntnis aufgrund des Neuheitsgrades derzeit nicht vorhanden, weshalb dieses Verfahren nicht anwendbar ist. Andernfalls sind Teilsysteme zu bestimmen, um den maximalen Sicherheits-Integritätslevel zu ermitteln den die Sicherheitsfunktion in Anspruch nehmen kann. In Bild 4.10 ist hierfür eine beispielhafte Hardwarearchitektur als Blockdiagramm, wie sie für adaptive Tragwerke mit SIL 3 Anforderung Verwendung finden kann, abgebildet.

Die redundante Ausführung von Teilsystemen ermöglicht eine Entwicklung mit geringeren Sicherheitsanforderungen. Bei einer seriellen Verkettung ist das Element mit dem niedrigsten SIL bestimmend. Eine Kombination aus SIL 2 mit SIL 1 ergibt für das Teilsystem einen SIL 3. Das Teilsystem der Stellglieder erfüllt in diesem Fall einen höheren SIL 4, da dieselbe Realisierung mit SIL 2 angenommen wurde. Dabei ist zu beachten, dass keine Entwurfsfehler vorliegen und Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache ausreichend vermieden bzw. berücksichtigt werden. Hierfür sieht die Norm den β_A -Faktor in der Berechnung der mittleren Ausfallwahrscheinlichkeit vor.

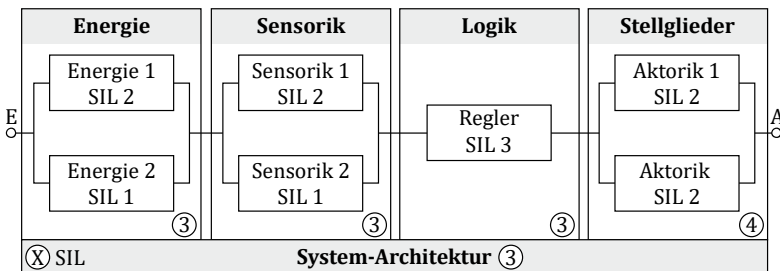


Bild 4.10: Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer beispielhaften Hardware-Architektur eines adaptiven Tragwerks, die eine Anforderung nach SIL 3 erfüllt

Eine Klassifizierung der Elemente in Typ A und Typ B gestattet die Ermittlung des maximal möglichen SIL, abhängig von der Hardwarefehlertoleranz und dem erzielbaren Anteil sicherer Ausfälle. Sind, wie im Fall adaptiver Tragwerke angenommen, nur unzureichend Ausfalldaten vorhanden, ist Typ B anzunehmen. Ist die Hardwarefehlertoleranz ausgeschöpft, führt der nächste auftretende Fehler zu einem Verlust der Adaptionfunktion. Für das angestrebte SIL 3 der Adaptionfunktion muss bei Fehlertoleranz eins der Anteil sicherer Ausfälle (engl.: Safe Failure Fraction, SFF) nach Tabelle 2.1 zwischen 90 % ... < 99 % liegen, um die Anforderung zu erreichen.

Die geringe Anforderungsrate der Adaptionfunktion bei adaptiven Tragwerken bedingt, dass ein Fehler gegebenenfalls erst bei Anforderung entdeckt wird. Dies muss zwingend vermieden werden. Maßnahmen zum Erreichen einer ausreichenden Diagnosefunktion, die wesentlich zum Erreichen des SIL beitragen, sind in Anhang A von EN 61508-2 [125] benannt und an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Theoretische Ansätze für Möglichkeiten zur Diagnose und Fehlerunterscheidung wurden von Gienger et al. in [87, 88] untersucht, auf die an dieser Stelle verwiesen wird.

Softwaresicherheit

Teil 3 der EN 61508 [159] spezifiziert die Anforderungen an Software, um durch systematische Entwicklung Fehler und Versagensfälle zu vermeiden bzw. zu beherrschen. Für die Software wird ebenfalls eine Aufteilung der Entwicklung nach sogenannten Konformitätspfaden vorgenommen. Nach Pfad 2 erfolgt der Nachweis über die Betriebsbewährtheit. Diese weist auf Grundlage der Erfahrung eine ausreichend geringe Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden systematischen Fehlers eines Elements nach. Für adaptive Tragwerke ist dieser Pfad ungeeignet, da bisher nicht auf Erfahrung aus dem Betrieb zurückgegriffen werden kann. Pfad 3 sieht die Beurteilung einer nicht-konformen Entwicklung vor, die für den Betrieb adaptiver Tragwerke ebenfalls nicht vorliegt. Daher ist ein Vorgehen nach Pfad 1 zur normkonformen Entwicklung der Software erforderlich.

Für SIL 3 sind eine Vielzahl von Anforderungen und Maßnahmen an die Softwaresicherheit und -architektur spezifiziert, für die an dieser Stelle auf Anhang A der EN 61508-3 [159] verwiesen wird. Hervorgehoben sei die Anforderung der Fehlererkennung und die abgestufte Funktionseinschränkung, die für SIL 3 unter anderem besonders empfohlen werden. Damit lässt sich die Adaptionfähigkeit im Softwarefehlerfall eingeschränkt erhalten. Vorgaben zu Programmiersprache, Aufbau und Test sind obligatorisch. Für eine Modellierung der Software werden unter anderem die in der Zuverlässigkeitsanalyse verwendeten Petrinetze empfohlen.

An dieser Stelle sei hierzu abschließend bemerkt, dass bei äußerst sicherheitskritischen Anwendungen, wie z. B. bei autonomen Fahrzeugen, aufgrund des wahrscheinlicheren Eintritts des unerwünschten Ereignisses eine Entwicklung nach SIL 4 erforderlich ist. Der Entwicklungsaufwand ist demgemäß bedeutend größer. Hinzu kommt die mobile Anwendung ohne externe Energieversorgung bei komplexen Fahrzeugarchitekturen [160]. Für adaptive Tragwerke scheint daher die Realisierung einer sicherheitsgerechten Adaption unter den aufgezeigten Anforderungen keine Frage nach dem Ob, sondern vielmehr nach dem Wann und dem Aufwand zu sein.

4.4.3 Life-Cycle Assessment zur Nachhaltigkeitsbewertung

In Schritt 24 folgt schließlich die Bewertung der Umweltwirkung in Form des Treibhauspotentials adaptiver Tragwerke als Vergleichskriterium einer aktiven gegenüber einer passiven Variante. Anhand der Masse kann der Materialverbrauch ermittelt werden. Durch notwendige Bearbeitungsschritte zur Herstellung fallen überdies Aufwendungen in Form von Energie an. Die Umweltbilanz als Lebenszyklusanalyse kann mit Hilfe von Datenbanken wie z. B. der ÖKOBAUDAT [15] oder mittels der LCA-Software GaBi [16] bewertet werden. Materialspezifische Angaben für die wichtigsten Komponenten adaptiver Tragwerke, wie in Tabelle 4.2 aufgeführt, werden bilanziert und aufsummiert. Die Umrechnung erfolgt auf das Treibhauspotential (engl.: Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalent. Nicht für alle Komponenten ist die Datengrundlage ausreichend, weshalb Schätzwerte ermittelt wurden.

Tabelle 4.2: Angaben zum GWP der Aufwendungen für adaptive Tragwerke [16]

Angaben in kg CO ₂ -Äq.	Material & Herstellung	Verbrennung	Recycling-potential
Baustahl (Profile und Grobbleche) je t [16]	1.916	---	-1.056
Aktoren/St. (≈ 125 kg) [16]	280	---	-199
Hydrauliköl/100 l [16]	92	223	-67
Hydraulikaggregat/St.	1.960*	---	-1.176*
Li-NMC Batterie je kWh [161]	73	---	-20*
Deutscher Strommix je kWh (approx. f. 2019) [162]	0,401	---	---
*Schätzwert			

In Schritt 25 wird mit den Angaben zum GWP aus den einzelnen Positionen die Bilanz der Umweltwirkung mit Bezug auf ein Jahr berechnet. Ist durch den Einsatz adaptiver Tragwerke, unter der Bedingung, dass sich die Lebensdauer T_L erhöht, eine verlängerte Nutzungsdauer T_N erzielbar, verringert sich das GWP durch den Bezug auf die Nutzungsdauer. Neben dem Baustahlanteil G_{BS}^{WP} ist der Anteil für die Aktoren G_{akt}^{WP} und des Hydraulik-Öls $G_{öl}^{WP}$ zu berücksichtigen. Der Ersatzteilbedarf e_{SP} bestimmt sich anhand der Nutzungsdauer und ergibt den Anteil G_{SP}^{WP} . Der anfallende Energiebedarf zur Aktuierung G_{kWh}^{WP} sowie notwendige Aggregate der Adaption G_{Aggr}^{WP} vervollständigen die Bilanz. Als Summe des jährlichen Beitrags zum Treibhauseffekt für das Tragwerk und für die Aktivierung ergibt sich G_{tot}^{WP} nach Gleichung (4.25).

$$G_{tot}^{WP} = \underbrace{\frac{\Sigma G_{BS}^{WP}}{T_N(T_L)}}_{\substack{\text{passives} \\ \text{Tragwerk}}} + \underbrace{\frac{n_{akt} \cdot (G_{akt}^{WP} + G_{öl}^{WP}) + G_{SP}^{WP} + \Sigma W_{akt} \cdot G_{kWh}^{WP} + G_{Aggr}^{WP}}{T_N(T_L)}}_{\text{Aktivierung}} \quad (4.25)$$

Für den letzten Schritt 26 ist ein Vergleich mit der passiven Ausführung des Tragwerks vorgesehen. Der Anteil der Aktivierung in Gleichung (4.25) entfällt für das passive Tragwerk, allerdings ist ein höherer Materialeinsatz erforderlich.

Das iterative Vorgehen ergibt sich aus der Notwendigkeit die Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit zu erfüllen. Zudem ist erst mit der abschließenden Umweltbewertung die Rentabilität verschiedener aktiver Varianten sowie ein Vergleich mit einer passiven Variante möglich. Auf diese Weise wird der Anspruch an die Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke umfassend bewertbar und vergleichbar. Die Vielzahl an Einflussfaktoren, die sowohl untereinander abhängig sind als auch die Umweltwirkung selbst beeinflussen, sind nicht getrennt voneinander zu optimieren und analysieren und erfordern den vorgestellten ganzheitlichen Ansatz.

4.5 Fail-Safe und weitere Prinzipien

Vom mechanischen Verständnis herrührend ist im Bauwesen, wie z. B. bei Teuffel [71], vom Fail-Safe-Prinzip zur Gewährleistung der Sicherheit adaptiver Tragwerke zu lesen. Teuffel interpretiert dies in seiner Auslegung als zusätzliches Optimierungskriterium mit Sicherheitsfaktor, wonach die daraus resultierende Überdimensionierung der Tragstruktur einen Einfluss von Fehlfunktionen oder Ausfällen der Adaption auf die Tragfähigkeit verhindert. Ähnlich formuliert dies Korkmaz in [26], der in seinen Ausführungen die Sicherheit adaptiver Tragwerke als

Kriterium der Bemessung der Tragstruktur sieht. Innerhalb dieses Kapitels soll eine offensichtlich notwendige Differenzierung der Begrifflichkeiten sowie der Prinzipien und Maßnahmen erfolgen, um Möglichkeiten, Anwendung und Sinnhaftigkeit bei adaptiven Tragwerken zu diskutieren. Hierfür sind stochastische von deterministischen Gefahren zu unterscheiden. Letztere bestehen aufgrund der Systemfunktion während der gesamten Lebensdauer und sind durch systematisches Eliminieren von Fehlern vermeidbar. Stochastische Gefahren treten zufällig oder nach Alterung und Verschleiß von Bauteilen auf. Diese Fehler gilt es zu beherrschen, wofür drei wesentliche Prinzipien unterschieden werden [123].

Neudörfer [123] beschreibt das konstruktive Prinzip des sicheren Bestehens, des beschränkten Versagens und der Redundanz. Für die Mechatronik definiert Isermann [83] drei ähnliche Prinzipien mechatronischer Systeme, wie in Tabelle 4.3 vergleichend aufgeführt. Das im Bauwesen als Fail-Safe angewendete Prinzip bezeichnet er als fehlersichere Auslegung. Daneben bestehen die Prinzipien Fail-Operational und Fail-Silent, die ein fehleroperatives bzw. letzteres ein fehlerpassives Verhalten bezeichnen.

Tabelle 4.3: Prinzipien des Verhaltens bei Fehlern, mechanisch wie mechatronisch nach [83] und [123] mit Umsetzung

Konstruktive Prinzipien mit Definition	Fail-Safe: beschränktes Versagen	Safe Life: sicheres Bestehen	Redundanz
	Nach einem Versagen von Teilen oder Baugruppen geht das System in einen als sicher geltenden Zustand.	Das Bauteil übersteht während der Nutzungszeit alle Vorkommnisse ohne ein Versagen oder eine Störung.	Nach Fehler oder Ausfall übernimmt eine weitere Einheit, da mehr Einheiten vorhanden sind als eigentlich notwendig.
	Systematisch	Überdimensioniert	Redundant
Mechatronische Prinzipien mit Definition	Fail-Safe: fehlersicher	Fail-Operational: fehleroperativ	Fail-Silent: fehlerpassiv
	Nach einem Fehler besitzt die Komponente direkt (passiv) oder durch eine veranlasste Aktion (aktiv) einen sicheren Zustand.	Nach einem Fehler bleibt die Komponente betriebsfähig was erforderlich ist, wenn kein sicherer Zustand besteht.	Nach einem Fehler verhält sich die Komponente passiv und beeinflusst keine andere Komponente durch Fehlfunktion.
	Systematisch	Fehlertolerant	Stillgelegt

Die Prinzipien können auf Bauteil- oder Systemebene umgesetzt werden, lassen sich jedoch nicht immer anwenden. Wie im Stand der Technik erläutert, ist im Bauwesen in Ermangelung eines Fehlzustands mechanischer Tragwerksteile jeglicher Ausfall gleichbedeutend mit dem Versagen des Bauteils, weshalb Fail-Safe hier keine Anwendung findet. Auf System- oder Baugruppenenebene kann dieses Prinzip dagegen eingesetzt werden. Für Hochhaus-Tragwerke besteht ausschließlich der standsichere Zustand ausreichender Tragfähigkeit als sicherer Zustand. Teuffel [71] fasst die Absicherung nach Fail-Safe von adaptiven Tragwerken im Fall eines Ausfalls der Adaptionfunktion als Tragfähigkeitsreserve auf, mit der eine Gefährdung vermieden wird. Dies entspricht im Prinzip einem Einsatz der Adaptionfunktion zu Gebrauchstauglichkeitszwecken und ist nach der vorliegenden Definition nicht als Fail-Safe, sondern vielmehr als Safe-Life-Auslegung des Tragwerks zu interpretieren.

Durch den Anspruch an Nachhaltigkeit, der mit dem Einsatz adaptiver Tragwerke einhergeht, erübrigt sich die Verwendung dieser konstruktiven Prinzipien zur Absicherung auf Systemebene, aufgrund des damit einhergehenden drastischen Materialmehrverbrauchs für Redundanz oder Überdimensionierung. Auf Bauteilebene ist dies dagegen sinnvoll und gegebenenfalls notwendig, z. B. zur Absicherung des vollständigen Erschlaffens seriell installierter Aktoren. Durch eine strukturintegrierte Aktorik besteht eine Schwachstelle, die bei Ausfall oder Fehlfunktion Gefährdungspotential durch Verlust der Versteifungsfunktion aufweisen kann.

Die Prinzipien zur Absicherung mechatronischer Systeme sind in der EN 61508 enthalten und garantieren eine funktionale Absicherung, die in der Regel weniger Materialeinsatz erfordert, da sie mitunter durch Methoden und Prozesse erreicht wird. Aufgrund der nicht permanenten Funktionserfüllung der adaptiven Komponenten besteht die Möglichkeit auf einen Fehler zu reagieren. Entscheidend ist hierbei der erforderliche Zeithorizont innerhalb dessen eine Reaktion erfolgen muss und wie lange sich das System oder dessen Komponenten in einem gegebenenfalls eingeschränkten Fail-Safe- oder Fail-Silent-Zustand befinden dürfen. Der Fehlerdiagnose kommt hierbei eine wichtige Rolle zu. Wird der Fehler nicht erkannt kann keine Reaktion erfolgen, um schließlich den in der Regel mit einer Funktionseinschränkung verbundenen Fehlzustand z. B. durch Instandsetzen zu beheben.

Die Anwendung von Methoden und Prinzipien, wie sie für eine Absicherung adaptiver Tragwerke eingesetzt werden sollten, sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Eine Absicherung deterministischer Gefährdungen ist obligatorisch. Diese treten z. B. in Form von Gefahrstellen an der Aktorik sowie dem unter Druck stehenden Hydrauliksystem auf. Da in Bauwerken mit einer permanenten Anwesenheit von Menschen zu

rechnen ist, kommt der Absicherung dieser Gefahrstellen ebenfalls eine gesonderte Bedeutung zu. Die Prinzipien und Maßnahmen sind zum Großteil anwendungsspezifisch, wofür an dieser Stelle auf Neudörfer [123] verwiesen wird.

Tabelle 4.4: Empfehlung von Maßnahmen zur Absicherung adaptiver Tragwerke

Empfohlene Maßnahmen zur sicheren Funktion	Adaption zu Zwecken der	
	Gebrauchstauglichkeit	Tragfähigkeit
Systemebene	Keine nach Bild 4.9	EN 61508
Baugruppen-/ Bauteilebene	Konstruktive Prinzipien nach Tabelle 4.3	EN 61508 und konstruktive Prinzipien nach Tabelle 4.3

4.6 Zwischenfazit

Die interdisziplinäre Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke ermöglicht ein systematisches, schrittweises Vorgehen, um den Anforderungen an Zuverlässigkeit, Sicherheit und Umweltwirkung gerecht zu werden. Die Auslegung richtet sich nach der Bemessung anhand den Grenzzuständen des Eurocode und sieht spezifische örtliche Lastannahmen und Lastkollektive zum Nachweis der Ermüdungslebensdauer und zur Berechnung der operativen Energie vor. In der Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt die Untersuchung von Fehlern. Deren Auswirkung auf das Adaptionsverhalten der Tragstruktur kann simulativ bewertet werden. Die Erneuerung von Komponenten sowie der erforderliche Ersatzteilbedarf lassen sich daraus ableiten. Die Bewertung der Sicherheitsrelevanz und der Entwurf einer Sicherheitsarchitektur, die den Anforderungen an funktionale Sicherheit nach EN 61508 [101] genügt, ist innerhalb der Methode gegeben. Die Bewertung der Umweltwirkung erfolgt auf der Grundlage der ermittelten Auslegungsgrößen, ausgedrückt durch das Treibhauspotential als ausgewiesene Vergleichsgröße. Die vorgestellte Methode erfasst, verwendet und koordiniert Auslegungsmethoden aus Bauwesen sowie Regelungstechnik und Maschinenbau und erfüllt damit den Anspruch an Interdisziplinarität, den die Entwicklung adaptiver Tragwerke bedingt.

Die Ausführungen zu Prinzipien wie Fail-Safe ergänzen den Umfang der funktionalen Absicherung nach EN 61508 und sind gegebenenfalls geeignete Maßnahmen um das Gefährdungspotential zu verringern. Konstruktive Maßnahmen zur Absicherung adaptiver Tragwerke auf Systemebene sind dabei für mechanische Strukturen mit

Berücksichtigung der Umweltwirkung ungeeignet. Die Anwendung von Sicherheitsfaktoren auf die Tragstruktur für den Versagensfall der Aktorik kompensiert einen Teil der Ressourceneinsparung durch Überdimensionierung. Auf Bauteil- und Komponentenebene lassen sich diese Maßnahmen dagegen verwenden und sind auch bei Adaption zu Gebrauchstauglichkeitszwecken eine Möglichkeit, um bspw. die Steifigkeit eines aktiven Elements auch bei Ausfall des Aktors zu erhalten. Die Absicherung auf Systemebene muss durch methodische Absicherung der Prozesse bzw. im Fall der Tragfähigkeit durch die vorgestellten funktional sicheren Architekturen und Konzepte erfolgen.

Innerhalb der DIN EN 1990, dem Eurocode 0 [8] ist bei winderregten Schwingungen bzw. Erdbebeneinwirkungen ein dynamischer Nachweis des passiven Tragwerks mittels linear-elastischer Modelle erlaubt. Quasi-statische Ersatzlasten sind dabei für gewöhnliche Geometrien bzw. Steifigkeits- und Massenverteilungen zulässig. Auf adaptive Tragwerke trifft dies durch dynamische, lokale Versteifung mittels Aktoren nicht zu. Zur Ermittlung der Bauwerksreaktionen sowie zur Bewertung der Ermüdungslebensdauer und des Energiebedarfs adaptiver Tragwerke wurden daher Last-Zeit-Verläufe für die Abbildung dynamischer Lasten bzw. eine Häufigkeitsverteilung in der Auslegungsmethode vorgesehen. Die Modellierung der Windlasten wurde dazu konservativ mit dem vollen Geschwindigkeitsdruck, unabhängig von der Windrichtung, angenommen. Weiter wurde vereinfacht mit einem konstanten Druck über der Tragwerksbreite gerechnet. Die Vereinfachungen der dynamischen Einwirkungen auf die Tragstruktur adaptiver Tragwerke werden auch für die Analyse passiver Tragstrukturen nach Eurocode getroffen und sind damit angemessen.

Gegenstand der zweiten Forschungshypothese war die Bewertung des komplexen Zusammenhangs von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit innerhalb einer neuen Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke. Ein iteratives Vorgehen ermöglicht die schrittweise Optimierung der Tragstruktur in Abhängigkeit der Adaptionfunktion unter den vorhandenen Randbedingungen. Die Aufteilung in sequentielle Teilschritte systematisiert das Vorgehen. Zuverlässigkeitsanalyse und Sicherheitsnachweis erfolgen auf der Grundlage von Methoden des Maschinenbaus. Diese stehen im Zusammenhang mit der Auslegung der Adaptionfunktion und Bemessung der Tragstruktur. Eine Umweltbewertung ermöglicht die Bilanzierung und den Vergleich der Varianten. Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke werden damit in der Auslegungsmethode adaptiver Tragwerke erfasst und deren wechselseitige Beziehung berücksichtigt.

Auf der Grundlage der in Abschnitt 3.3.5 abgeleiteten Anforderungen ist mittels der vorgestellten Methode eine zielführende Auslegung möglich. Die umfassende Bewertung der Methode, welche die Anforderungen nochmals aufgreift, erfolgt in Abschnitt 5.6.

Gegenstand des folgenden Kapitels 5 ist die Validierung der Methode an einem Anwendungsbeispiel, um abschließend die dritte Forschungshypothese zu belegen. Darin wird untersucht, ob sich die Anforderungen gewährleisten lassen und eine optimale Auslegung innerhalb des Spannungsfelds Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit erzielt wird.

5 Anwendungsbeispiel eines adaptiven Tragwerks

Ausgehend von der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Topologie des Demonstrator-Hochhauses des SFB 1244 ist in diesem Kapitel die Anwendung der vorgestellten Auslegungsmethode für adaptive Tragwerke beschrieben. Das Anwendungsbeispiel validiert die Methode und demonstriert die Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke. Innerhalb dieses Spannungsfelds werden Auslegungspunkte ermittelt und verglichen. Anhand des methodischen Vorgehens aus Kapitel 4 ergibt sich die Gliederung der folgenden Abschnitte.

5.1 Modellierung des Hochhaus-Demonstrators

Die Tragwerkstopologie wird vom Architekten bzw. Bauingenieur entworfen, wofür im Folgenden auf den Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244, Bild 5.1 links, zurückgegriffen wird.



Bild 5.1: Hochhaus-Demonstrator (l) und Treppenturm (r) des SFB 1244 [89] unter Angabe der Eigengewichte und Nutzlasten nach [78, 93]

Eigengewicht:

Tragende Bauteile:
Abhängig von der Bemessung,
Berechnung anhand des FE-Modells

Nichttragende Bauteile:
Fassaden und Wandbekleidungen mit
 $2,0 \text{ kN/m}^2$

Nutzlasten:

Stockwerkslasten:
Decken mit $2,0 \text{ kN/m}^2$ nach Kategorie A
oder B für Wohn- und Büroflächen nach
Eurocode 1 [93]

Dachlasten:
Inklusive Schneelast $5,0 \text{ kN/m}^2$

Die Bemessung des adaptiven Tragwerks des Hochhaus-Demonstrators erfolgt für festgelegte Stockwerkslasten und eine Fassade, die in Bild 5.1 quantifiziert und in Eigengewichte und Nutzlasten unterschieden sind. Der Hochhaus-Demonstrator besteht aus vier Modulen, deren Profile der Tragwerkelemente Bild 5.2 zeigt.

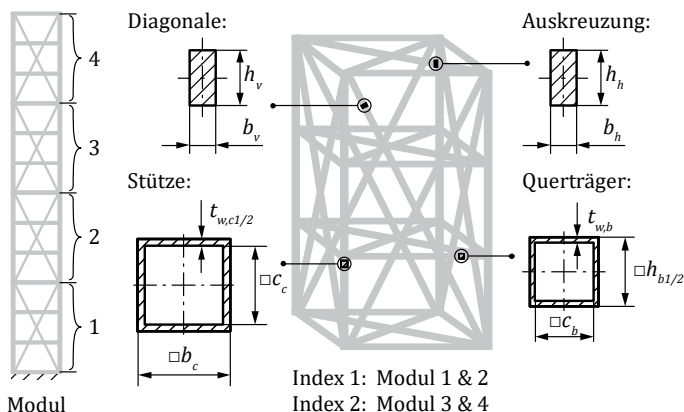


Bild 5.2: Profile und Topologie des adaptiven Hochhaus-Demonstrators

Die Wandstärke $t_{w,c,1/2}$ bzw. die Abmessung des quadratischen Hohlprofils $h_{b,1/2}$ wird abhängig von der Höhe des Moduls unterschiedlich bemessen. Für die unteren Module 1 und 2 ist aufgrund der höheren Gewichtskraft ein größerer Querschnitt erforderlich. Bei der Bemessung der Tragwerkelemente wird das maximale c_x/t_w -Verhältnis der druckbeanspruchten Querschnitte nach DIN EN 1993-1-1, dem Eurocode 3 [94], Klasse 1 berücksichtigt. Dadurch ist eine ausreichende Rotationskapazität zur Umverteilung der Schnittgrößen in den Fließgelenken gegeben.

Die Festlegung der Verbindungsarten erfolgt im Entwurf der Topologie und weist aufgrund der Konstruktion Kerbstellen auf, die ermüdungsrelevant sind und untersucht werden müssen. Anhand der DIN EN 1993-1-9 [135] lassen sich diese Kerbstellen Kerbfallkategorien zuordnen. Für den Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244 sind diese einschließlich der Beschreibung und Kerbfallzahl in Bild 5.3 gekennzeichnet. In diesem Fall wurden die kritischsten Kerbstellen, die sich durch die geringsten Kerbfallzahlen $\Delta\sigma_c$ auszeichnen, berücksichtigt. Gegebenenfalls ist es erforderlich weitere Kerbstellen zu erfassen und zu modellieren, sofern die Schwingbeanspruchung sich z. B. aufgrund der Aktivierung in andere Tragwerksteile verlagert. Aus der Beschreibung geht der Spannungsquerschnitt der maßgeblichen Spannungsamplitude hervor und die Qualitätsmerkmale der ausgewählten Kerbstellen.

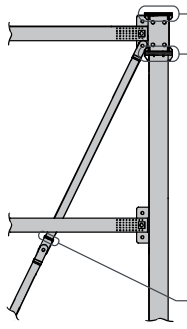
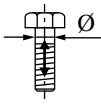
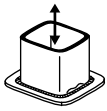
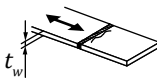
Konstruktion	Bezeichnung	Kerbfall
	• Schrauben auf Zug	-50-
	• Flanschanschluss	-71-
	• Geschweißter Querstoß	-71-
Kerbfall	Detail	Beschreibung und Anforderung
-50-		<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln • Biegespannungen sind zu berücksichtigen • Eine reduzierte Spannungsschwingbreite für vorgespannte Schrauben ist zulässig
-71-		<ul style="list-style-type: none"> • Flanschanschluss mit zu 80 % durchgeschweißten Stumpfnähten • $\Delta\sigma$ wird am Hohlprofil berechnet
-71-		<ul style="list-style-type: none"> • Einseitig geschweißte Stumpfnah mit Inspektion der Wurzellage • $t_w < 25$ mm: nicht blechdickenabhängig

Bild 5.3: Kritische Kerbdetails der Tragwerkskonstruktion und Kerbfälle [163] mit Beschreibung nach DIN EN 1993-1-9, Eurocode 3 [135]

Die Kerbdetails des Flanschanschlusses und der Schraubenverbindung sind in Bild 5.4 für den Fußpunkt und die Verbindung der Module angegeben. Die Windlast wirkt als Querkraft, wodurch sich eine Beanspruchung der Stützen und Flansche durch ein Biegemoment M_B ergibt. Für das Schraubenbild resultiert dies nach VDI 2230-2 [164] in einer zusätzlichen Axialkraft F_A , die in der äußersten Schraubenreihe maximal wird und sich der Vorspannkraft überlagert. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung (5.1).

$$F_{A,S}(M_B)_{max} = \frac{M_B \cdot x_{max}}{\sum_{i=1}^{n_{SR}} n_S \cdot x_i^2} \tag{5.1}$$

Jede Schraubenreihe n_{SR} wird mit der Anzahl an Schrauben n_S und dem quadratischen Abstand zur Kippkante x_i berücksichtigt.

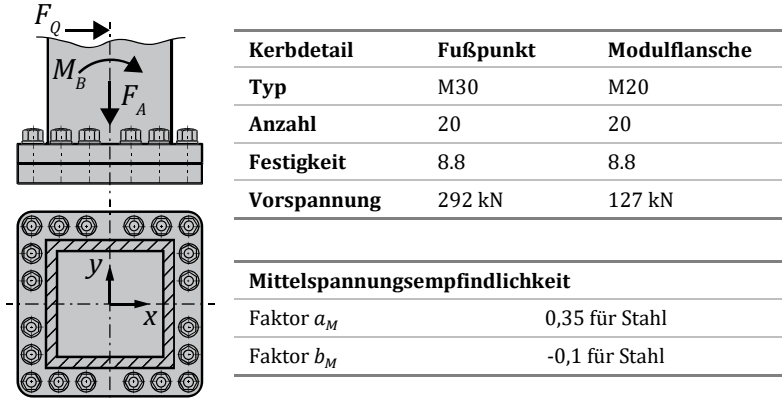


Bild 5.4: Ringflanschanschluss mit Schraubenverbindung, Angaben nach VDI 2230 Teil 1 [165] und Wächter [110]

Für das vorliegende Beispiel wird die Auslegung auf Gebrauchstauglichkeits- sowie Tragfähigkeitsgrenzzustände und der Einfluss der Randbedingungen auf die erzielbare Reduktion des Treibhauspotentials demonstriert. Hierfür ist die Darstellung der Tragwerkeigenschaften über einer abnehmenden Masse zweckmäßig, um Auslegungspunkte zu vergleichen. In diesem Schritt erfolgt zunächst keine Einschränkung des Grenzzustands durch Auslenkung oder Festlegung einer Lebensdauer. Die Modellparametrisierung geschieht auf der Grundlage der in Tabelle 3.6 definierten Materialparameter für den verwendeten Baustahl S355 mit Variation der Materialquerschnitte. Das c_x/t_w -Verhältnis bleibt dabei konstant.

Mittels des FE-Programms ANSYS Mechanical [145] wurden Massen- und Steifigkeitsmatrizen für unterschiedlich dimensionierte Tragwerke ermittelt und die Bewegungsgleichung parametrisiert. Das Systemverhalten lässt sich wie beschrieben mittels der Eigenfrequenzen und Eigenmoden abbilden. Das dynamische Verhalten des Systems wird durch die Übertragungsfunktion berechnet. Das Ergebnis der Systemgleichung ist das Systemverhalten in Form der Knotenverschiebungen der modellierten Tragstruktur, die sich aus den Störgrößen der Windlasten und den Aktorkräften ergeben. Die Normalspannungen in den Tragwerkelementen lassen sich hieraus über die linear-elastische Beziehung nach Hooke ermitteln. Die Biegespannung in den vier äußeren Tragwerksstützen ergibt sich aus zweimaliger Differentiation der angenäherten Biegelinie $w_t(z)$ nach Gleichung (4.14). Hierfür werden die Verschiebungen zu jedem Zeitpunkt t sowie die Randbedingungen im Fußpunkt $w(0) = 0$ und $w'(0) = 0$ berücksichtigt. Daraus ergibt sich die Biegespannung und damit die Vergleichsspannung.

Die Nummern der potentiellen Aktorelemente des Tragwerksmodells und die Windrichtung sind zusammen mit den ersten drei vereinfacht dargestellten Eigenmoden und der sich einstellenden Biegelinie in Bild 5.5 abgebildet.

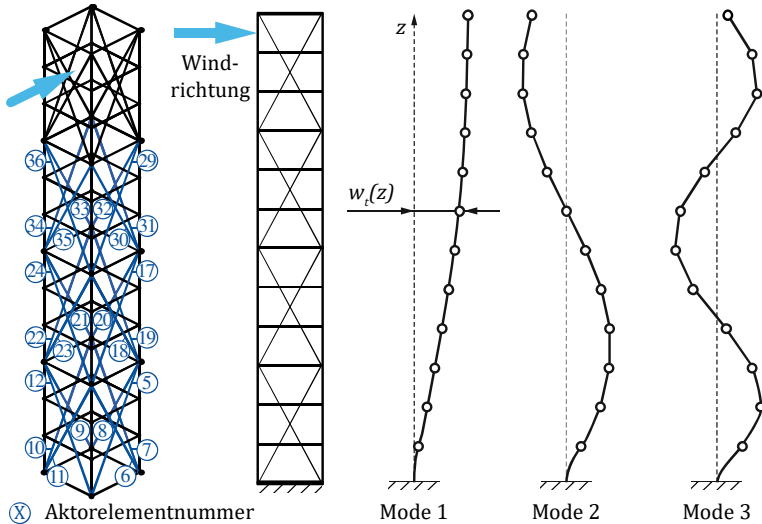


Bild 5.5: Biegelinie der Eigenmoden des Hochhaus-Demonstrators analog [84]

Die Platzierung der Aktoren orientiert sich an den in Abschnitt 4.2.3 erläuterten Konfigurationen unter Berücksichtigung der Anforderungen einer symmetrischen Aktivierung und unabhängigen Lastrichtung. Mit Variation der Anzahl an Aktoren ergeben sich fünf aktive Konfigurationen, die Tabelle 5.1 zu entnehmen sind. Die Konfigurationen mit acht Aktoren unterscheiden sich in der Platzierung je nach Modul (M1...3), wobei eine Platzierung im obersten Modul 4 aufgrund geringer Dämpfungseffekte ausscheidet. Um die Anzahl an Möglichkeiten zu verringern, entspricht die Position der Dehnungsmessstreifen (DMS) denen der Aktoren.

Tabelle 5.1: Untersuchte Konfigurationen der Aktor-Platzierung am Hochhaus-Demonstrator

Aktiv 8 (M1)	Aktiv 8 (M2)	Aktiv 8 (M3)	Aktiv 16	Aktiv 24
8 Aktoren	8 Aktoren	8 Aktoren	16 Aktoren	24 Aktoren
Platzierung: Modul 1	Platzierung: Modul 2	Platzierung: Modul 3	Platzierung: Modul 1 & 2	Platzierung: Modul 1, 2, 3

Das Systemlayout zur Adaption an Lasten ergibt sich als Regelkreis nach Bild 5.6. Neben den DMS werden zwei kamerabasierte optische Messsysteme sowie zwei inertielle Messeinheiten (IMUs) eingesetzt und als redundante Sensorsysteme verwendet. Mittels der vorhandenen Aktoren und Sensoren regeln dezentrale, linear-quadratische Regler das Tragwerk schwingungsdämpfend und werden von einem zentralen Regler redundant überwacht. Als Regelhardware mit entsprechender Software wird ein zertifizierter Aufbau verwendet und in diesem Beispiel nicht detaillierter betrachtet. Die Bereitstellung des Hydraulikdrucks ist durch Druckspeicher gepuffert, die primär der kurzfristigen Druckbereitstellung dienen und nicht über einen längeren Zeitraum als Notversorgung geeignet sind. Der Hydraulikdruck wird von einer Hydraulikpumpe erzeugt und über Ventile an die Hydraulikaktoren weitergeleitet. Für einen wahrscheinlichen Ausfall des Netzstroms beim Auftreten der kritischen Last, ist eine Notstromversorgung durch eine Batterie vorgesehen, die für die Dauer des Orkans eine Notversorgung übernehmen kann. Eine Diagnose der Komponenten ist für die sicherheitsgerechte Adaption im Falle des Einsatzes für die Grenzzustände der Tragfähigkeit vorgesehen.

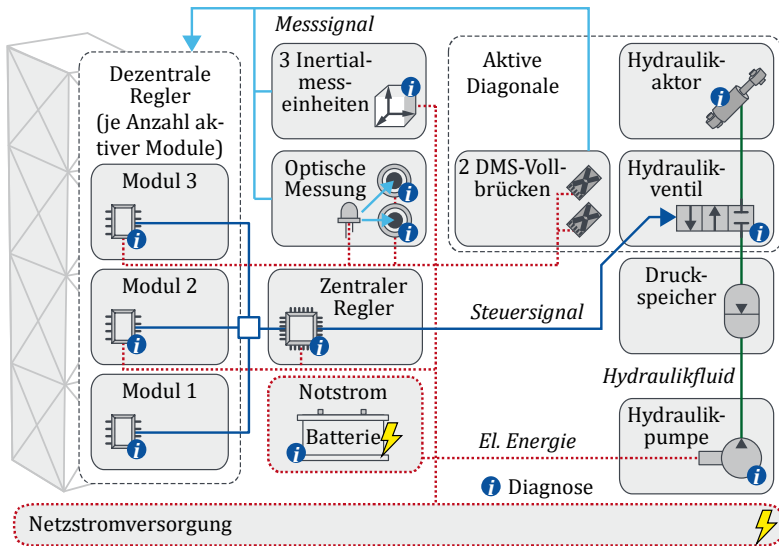


Bild 5.6: Systemlayout des Hochhaus-Demonstrators

Die der Zuverlässigkeitsanalyse zugrunde liegenden Parameter der angenommenen Ausfallverteilungen und Reparaturdauern sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Anhaltswerte für Ausfallwahrscheinlichkeiten des Hochhaus-Demonstrators

	Netzstrom	Notstrom	Hydraulik-Pumpe	Hydraulik-Ventil	Hydraulik-Aktor
Bemerkung	Ausfall bei krit. Last	„Battery rechargeable“	„Pump, Hydraulic“	„Valve, Hydraulic“	„Linear“
Ausfallfunktion	Konstant	Exponentiell	Weibull	Weibull	Weibull
Parameter	-	1.630 FIT	$T: 28.988 \text{ h}$ $b: 2$	$T: 32.895 \text{ h}$ $b: 2$	$T: 144.418 \text{ h}$ $b: 3$
Erneuerung	-	4 Wochen Reparaturdauer	4 Wochen Reparaturdauer	4 Wochen Reparaturdauer	4 Wochen Reparaturdauer
Quelle	[156]	[166]	[166]	[166]	[166]
	IMU	DMS-Vollbrücke	Optik	LED	Regelhard-/Software
Bemerkung	„IMU330“	„Gauge, Strain“	Fotodiode	Lichtleiter LED-Mod.	Bachmann-Steuerung
Ausfallfunktion	Exponentiell	Exponentiell	Exponentiell	Exponentiell	Exponentiell
Parameter	20.000 FIT	11.600 FIT	15 FIT	1.100 FIT	2,41 FIT
Erneuerung	Jährliche Reparatur	Jährliche Reparatur	4 Wochen Reparaturdauer	Jährliche Reparatur	4 Wochen Reparaturdauer
Quelle	[167]	[166]	[168]	[168]	[169], [170]

Die Modellierung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten erfolgt als Weibull- bzw. Exponentialverteilung. Nachfolgend werden die zwei Fälle einer Auslegung auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit unterschieden. Die Anforderung an die Zuverlässigkeit für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergibt sich aus der Versagenswahrscheinlichkeit nach Eurocode 0, Klasse RC 2, da nach der Bewertung mittels Risikograph aus Bild 4.9 in diesem Fall kein funktional abzusicherndes System vorliegt. Um einen Vergleich mit der Versagenswahrscheinlichkeit nach Eurocode vorzunehmen, ist die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens eines Funktionsausfalls der Adaptionfunktion und des kritischen Lastereignisses zu ermitteln. Für den Fall des Grenzzustands der Tragfähigkeit richtet sich die sicherheitsrelevante Auslegung der Adaption nach den Vorgaben der EN 61508. Die Vorgaben für die Grenzzustände sind in Tabelle 5.3 gegeneinander abgegrenzt.

Tabelle 5.3: Maximal zulässige Versagenswahrscheinlichkeit für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit

Norm	Auslegung auf den Grenzzustand der		
	Gebrauchstauglichkeit		Tragfähigkeit
DIN EN 1990 [8], Eurocode 0			EN 61508 [121]
Klasse	RC 2		SIL 3
Bezugszeitraum	1 Jahr	30 Jahre	Mittelwert PFD_{avg}
β	2,9	1,603	-
P_f	0,0019	0,0545	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$
Bemerkung	Versagenswahrscheinlichkeit		Fehler bei Anforderung

5.2 Störgrößensimulation des Hochhaus-Demonstrators

Mittels der Simulation der dynamischen Anregung, die in diesem Fall durch ein Windlastkollektiv erfolgt, werden die Ermüdungsbeanspruchung des Tragwerks und die auftretenden Grenzzustände der Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit berechnet. Die Auftretenshäufigkeit und mittlere Windgeschwindigkeit der Windlasten (WL) am Standort der Universität Stuttgart ist den Daten- und Kartendiensten der Landesanstalt für Umwelt in Baden Württemberg (LUBW) [132] entnommen, da der Eurocode diese nicht vorsieht.

Tabelle 5.4: Parameter der Last-Zeit-Verläufe der Windlasten (WL) zur Abbildung der Windverhältnisse am Standort der Universität Stuttgart nach [132]

WL	1	2	3	4	5	6	7	Sturm	Orkan
v_m [m/s]	0,65	1,6	2,1	3,1	4,65	6,2	7,7	26,7	34,5
v_*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	4,2	3
a					0,05				
z [m]					36				

Aus der mittleren Windgeschwindigkeit v_m in einer Tragwerkshöhe z von 36 m wurden über das Potenzprofil mit dem Profilexponent a nach Hellmann Wind-Zeit-Verläufe auf Grundlage der Parameter in Tabelle 5.4 generiert. Der Variationskoeffizient v_* bildet die Geschwindigkeitsänderung durch Windböen ab. Die Last-Zeit-Verläufe sind zusammen mit den Auftretenshäufigkeiten in Bild 5.7 abgebildet.

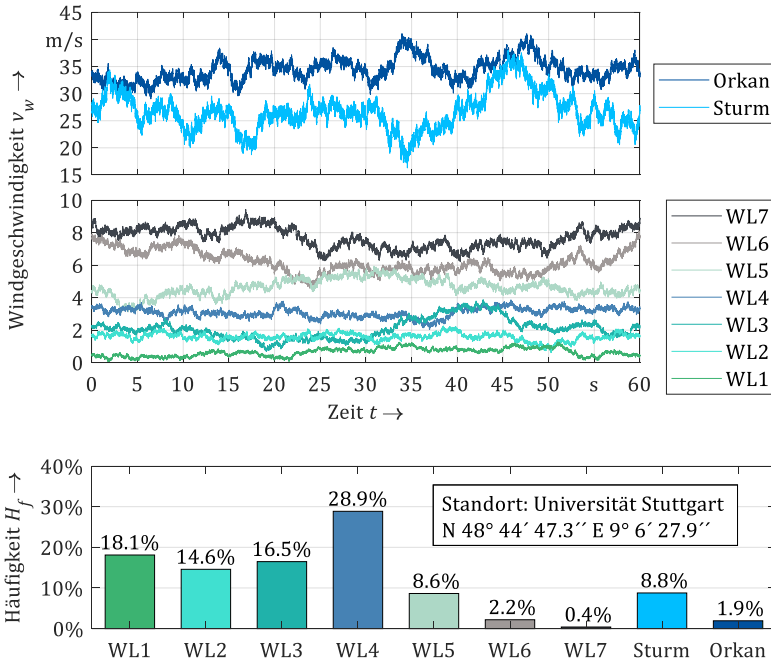


Bild 5.7: Generierte Windgeschwindigkeitsverläufe und angepasste Häufigkeit der Windlasten am Standort Stuttgart mit Sturm und Orkan [141, 171]

Für die dargestellten Extremlastfälle Sturm und Orkan sind in der Statistik nach LUBW [132], basierend auf einer Auswertung über 10 Jahre, keine Daten enthalten. Hierfür wurde die Erhebung zu den Sturm- und Orkantiefs ausgewertet [171] und die Häufigkeiten der Windlasten WL1-WL7 um den Anteil verringert, der für Sturm und Orkan hinzu kommt. Aufgrund der Ungewissheit der Windrichtung von Extremlasten wurde die konservative Annahme getroffen, dass eine vollflächig wirkende Windlast auf eine Fassadenfläche des Hochhaus-Demonstrators vorliegt.

Ausgehend von den Windlastdaten erfolgt die Modellierung der Störgrößen. Für eine gewählte Simulationszeit von $t_{sim} = 60$ s je Windlastprofil wird angenommen, dass eine ausreichende Anregung und Dämpfung des Hochhaus-Tragwerks erfolgt. Die der Simulation zugrunde liegende Abstufung der Tragwerksmodelle wurde aus dem festen c_x/t_w -Verhältnis der Hohlprofile mit konstanter Schrittweite bei gleichbleibender Skalierung zueinander bestimmt. Die Simulationsergebnisse sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.3 Ergebnisse der Störgrößensimulation

Für die Störgrößensimulation wurden anhand der in Anhang A beschriebenen Abmessungen der Tragwerksteile, auf der Grundlage der für den Stahlbau eingeführten Maße, skalierte Tragstrukturmodelle mit daraus resultierender fester Schrittweite erstellt. In diesem Anwendungsbeispiel wurden als Kriterien der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit die Kopfpunktauslenkung, die Spannung sowie die relative Lebensdauer über der Masse der Tragstruktur, für die in Tabelle 5.1 beschriebenen aktiven Konfigurationen und eine passive Konfiguration, ausgewertet. In Bild 5.8 ist der Vergleich aller Tragwerksmodelle anhand der Maximalauslenkung bei Windstärke Orkan über der Tragwerksmasse abgebildet.

Die gruppierten Balken beginnen jeweils links mit der passiven Variante, während nach rechts die Anzahl Aktoren bis zur Variante „Aktiv 24“ mit 24 Aktoren ansteigt. Für diese Variante sind im ersten, zweiten und dritten Modul Aktoren platziert was unabhängig von der Masse und wie zu erwarten die stärkste Dämpfung bzw. geringste Auslenkung ermöglicht. Die Auslenkung der Variante „Aktiv 16“ mit 16 Aktoren im ersten und zweiten Modul ist geringfügig weniger gut gedämpft. Eine zunächst abfallende und mit zunehmender Masse wieder ansteigende Auslenkung ergibt sich für die Variante „Aktiv 8 (M3)“, die mit acht Aktoren im dritten Modul bestückt ist. Daraus ist abzuleiten, dass bei hohen Tragwerksmassen mit Anregung der ersten Eigenmode eine Aktivierung nahe der Einspannstelle am effektivsten ist bzw. für diesen Fall mit acht Aktoren in Modul 3 keine ausreichende Dämpfung erzielt werden kann.

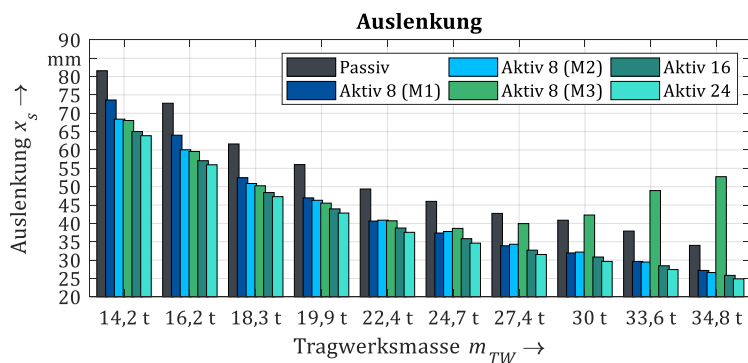


Bild 5.8: Vergleich der Auslenkung der aktiven Varianten mit der passiven des Hochhaus-Demonstrators

Für die beiden Varianten mit acht Aktoren im ersten bzw. zweiten Modul ergibt sich bei hoher Tragwerksmasse kaum ein Unterschied. Bei geringeren Tragwerksmassen und zunehmender Anregung höherer Eigenmoden ist zunächst ein leichter Vorteil durch die Platzierung im zweiten Modul zu erkennen. Nimmt die Masse weiter ab, ist die Platzierung im ersten Modul vorteilhafter. Bis auf die Variante „Aktiv 8 (M3)“ ergibt sich für alle Varianten eine erkennbare Dämpfung, verglichen mit der passiven Variante gleicher Tragwerksmasse. Bei einer vorgegebenen Auslenkung muss ein Vergleich von passiver zu aktiver Ausführung des Tragwerks unter gleichen Randbedingungen erfolgen. Für die Ausfalluntersuchungen sind in Abschnitt 5.4 daher Varianten mit unterschiedlicher Tragwerksmasse definiert, die für die Grenzzustände aufgrund der festgelegten Randbedingungen in Frage kommen.

Die Vergleichsspannung in den Tragwerksstützen ist in Bild 5.9 dargestellt. Hier zeichnet sich Variante „Aktiv 24“ als die mit der niedrigsten Vergleichsspannung aus. Eine etwas höhere Vergleichsspannung tritt bei der Variante mit 16 Aktoren auf, die für höhere Tragwerksmassen vergleichsweise deutlich ansteigt. Durch die beiden aktiv versteiften unteren Module verlagert sich die maximale Vergleichsspannung aufgrund hoher Biegespannungen in höherliegende Module. Die Konfiguration mit acht Aktoren im dritten Modul übersteigt für höhere Massen deutlich die Festigkeitsgrenze des verwendeten Werkstoffs S355. Dies deckt sich mit dem Verhalten der Auslenkung. Ein Vergleich der übrigen Varianten mit acht Aktoren zeigt für geringe Tragwerksmassen einen Vorteil bei der Platzierung der Aktoren im zweiten Modul. Für eine steigende Tragwerksmasse egalisiert sich dieser Vorteil vollständig und eine Platzierung im untersten Modul wird vorteilhafter für die Vergleichsspannung.

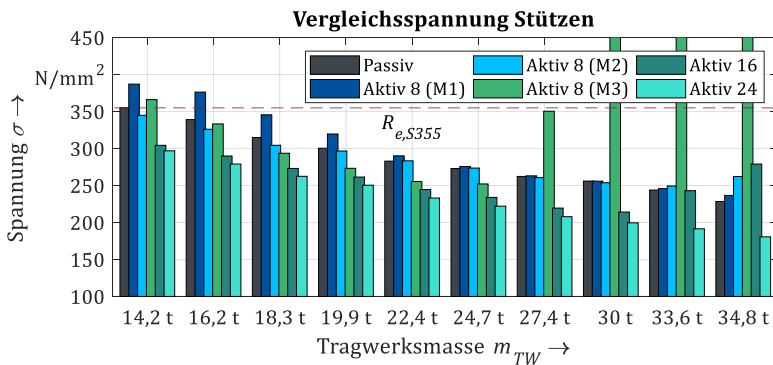


Bild 5.9: Vergleich der Vergleichsspannung in den Stützen der passiven Variante mit den aktiven Varianten des Hochhaus-Demonstrators

Für die normalkraftbelasteten Diagonalen ergibt sich eine ähnliche Darstellung, wie in Bild 5.10 gezeigt. Die Varianten mit 16 und 24 Aktoren weisen die am gleichmäßigsten verteilte Aktorplatzierung und damit geringste Spannung in den Diagonalen auf, da sich die Aktuierung auf mehrere Module verteilt. Die Variante mit acht Aktoren im dritten Modul, Aktiv 8 (M3), kann mit zunehmender Tragwerksmasse die Tragstruktur nicht kontrollieren, weshalb die Spannung stark ansteigt. Die übrigen Varianten mit acht Aktoren liegen etwa gleichauf mit der passiven Variante und die Spannung steigt für geringere Tragwerksmassen stärker an. Da die Aktoren in den Diagonalen sitzen und hierüber die Versteifung erfolgt, ist dies naheliegend. Die vorhandenen Reserven in der Beanspruchbarkeit ermöglichen ein Aufbringen größerer Kräfte einzelner Aktoren, ohne an die Belastungsgrenze zu stoßen bzw. die Verbindungsstellen zu überlasten. Die Querschnitte der Diagonalen wurden aus diesem Grund nicht in die Skalierung der Tragwerksmasse einbezogen und für alle Tragwerksmodelle identisch gewählt.

Bei den Diagonalen handelt es sich um Zugstreben bzw. Zugbleche, die nicht auf Druck belastet werden können. Die Modellierung dieses schaltenden Verhaltens bei Wechsel von Zug- zu Druckbeanspruchung führt zu Nichtlinearitäten im Simulationsmodell und kann aufgrund einer deutlichen Zunahme der Komplexität nicht berücksichtigt werden. Die Simulation erfolgt daher anhand einer Aufteilung in Druck- und Zugbeanspruchung. Vereinfacht wird angenommen, dass durch eine Verdoppelung der auftretenden Zugspannungen die Druckspannungen ausgeglichen sind, was so in Bild 5.10 in der Angabe der Normalspannung berücksichtigt ist. Dies stellt in diesem Fall eine gerechtfertigte Annahme dar.

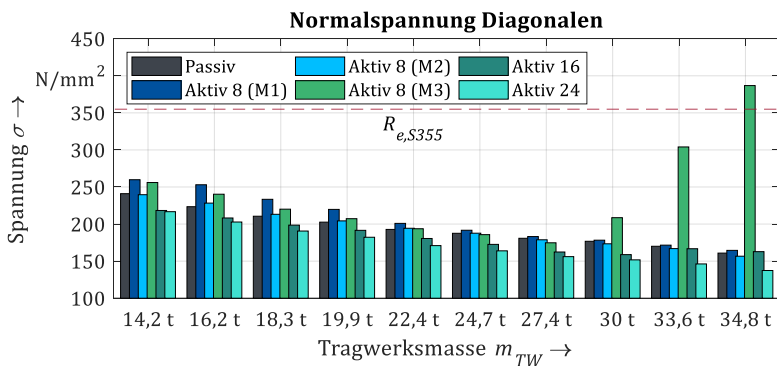


Bild 5.10: Vergleich der Normalspannung in den Diagonalen der passiven Variante mit den aktiven Varianten des Hochhaus-Demonstratort

Die Auswertung der relativen Ermüdungslebensdauer ist in Bild 5.11 abgebildet. Dargestellt ist das Verhältnis aus minimaler Ermüdungslebensdauer der jeweiligen aktiven Variante gegenüber der passiven Variante gleicher Tragwerksmasse. Die minimale Ermüdungslebensdauer ergibt sich aus der Auswertung der Kerbstellen der Schrauben, der Flansche und Querstöße. Aus Bild 5.11 ist ersichtlich, dass eine Aktivierung des Tragwerks für den überwiegenden Teil der dargestellten Tragwerksmodelle zu einer Erhöhung der Ermüdungslebensdauer gegenüber dem passiven Tragwerk, das als Bezug dient, führt. Im Fall der Variante mit 24 Aktoren ergibt sich unabhängig von der Tragwerksmasse ein Zugewinn an Ermüdungslebensdauer. Gleiches gilt für die Variante mit 16 Aktoren, ausgenommen der maximalen Tragwerksmasse, bei der eine höhere Spannung eine schnellere Ermüdung bewirkt.

Bei den Varianten mit acht Aktoren zeichnet sich im Bereich geringerer Tragwerksmasse die Konfiguration mit der Platzierung der Aktoren im zweiten Modul durch eine Steigerung der Ermüdungslebensdauer aus. Für höhere Tragwerksmassen ist eine Platzierung im untersten Modul vorteilhafter und mit einer geringeren Ermüdung verbunden. Durch eine abnehmende Tragwerksmasse sinkt die Spannungsamplitude der Schwingspiele, bleibt im untersten Modul jedoch am höchsten, weshalb dort eine Aktuierung am effektivsten ist. Wiederum ist zu erkennen, dass die Variante mit acht Aktoren im dritten Modul eine Verschlechterung der Ermüdungslebensdauer für eine ansteigende Tragwerksmasse hervorruft. Hier zeigt sich, dass die Lebensdauerverringerung einerseits den hohen Spannungen zuzuschreiben ist, andererseits durch ungünstige Aktivierung, je nach Tragwerksmasse und Schwingungsform und den entstehenden Zwängen, Schwingspiele in die Tragstruktur eingetragen werden.

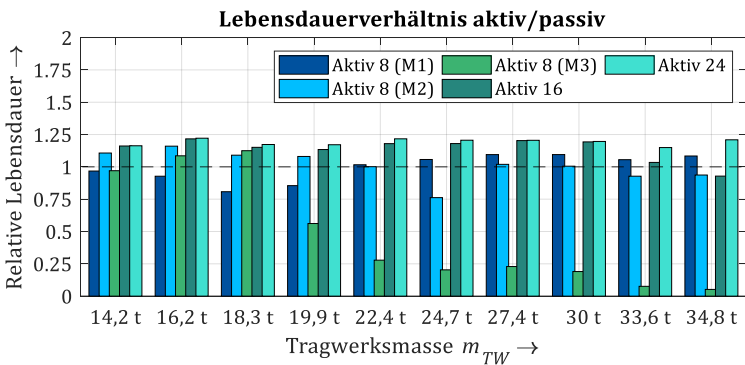


Bild 5.11: Vergleich der relativen Ermüdungslebensdauer der aktiven Varianten gegenüber auf die passive Variante des Hochhaus-Demonstrators

Der Effekt der sich bei der Konfiguration Aktiv 8 (M2) zeigt, ist bedingt durch die ermüdungsrelevanten Kerbstellen. Die Kerbstellen der Tragwerksmodelle sind die Schrauben, Flansche sowie Querstöße, in der Reihenfolge ihrer Relevanz. Eine Skalierung der Schraubenverbindungen erfolgte im vorliegenden Beispiel nicht, weshalb mit abnehmender Tragwerksmasse zunehmend die Flanschverbindung durch den abnehmenden Spannungsquerschnitt bestimmend ist. Dies hat zur Folge, dass die Aktivierung im Falle der konkurrierenden Ausfallmechanismen bei 24,7 t die Flanschverbindungen höher beansprucht und daher gegenüber dem passiven Tragwerk, bei dem die Schraubenverbindungen weiterhin bestimmend sind, eine stärkere Ermüdung auftritt. In diesem Diagramm ist lediglich der Einfluss einer Aktivierung auf die Ermüdung erkennbar, da der Bezug auf die Ermüdungslebensdauer des passiven Tragwerks gleicher Masse erfolgt. Eine differenzierte Auswertung der Tragwerksmodelle ist in Anhang A enthalten. Für einen effektiven Vergleich der aktiven und passiven Tragwerksmodelle müssen dieselben Randbedingungen bestehen. Daher ist im Fall der Gebrauchstauglichkeit ein Vergleich der Varianten mit gleicher Funktionalität wie z. B. Variante Aktiv 8 (M2) mit 24,7 t und die passive Variante gleicher Auslenkung mit 33,6 t erforderlich.

Der optimale Auslegungspunkt ist bestimmt durch das steifigkeits-, festigkeits- oder dauerfestigkeitsmotivierte Problem, durch das eine Aktivierung der Tragstruktur erwägt wurde. Hierfür ergeben sich im vorliegenden Fall Varianten, die hinsichtlich der exemplarischen Vorgaben für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit in Frage kommen und sich für einen Vergleich eignen. Eine längere Nutzungsdauer durch einen Anstieg der Ermüdungslebensdauer der Tragstruktur, insbesondere als Bezugszeitraum der Umweltwirkung, muss berücksichtigt werden.

5.4 Ausfallanalyse des Hochhaus-Demonstrators

Für die Einhaltung definierter Grenzzustände eignen sich nicht alle der zuvor dargestellten Tragwerksmodelle und Aktorkonfigurationen. Tabelle 5.5 zeigt je ein untersuchtes Szenario für Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und die Tragfähigkeit auf. Zudem sind die hierfür in Frage kommenden Varianten der Tragwerksmodelle unterschiedlicher Masse und Aktorkonfiguration enthalten. Eine ausreichende Ermüdungslebensdauer ist nachzuweisen. Die passive Variante hält bei entsprechender Auslegung die geforderte Vorgabe in jedem Fall ein. Für die aktiven Varianten ist dies ausschließlich für eine funktionierende Adaption sichergestellt. Daher erfolgt die Untersuchung von Ausfällen der Adaption, wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben.

Tabelle 5.5: Anforderungen an die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Hochhaus-Demonstrators

Anforderung	Grenzzustand der			
	Gebrauchstauglichkeit		Tragfähigkeit	
	$x_s \leq 40 \text{ mm}$		$\sigma_v \leq 310 \text{ N/mm}^2$	
	Variante	Auslenkung	Variante	Spannung
	Passiv: 33,6 t	37,91 mm	Passiv: 19,9 t	300,5 N/mm ²
Mögliche Varianten	Aktiv 8: 24,7 t	M1 37,37 mm/	-	-
		M2 37,79 mm	-	-
	Aktiv 16: 22,4 t	38,73 mm	Aktiv 16: 14,2 t	304,4 N/mm ²
	Aktiv 24: 22,4 t	37,57 mm	Aktiv 24: 14,2 t	297 N/mm ²

Die zum Ausfall der Adaption führenden Kombinationen von Komponentenausfällen sind im qualitativen Fehlerbaum in Bild 5.12 abgebildet. Ohne kritischen Lastfall ist kein Versagen der Tragstruktur zu erwarten, da das adaptive Tragwerk den überwiegenden Teil der Lasten ohne funktionsfähige Adaption erträgt. Ersichtlich ist, dass selbst für einen Ausfall aller Komponenten der Adaption, die Adaptionfunktion zwar nicht verfügbar ist, dennoch ein sicherer Systemzustand und damit keine Gefährdung vorliegt, sofern keine kritische Last auftritt. Wiederum nachvollziehbar ist, dass je länger der Fehlzustand des Ausfalls anhält, umso Wahrscheinlicher eine Überschneidung mit dem kritischen Lastfall wird. Im Fall des Grenzzustands der Tragfähigkeit ist eine Fehlerdetektion und -diagnose mit anschließender Wartung von defekten Komponenten daher essentiell, die in der EN 61508 [101] durch den Diagnosedeckungsgrad berücksichtigt wird.

Nach [156] ist ein Stromausfall aufgrund von Sturmschäden durch die Anfälligkeit von Strommasten und Freileitungsnetzen höchst wahrscheinlich. Aufgrund der statistischen Abhängigkeit der beiden Ausfallursachen wurde die Netzspannungsversorgung daher nicht als Rückfallebene in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt. Die Funktionsverfügbarkeit im kritischen Lastfall hängt aus diesem Grund allein von der Notversorgung durch eine Batterie ab. Für das redundante Sensorsystem ist im Fall der DMS und LEDs für die optische Erkennung der Tragwerksdeformation eine Funktion von 50 % der vorhandenen Einheiten erforderlich. Daneben bilden Dehnungsmessung, optische Deformationsmessung und inertielle Messung ein fehlertolerantes zwei aus drei Sensorsystem. Der dezentrale Regler wird bei Ausfall durch einen zentralen Regler redundant ersetzt.

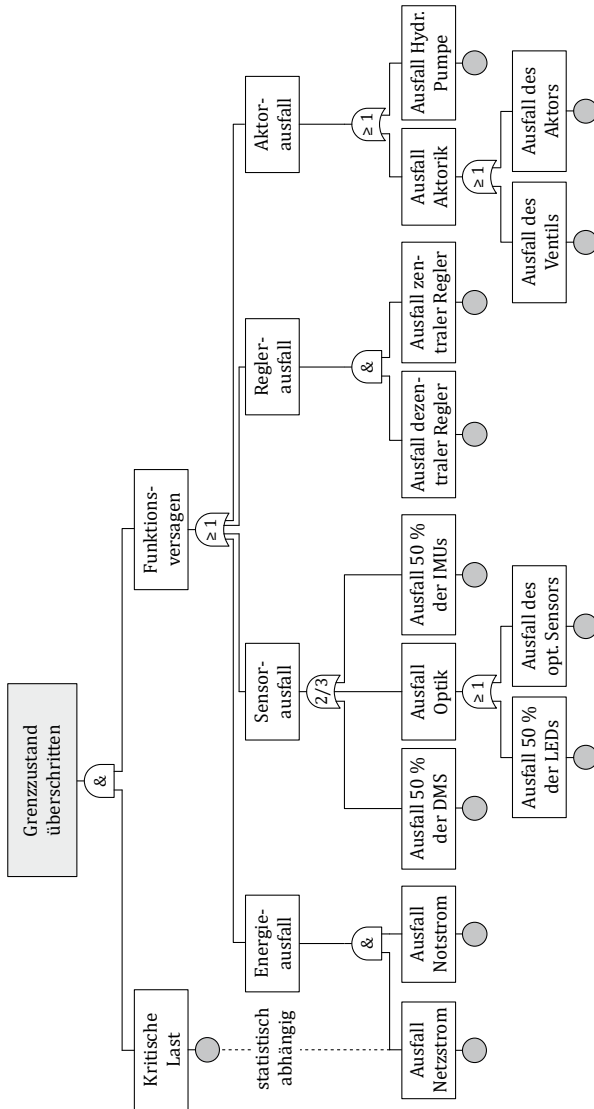


Bild 5.12: Qualitativer Fehlerbaum des adaptiven Hochhaus-Demonstrators für die Überschreitung der Grenzzustände

Die Auswirkung von Ausfällen der Aktoren wurde mittels der Störgrößensimulation ermittelt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die aktiven Diagonalen in der Ausführung als Zugstreben keine Druckkräfte übertragen können. Dadurch sind sie bei einer Stauchung ungespannt und können das Tragwerk nicht aktiv beeinflussen. Sowohl ein Ausfall des Ventils als auch der Aktoren selbst verhindert den fehlerfreien Betrieb. Darüber hinaus ist eine Hydraulikdruckerzeugung durch eine Pumpe sowie eine Mindestanzahl an Sensorik und ein Regler erforderlich. Die Ausfallanalysen sind im Folgenden anhand der Grenzzustände unterschieden.

5.4.1 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

In Bild 5.13 ist beispielhaft für die Variante Aktiv 8 M1 mit einer Tragwerksmasse von 24,7 t die Ausfallanalyse der Aktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Kombination aus zwei ausgefallenen Aktoren dargestellt. Für den Ausfall eines einzelnen Aktors liegt in dieser Konfiguration keine Überschreitung des Grenzzustands vor. Aufgetragen ist die maximale Auslenkung, die sich bei Ausfall der Aktoren wie in Bild 5.13 unten markiert ergibt. Die Ausfallanalyse beinhaltet die Ausfallkonfigurationen, die zu einer Überschreitung des Grenzzustandes führen.

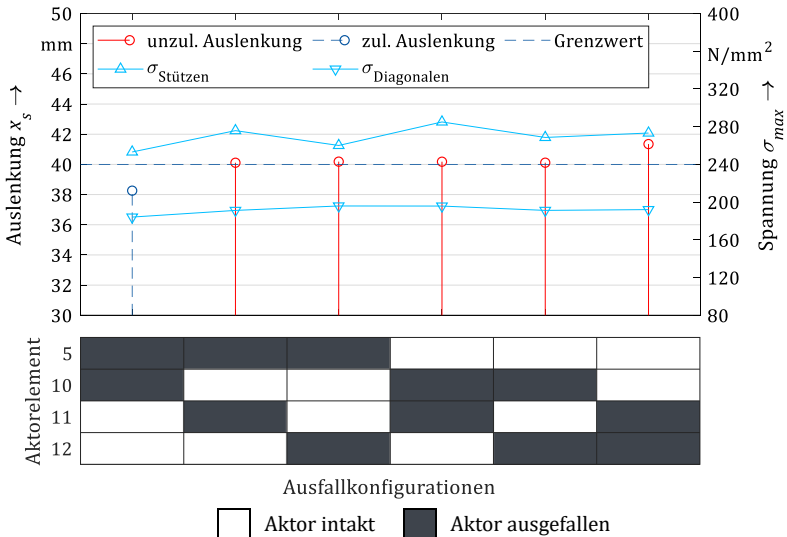


Bild 5.13: Ausfallanalyse für Ausfallkombinationen aus zwei Aktoren der Variante Aktiv 8 M1 mit einer Tragwerksmasse von 24,7 t

Eine Auflistung als Wahrheitstabelle für alle untersuchten Varianten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zeigt Tabelle 5.6. Während die Varianten Aktiv 8 M1 sowie Aktiv 8 M2 den Ausfall eines Aktors kompensieren können, reicht aufgrund der geringeren Masse der Ausfall des Aktorelements Nr. 11 bzw. Nr. 12 für die Variante Aktiv 16 um einen Systemausfall herbeizuführen. Die Variante Aktiv 24 bietet mit einer Aktorfehlertoleranz von drei die höchste Zuverlässigkeit. Die Varianten unterscheiden sich in der für den Grenzzustand minimal möglichen Tragwerksmasse, der Ausfallredundanz der Aktoren und der Anzahl an DMS, die jeweils der Anzahl an Aktoren entspricht. Festzuhalten ist, dass sich für eine Überschreitung des Grenzzustands der Funktionsausfall mit dem kritischen Lastereignis überschneiden muss.

Tabelle 5.6: Wahrheitstabelle für Ausfälle der Aktoren im GZS der Gebrauchstauglichkeit

	Aktive Aktorelemente (Element-Nr. siehe Bild 5.5)												Krit. Last	System	Auslenkung in mm
	Modul 1				Modul 2				Modul 3						
	5	10	11	12	17	22	23	24	29	34	35	36			
Aktiv 8 M1	0	1	0	1									Ja	0	40,11
	0	1	1	0									Ja	0	40,18
	1	0	0	1									Ja	0	40,18
	1	0	1	0									Ja	0	40,11
	1	1	0	0									Ja	0	41,35
Aktiv 8 M2					0	1	0	1					Ja	0	40,46
					0	1	1	0					Ja	0	40,39
					1	0	0	1					Ja	0	40,39
					1	0	1	0					Ja	0	40,46
					1	1	0	0					Ja	0	40,87
Aktiv 16	1	1	0	1	1	1	1	1					Ja	0	40,27
	1	1	1	0	1	1	1	1					Ja	0	40,27
	0	0	1	1	1	1	1	1					Ja	0	40,33
	0	1	1	1	1	1	0	1					Ja	0	40,82
	0	1	1	1	1	1	1	0					Ja	0	40,23
	1	0	1	1	1	1	0	1					Ja	0	40,23
	1	0	1	1	1	1	1	0					Ja	0	40,82
Aktiv 24	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	Ja	0	40,38
	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	Ja	0	40,38
	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	Ja	0	40,10
	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	Ja	0	40,10
	Ausfälle ≥ vier Aktoren												Ja	0	≥ 40,00
(Inaktiv, da druckbeansprucht: 6, 7, 8, 9, 18, 19, 20, 21, 30, 31, 32, 33)															
0: Ausfall 1: Intakt															

Um die Zuverlässigkeitsanforderung über die im Bauwesen üblichen Nutzungsdauern von 10 bis 50 Jahren zu erfüllen, ist eine Wartung und Reparatur von Komponenten erforderlich. Die Erfassung von Ausfall- und Reparaturraten und die statistische Abhängigkeit von Ereignissen erfordert eine geeignete Modellierung. In diesem Beispiel wurde ein Petrinetz mit der Software REALIST [172] erstellt und ausgewertet.

Aus der Beschreibung der Zuverlässigkeit als Wahrscheinlichkeit der Funktionsfähigkeit der Adaptionfunktion unter den vorhandenen Umgebungsbedingungen für die geforderte Lebensdauer, ergibt sich im Zusammenhang mit der Reparatur von Komponenten die Funktionsverfügbarkeit. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der sich die Adaptionfunktion zu einem beliebigen Zeitpunkt im funktionsfähigen Zustand befindet und nicht durch Reparatur oder Wartung nicht zur Verfügung steht. Die Überlagerung mit der Wahrscheinlichkeit des kritischen Lastfalls führt zur Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit als Grenzwert des Eurocode 0 [8]. Die resultierende Versagenswahrscheinlichkeit hängt demnach stark von der Annahme der Wahrscheinlichkeit des kritischen Lastereignisses ab. Da sich diese Wahrscheinlichkeit schwer vorhersagen lässt und die angenommene Häufigkeit im Lastkollektiv lediglich einen Mittelwert darstellt, wurde in Bild 5.14 mitunter die Nicht-Verfügbarkeit der Adaptionfunktion für 50.000 Replikationen dargestellt. Die erforderliche Anzahl Replikationen ergibt sich aus einer hinreichend genauen Berechnung, die insbesondere für geringe Wahrscheinlichkeiten eine hohe Anzahl Replikationen erfordert.

Die Nicht-Verfügbarkeit stellt den maximalen Grenzwert der Versagenswahrscheinlichkeit dar. Als Vergleich ist die Versagenswahrscheinlichkeit nach Eurocode, bestimmt nach Gleichung (3.6), aufgetragen. Die beiden Varianten Aktiv 8 M1 und M2 sind aufgrund derselben Ausfälle der Aktoren, die zur Nicht-Verfügbarkeit der Funktion führen, identisch. Die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit liegt bei 3,12 %. Die Nicht-Verfügbarkeit steigt gegenüber der Angabe nach Eurocode aufgrund der kürzeren Lebensdauern der Adaptionkomponenten für alle Varianten schneller an. Für die Variante Aktiv 16 ergeben sich aufgrund der geringeren Fehlertoleranz für Ausfälle der Aktoren durch die höhere Masseneinsparung im Mittel 8,09 %. In der Variante Aktiv 24 stellt sich ein Wert von 2,61 % ein, wobei sich nach Eurocode für 30 Jahre ein Mittelwert von 2,75 % ergibt. Aus der Nicht-Verfügbarkeit als maximale Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich durch „UND“-Verknüpfung mit der Wahrscheinlichkeit des kritischen Lastfalls in jedem Fall eine geringere Wahrscheinlichkeit des Versagens. Der Simulation liegt eine mittlere Reparaturdauer *MTTR* von vier Wochen zugrunde. Für die Sensorkomponenten wie DMS bzw. LEDs wurde eine jährliche Wartung defekter Komponenten angesetzt.

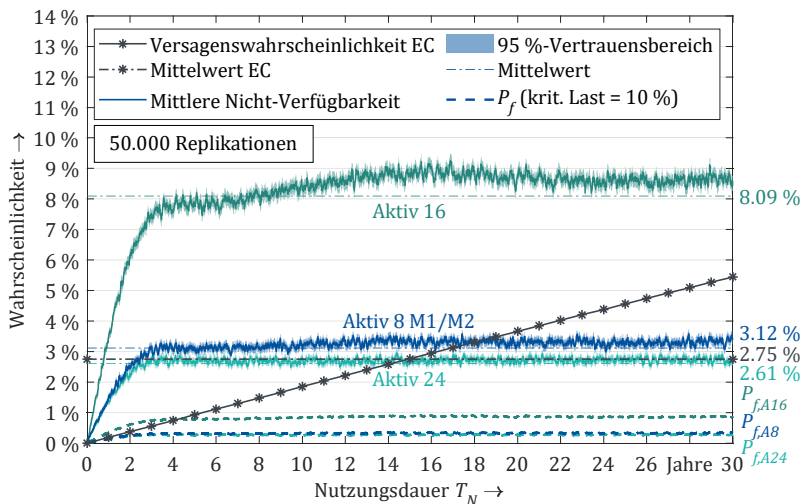


Bild 5.14: Nicht-Verfügbarkeit der Adaptionfunktion und Versagenswahrscheinlichkeit in Kombination mit der kritischen Last sowie nach Eurocode (EC) [8]

Wie beschrieben stellt die Häufigkeit des Auftretens der kritischen Last „Orkan“ des Lastkollektivs eine Mittelung dar. Unter der Annahme einer maximalen Wahrscheinlichkeit von 10 % des Zusammentreffens der kritischen Last mit der Nicht-Verfügbarkeit, sind in Bild 5.14 die Versagenswahrscheinlichkeiten P_f aufgetragen. Diese liegen unterhalb von einem Prozent. Somit erfüllt einzig die Variante mit 16 Aktoren durch den steileren Verlauf zu Beginn theoretisch nicht die Vorgaben nach Eurocode.

Aufgrund der Masseneinsparung, einhergehend mit der Aktivierung des Tragwerks zur aktiven Schwingungsdämpfung, nimmt das Eigengewicht der Struktur stark ab. Durch die lokale Versteifung der aktiven Elemente und das geringere Eigengewicht verlagert sich die höchstbeanspruchte Kerbstelle. Dies führt innerhalb bestimmter Grenzen zu einer höheren Ermüdungslebensdauer. Bei einem höheren Tragwerksgewicht ist die Schraubenverbindung bestimmend. Nimmt der Strukturquerschnitt und damit die Masse ab, ist der geschweißte Flanschanschluss maßgebend. Während für die passive Variante die Schraubenverbindung ausschlaggebend für die Ermüdungslebensdauer ist, sind für die aktiven Varianten vorwiegend die Flanschverbindungen entscheidend. In Bild 5.15 sind die erzielbaren Ermüdungslebensdauern der aktiven Varianten relativ zur passiven Variante gleicher Auslenkung und der bestimmenden Kerbstellen angegeben.

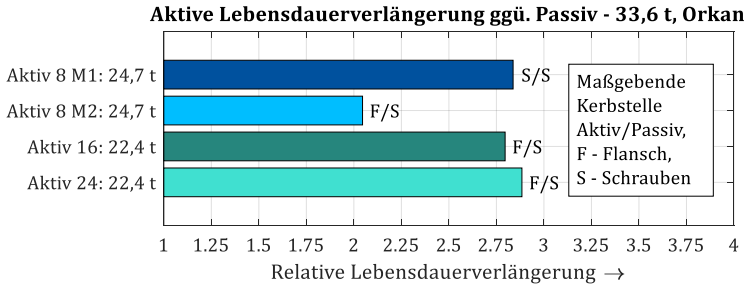


Bild 5.15: GZS der Gebrauchstauglichkeit: Relative Lebensdauerverlängerung der Varianten des adaptiven Tragwerks bezogen auf das passive Tragwerk

Die längste Ermüdungslebensdauer ergibt sich für die Variante Aktiv 24. Die Varianten Aktiv 8 M1 und Aktiv 16 schneiden etwas schlechter ab. Die Platzierung der Aktoren im zweiten Modul bei Variante Aktiv 8 M2 ist ungünstiger, eine Verdoppelung der Ermüdungslebensdauer ist dennoch durch die Masseneinsparung erzielbar. In diesem Anwendungsbeispiel steht der relative Vergleich der aktiven Varianten gegenüber einer passiven Variante im Vordergrund. Auf die Angabe einer absoluten Lebensdauer wird daher verzichtet, da diese neben der Ermüdungsfestigkeit zudem von weiteren Faktoren wie der Beständigkeit der verwendeten Baumaterialien gegenüber Umwelteinflüssen abhängt. Die Nutzungsdauer muss unter Berücksichtigung dieser Faktoren gewählt werden. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird die Nutzungsdauer durch die relative Lebensdauerverlängerung, die sich aus der Verringerung des Eigengewichts und der Schwingungsdämpfung ergibt, einbezogen. Die Bewertung der Ermüdungslebensdauer ist aus zwei Gründen erforderlich. Das adaptive Hochhaus-Tragwerk verhält sich für schwächere Lasten bei einem geringeren Spannungsquerschnitt passiv, was ein Grund für eine schnellere Ermüdung sein kann. Daneben ist eine beliebige Reduzierung der Querschnitte begrenzt durch die Ermüdungsfestigkeit der Strukturkerbstellen, wie z. B. den Schweißnähten.

Wie in Bild 5.16 zu erkennen ist, wird durch die verringerte Masse der aktiven Varianten, beispielhaft dargestellt durch Varianten Aktiv 8 M1 und Aktiv 24, eine höhere Schwingungsform angeregt. Während bei der passiven Variante die maximale Auslenkung (rote Punktmarkierung) im Dachgeschoss auftritt, ergibt sich diese bei den aktiven Varianten im Stockwerk unterhalb. Der dargestellte Pfeil zeigt die Richtung der Windlast an. Die maximale Spannung tritt für alle Varianten auf der Druckseite des untersten Moduls auf (rote Strichlinie). Überzeichnet dargestellt ist die Verformung des Tragwerks (blaue Strichlinie), die sich durch die aktive Versteifung zunehmend im oberen Modul einstellt.

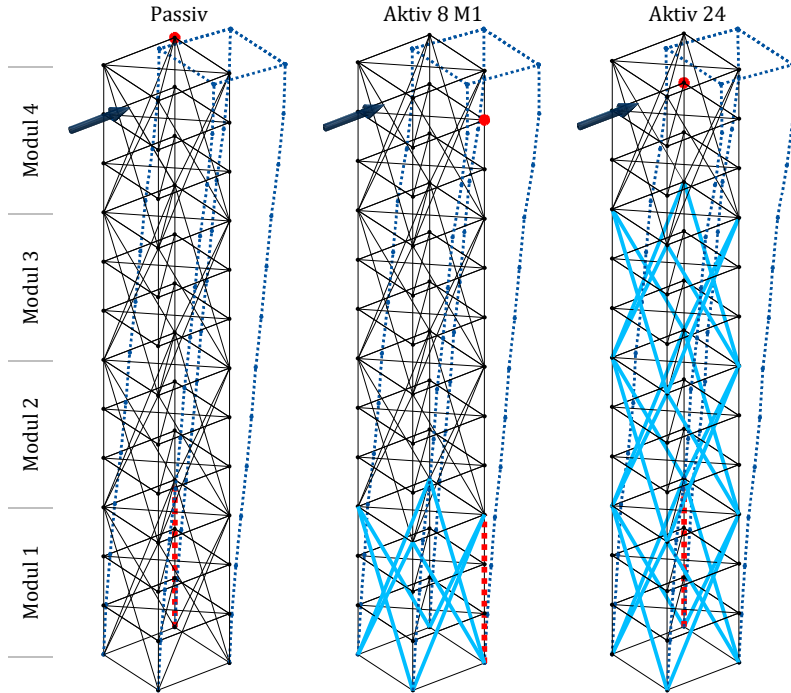


Bild 5.16: Varianten des Demonstrator-Hochhauses: Element mit maximaler Spannung und Knoten maximaler Auslenkung sowie überzeichnete Verformung

Die Ermüdungsbeanspruchung, abgebildet als Vergleich der qualitativen Lebensdauerverteilung der exemplarisch gewählten Variante Aktiv 8 gegenüber der passiven, zeigt Bild 5.17. Dargestellt sind die beiden lebensdauerbestimmenden Kerbstellen über den Modulen des Tragwerks.

In Bild 5.17 oben ist die Kerbstelle der Schraubenverbindung dargestellt. Die Massenreduktion, die für die aktiven Varianten möglich wird, führt zu einer Entlastung der Schraubenverbindungen im untersten Modul. Aufgrund der Querschnittsreduktion ist für den Flansch im unteren Balkendiagramm eine Verringerung der Ermüdungslebensdauer zu beobachten. Für das passive Tragwerk ist die Schraubenverbindung bestimmend. Da diese nicht mit der Masse skaliert wird, ist die Flanschverbindung mit abnehmendem Querschnitt ausschlaggebend. Die aktive Versteifung des unteren Moduls führt zu einer Verringerung der Ermüdungslebensdauer in den oberen Modulen, während das versteifte Modul dabei nahezu konstant bleibt.

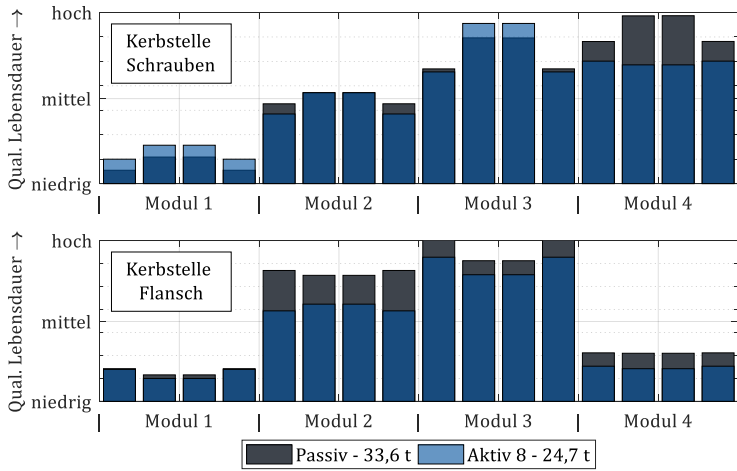


Bild 5.17: Qualitativer Lebensdauervergleich der Variante Aktiv 8 M1 ggü. Passiv für die Aktuierung der Windlast Orkan

Während bisher ausschließlich für die kritische Windlast Orkan eine Aktuierung der Tragstruktur erfolgte, ist in Bild 5.18 die qualitative Ermüdungslebensdauer für eine Aktuierung von Windlast Orkan sowie Sturm dargestellt.

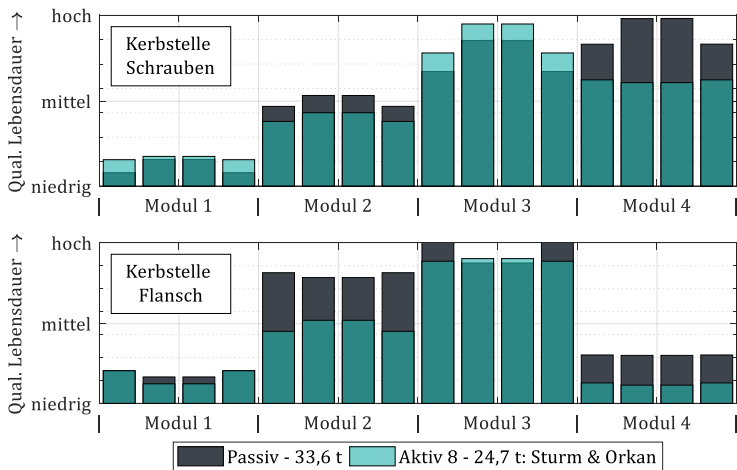


Bild 5.18: Qualitativer Lebensdauervergleich der Variante Aktiv 8 M1 ggü. Passiv für die Aktuierung der Windlasten Sturm und Orkan

Die Ermüdungslebensdauer der jeweiligen Module gleicht sich zunehmend an. Durch die aktive Versteifung des untersten Moduls ergibt sich insbesondere im obersten Modul eine geringere Ermüdungslebensdauer. Die Aktuierung von Sturm und Orkan resultiert durch die zusätzlichen Zwangsbedingungen in einer schnelleren Ermüdung der höher belasteten Tragwerksteile in Modul 4 aber auch in Modul 1. Eine häufigere, bzw. permanente Aktuierung wirkt sich in diesem Fall daher sogar nachteilig aus und ist sowohl aufgrund einer verringerten Ermüdungslebensdauer als auch aufgrund eines höheren Energiebedarfs nicht zu empfehlen.

Eine ähnliche Verteilung stellt sich auch bei der Verwendung einer größeren Anzahl an Aktoren ein, da das Modul 4 durch die geringere Masse und Änderung der Schwingungsresonanz des Tragwerks bzw. Versteifung des unteren Tragwerksteils schneller ermüdet. Der Effekt der Aktuierung weiterer Lasten neben Sturm und Orkan, ist aufgrund geringerer Mittelwerte und kleineren Spannungsamplituden gegenüber den kritischen Windlasten gering. Diese tragen einen Großteil der Schädigung zur Ermüdungsbeanspruchung des Tragwerks bei und bestimmen damit die Ermüdungslebensdauer. Eine Aktuierung hätte daher kaum Auswirkung bzw. verstärkt die gezeigte Ermüdungsproblematik und erfüllt sonst keinen Zweck, da Randbedingungen wie Verformungsgrenzwerte bereits im passiven Zustand eingehalten sind.

5.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Vorgabe einer einzuhaltenden Maximalspannung von 310 N/mm^2 sei in diesem Anwendungsbeispiel als Grenzzustand der Tragfähigkeit definiert, wonach für den kritischen Lastfall bei einer Grenzwertüberschreitung ein Versagen der Tragstruktur wahrscheinlich ist. Unter dieser Randbedingung eignen sich, wie in Tabelle 5.5 beschrieben, lediglich die Varianten Aktiv 16 und Aktiv 24 mit jeweils 14,2 t Tragwerksmasse.

Nachdem eine Aktivierung der Tragstruktur für den festigkeitsdominierten Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt, bestehen neben den Zuverlässigkeitsanforderungen Anforderungen an die funktionale Sicherheit. Diese bestimmen die Systemarchitektur und die Anforderungen an die Komponenten. Zunächst ist wie im vorhergehenden Beispiel für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine Ausfallanalyse durchzuführen. Tabelle 5.7 zeigt die Wahrheitstabelle für die Ausfälle der Aktorelemente der beiden Varianten Aktiv 16 und Aktiv 24.

Tabelle 5.7: Wahrheitstabelle für Ausfälle der Aktoren im GZS der Tragfähigkeit

	Aktive Aktorelemente (Element-Nr. siehe Bild 5.5)												Krit. Last	System	Spannung in N/mm ²
	Modul 1				Modul 2				Modul 3						
	5	10	11	12	17	22	23	24	29	34	35	36			
Aktiv 16	1	1	1	0	1	1	1	1		Ja	0	313,7			
	1	1	1	1	1	1	1	0		Ja	0	310,2			
	0	1	0	1	1	1	1	1		Ja	0	312,8			
	1	0	0	1	1	1	1	1		Ja	0	310,3			
	1	0	1	1	1	1	0	1		Ja	0	311,8			
	1	1	0	1	1	1	0	1		Ja	0	312,3			
Aktiv 24	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Ja	0	313,2
	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Ja	0	322,5
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	Ja	0	310,3
	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Ja	0	314,2
	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	Ja	0	311,5
Ausfälle \geq drei Aktoren												Ja	0	\geq 310	
(Inaktiv, da druckbeansprucht: 6, 7, 8, 9, 18, 19, 20, 21, 30, 31, 32, 33)															
0: Ausfall				1: Intakt											

Für die Variante Aktiv 16 führt ein Ausfall eines Aktors bereits zum Systemausfall, womit keine Fehlertoleranz besteht. Variante Aktiv 24 weist dagegen eine Fehlertoleranz von eins auf, da mindestens zwei Aktoren ausfallen müssen, dass der vorgegebene Spannungsgrenzwert überschritten wird. Unter der Annahme einer Bewertung als Sicherheitselement des Typs B, ohne genaue Kenntnis der Ausfalldaten, ist bei Fehlertoleranz von null ein Anteil sicherer Fehler von $SFF \geq 99\%$ erforderlich [125]. Dies kann für die Aktor-/Ventilbaugruppe mit den nachfolgend eingesetzten Komponenten nicht erzielt werden. Für das verwendete 2/3-Wege-Ventil des Typs A [173] liegen detaillierte Ausfalldaten vor, der Anteil sicherer Fehler reicht dennoch nur für eine Bewertung mit SIL 2. Die Baugruppe aus Aktor und Ventil erreicht einkanalig aus diesem Grund daher maximal SIL 2. Nach dem in Bild 4.9 gezeigten Risikograph ist jedoch ein SIL 3-System erforderlich. Variante Aktiv 24 weist eine Hardwarefehler-toleranz von eins auf und muss nach Tabelle 2.1 nur einem Anteil sicherer Ausfälle von $90\% < 99\%$ genügen. Für eine Versorgung mit Hydraulikdruck, ist die Hydraulikpumpe in das Teilsystem aufzunehmen. Weitere Teilsysteme die einer Bewertung unterzogen werden müssen sind die Energieversorgung, die Sensorik sowie die Logik. Die zugrunde liegende Hardwarearchitektur, die für eine Absicherung des Grenz-zustands der Tragfähigkeit aufgestellt wurde, zeigt Bild 5.19.

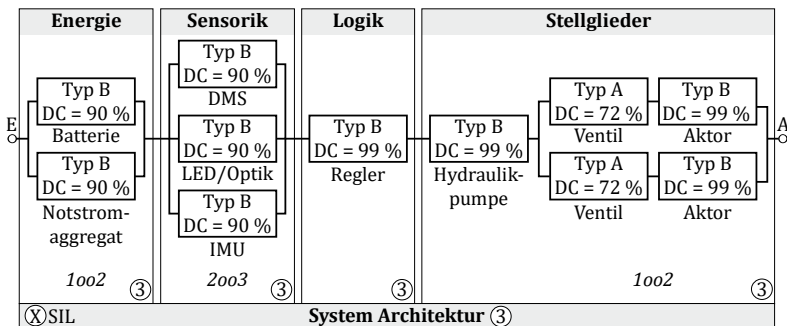


Bild 5.19: Hardwarearchitektur der nach SIL 3 entworfenen Sicherheitsfunktion des adaptiven Hochhaus-Demonstrators mit redundanter Aktorik

Bei adaptiven Tragwerken lässt sich aufgrund der Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate durch Überwachung des Betriebs nur eine niedrige Diagnosedeckung erreichen, da sich das adaptive Tragwerk zumeist lediglich in Betriebsbereitschaft befindet. Mittels Mehrheitsentscheidern ist durch redundante Signale, wie bspw. im Fall der Sensoren, eine bessere Diagnosedeckung realisierbar. Die Diagnose von Energiespeichern ist komplex, weshalb hier ein mittlerer Diagnosedeckungsgrad angenommen wurde und im Fehlerfall eine zweite Energieversorgung als Notstromaggregat aus Gründen der Diversität zur Verfügung steht. Für die Aktoren sind Testmuster vorgesehen, die durch definierte Testsignale anhand der Reaktion Aussagen über den Zustand des Aktors erlauben und somit eine hohe Diagnosedeckung erzielen. In Verbindung mit den Ventilen ergibt sich ein mittlerer Diagnosedeckungsgrad.

Der Sicherheitsanalyse liegen die in Tabelle 5.8 aufgeführten Ausfalldaten der Subsysteme Energieversorgung, Sensorik, Logik und Stellglieder zugrunde. Für die Subsysteme wurde entsprechend der Architektur eine Ausfallrate λ_A aus den angegebenen Quellen bestimmt. Die Komponenten wurden wo keine genaueren Daten vorlagen als Typ B-Komponenten mit einer Aufteilung in 50 % sichere und 50 % unsichere Fehler angenommen. Über den Diagnosedeckungsgrad DC ergibt sich der Anteil sicherer Fehler SFF , der den Anforderungen nach Tabelle 2.1 entsprechend der Hardwarefehlertoleranz (HFT) für SIL 3 genügen muss. Für die Auswertung wurde eine mittlere Reparaturdauer von $MRT = 20$ h und ein Wiederholungsprüfungsintervall T_I von einem Jahr festgelegt. Die Ausfälle gemeinsamer Ursache wurden nach EN 61508-2 [125] durch Ermittlung des $\beta_A/\beta_{A,D}$ -Faktors abgeschätzt. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bei Anforderung PF_D ergibt sich je nach Architektur des Subsystems entsprechend der Gleichungen (2.13) und (2.15) bzw. nach EN 61508-6 [126].

Tabelle 5.8: Ausfall- und Diagnosedaten der Subsysteme des adaptiven Tragwerks

	Energieversorgung		Sensorik		
λ in 1/h	Batterie	Notstrom- aggregat	DMS	LED-Optik	IMU
Quelle	[166]	[174]	[166]	[168]	[167]
λ_A	$1,63 \times 10^{-6}$			$1,324 \times 10^{-5}$	
$\lambda_{A,S}$	$8,15 \times 10^{-7}$			$6,619 \times 10^{-6}$	
$\lambda_{A,D}$	$8,15 \times 10^{-7}$			$6,619 \times 10^{-6}$	
DC	90 %			90 %	
$\lambda_{A,DD}$	$7,335 \times 10^{-7}$			$6,553 \times 10^{-6}$	
$\lambda_{A,DU}$	$8,15 \times 10^{-8}$			$6,619 \times 10^{-8}$	
t_{CE}	482 h			51,8 h	
HFT	1oo2 = 1			2oo3 = 1	
t_{GE}	336 h			37,2 h	
$\beta_A/\beta_{A,D}$	5 % / 2 %			2,5 % / 2 %	
SFF	95 %			95 %	
PFD	$3,604 \times 10^{-4}$			$1,112 \times 10^{-4}$	
	Logik		Stellglieder		
λ in 1/h	Regler		Hydraulik- pumpe	3/2-Wege- Ventil	Hydraulik- aktor
Quelle	[169], [170]		[166]	[173]	[166]
λ_A	$2,41 \times 10^{-9}$		$1,47 \times 10^{-5}$	$2,69 \times 10^{-7}$	
$\lambda_{A,S}$	$1,205 \times 10^{-9}$		$7,35 \times 10^{-6}$	$1,25 \times 10^{-7}$	
$\lambda_{A,D}$	$1,205 \times 10^{-9}$		$7,35 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-7}$	
DC	99 %		99 %	90 %	
$\lambda_{A,DD}$	$1,193 \times 10^{-9}$		$7,277 \times 10^{-6}$	$1,125 \times 10^{-7}$	
$\lambda_{A,DU}$	$1,205 \times 10^{-11}$		$7,35 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^{-8}$	
t_{CE}	51,8 h		51,8 h	387,15 h	
HFT	keine		keine	1oo2 = 1	
t_{GE}	-		-	300 h	
$\beta_A/\beta_{A,D}$	-		-	5 % / 5 %	
SFF	99,5 %		99,5 %	95 %	
PFD	$7,688 \times 10^{-8}$		$4,689 \times 10^{-4}$	$5,933 \times 10^{-5}$	

Für die vorliegende Systemarchitektur mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung von $MTTR = 20$ h beträgt die mittlere Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bei Anforderung $PFD_{Sys} = 9,999 \times 10^{-4}$. Dieser Wert genügt der Systemanforderung für SIL 3 mit den Grenzwerten $\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$. Dies setzt voraus, dass für die Hydraulikpumpe ein Diagnosedeckungsgrad von 99 % erreicht wird und damit eine $SFF > 99$ % vorliegt, was in diesem Fall angenommen wurde. Für eine vollelektrische Umsetzung kann auf die Hydraulikpumpe und Ventile verzichtet werden. Bei einer Ausfallrate $\lambda_{A,el.Aktor} = 1,0675 \times 10^{-8}$ 1/h [166] und einer Aufteilung sicherer und unsicherer Fehler von 50/50 ergibt sich für $DC = 90$ % des Stellglied-Subsystems eine Systemausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung von $PFD_{Sys,el} = 9,095 \times 10^{-4}$. Hierfür kann das Wiederholungsprüfungsintervall $T_{I,el}$ bei gleicher mittlerer Reparaturdauer und Dauer bis zur Wiederherstellung auf 2,5 Jahre ausgedehnt werden.

5.5 Nachhaltigkeitsbilanz des Hochhaus-Demonstrators

Für die Bilanz der Umweltwirkung wurde der Ersatzteilbedarf der Aktoren über alle Simulationsdurchläufe ausgewertet und konservativ der maximal erforderliche Bedarf angenommen. Weiter wurden Aufwendungen für die wesentlichen Komponenten des adaptiven Hochhaus-Demonstrators berücksichtigt. Da sich die Komponenten den überwiegenden Anteil der Nutzungsdauer lediglich in Betriebsbereitschaft befinden, sind kaum Verschleißerscheinungen zu erwarten. Eine Alterung durch Umwelteinwirkung erfordert dennoch Wartung und Austausch. Tabelle 5.9 zeigt den der Umweltbilanz zugrunde liegenden Bedarf der vorgestellten Varianten.

Tabelle 5.9: Der Umweltbilanz zugrunde liegende Verbrauchsdaten

Varianten	Aktiv 8 M1	Aktiv 8 M2	Aktiv 16	Aktiv 24		
Grenzzustand	GT	GT	GT	TF	GT	TF
Tragwerksmasse in t	24,7	24,7	22,4	14,2	22,4	14,2
Batteriekapazität in kWh	120	120	120	120	120	120
Jährliche Aktuierungsenergie für Orkan in kWh	189*	272*	149*	222*	119*	198*
Aktor Ersatzteilbedarf	10 Jahre	5*	5*	6*	8*	8*
	30 Jahre	12*	12*	17*	17*	20*
	50 Jahre	19*	19*	27*	27*	33*
Hydrauliköl in l	500	500	1.000	1.000	1.500	1.500
*Daten aus der Simulation	GT: Gebrauchstauglichkeit		TF: Tragfähigkeit			

In Ermangelung aussagekräftiger Daten bzw. aufgrund eines hohen Recyclingpotentials sind in der Betrachtung des GWP Sensor- und Hydraulikleitungen sowie Regelungselektronik vernachlässigt.

5.5.1 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Als Versuchsplattform ist der Hochhaus-Demonstrator auf eine begrenzte Nutzungsdauer ausgelegt. Für einen Bezugszeitraum von 10 Jahren stellt sich die in Bild 5.20 dargestellte Aufteilung des GWPs für die untersuchten Varianten ein.

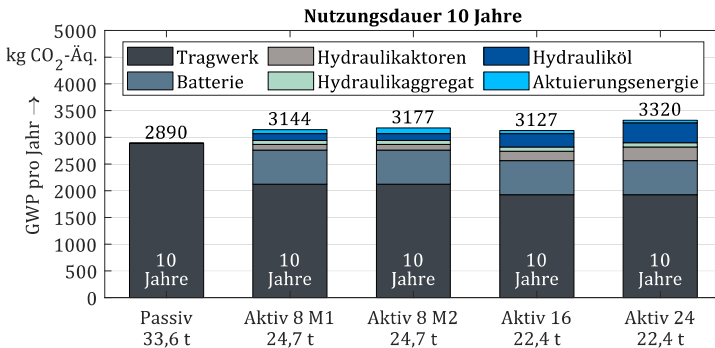


Bild 5.20: Umweltbilanz der aktiven Varianten gegenüber der passiven Variante bei einer festen Nutzungsdauer von 10 Jahren

Die aktiven Varianten kompensieren die Masseneinsparung mit der notwendigen Peripherie zur Aktivierung der Tragstruktur und führen in diesem Fall zu einer Verschlechterung der Umweltwirkung. Insbesondere die erforderliche Batterie zur Notstromversorgung trägt einen beachtlichen Anteil hierzu bei. Die nutzungsdauerabhängigen Größen wie Energie- und Ersatzteilbedarf fallen gegenüber den grundlegenden Aufwendungen wie denen für die Tragstruktur kaum ins Gewicht. In diesem Szenario ist der Einsatz adaptiver Tragwerke gegenüber einer passiven Ausführung nicht nachhaltig, da für die passive Variante weniger kg-CO₂-Äquivalent pro Jahr anfällt.

Durch Aktivierung des Tragwerks ist ein geringeres Eigengewicht erzielbar sowie eine daraus resultierende Veränderung der Schwingbelastung. Zudem ergibt sich durch die Aktivierung eine lokale Versteifung und Spannungsumlagerung, weshalb weniger beanspruchte Bereiche stärker belastet werden. Insgesamt resultiert dies in einer geringeren Ermüdungsbeanspruchung, die in der Nutzungsdauer berücksichtigt

werden kann. Wird die Ermüdungslebensdauer in die Betrachtung einbezogen, ergibt sich die Umweltbilanz der Varianten mit längerer Nutzungsdauer nach Bild 5.21.

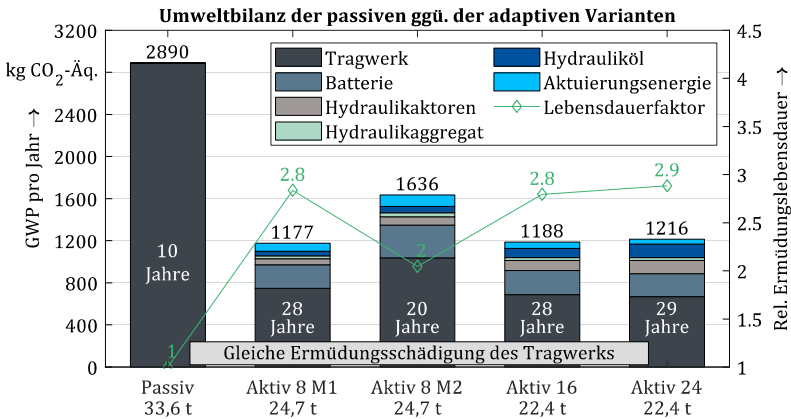


Bild 5.21: Umweltbilanz der aktiven Varianten gegenüber der passiven Variante mit Berücksichtigung des Lebensdauerfaktors in der Nutzungsdauer

Die Aufwendungen für Ersatzteile und Energie zur Aktivierung der Tragstruktur wurden für die längere Nutzungsdauer angenommen. Der Anteil der Aktivierung der Tragstruktur an der Verlängerung der Ermüdungslebensdauer ist aus Bild 5.11 ersichtlich, da hier der Bezug der aktiven Varianten zum passiven Pendant gleicher Masse aufgetragen ist. Im vorliegenden Fall ist der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebliches Kriterium. Anzumerken ist, dass eine Aktivierung lediglich für die kritische Last - in diesem Fall Orkan - erfolgt. Für das passive Tragwerk liegt die ermüdungskritischste Kerbstelle im Fußpunkt des Hochhaus-Demonstrators. Durch die geringere Masse und aktive Versteifung zur Schwingungsdämpfung verlagert sich diese in höher liegende Tragwerksteile. In diesem Szenario ist durch die erweiterte Nutzungsdauer ein deutliches Einsparpotential an kg CO₂-Äquivalent pro Jahr durch die aktiven Varianten gegeben. Die größere Anzahl an Aktoren und Menge an Hydrauliköl führen zu einer schlechteren Umweltwirkung der Varianten Aktiv 16 und Aktiv 24. Die effektivste Reduzierung des GWP ist durch Variante Aktiv 8 M1 mit einer Verringerung um 59 % gegeben. Die ungünstigste Variante Aktiv 8 M2 kommt auf eine Verringerung von 43 %. Der Einfluss der Aktorplatzierung auf das GWP lässt sich durch Vergleich der Varianten Aktiv 8 M1 und M2 erkennen. Die Sensitivität gegenüber der Nutzungsdauer zeigt Bild 5.22. Mit steigender Nutzungsdauer ist eine bessere Bilanz der eingesetzten Materialien und Komponenten erzielbar. Zusätzliche Aufwendungen für Ersatzteile sind berücksichtigt. Die beiden Varianten Aktiv 16 und

Aktiv 24 holen bei der dargestellten Nutzungsdauer von maximal 50 Jahren gegenüber der Variante Aktiv 8 M1 auf. Für die Verbindungsleitungen und Wartungsmaßnahmen ist eine Platzierung der Aktoren im untersten Modul dennoch am optimalsten.

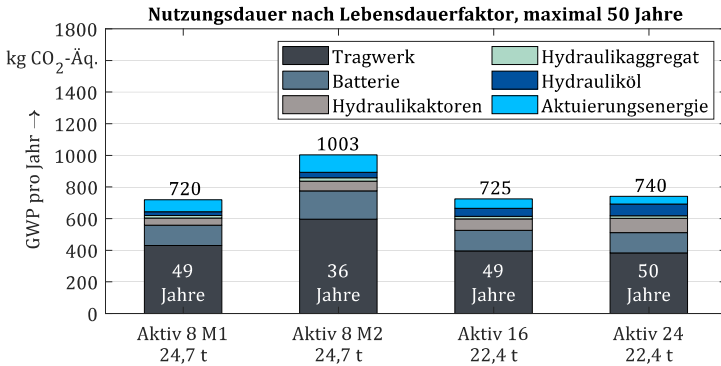


Bild 5.22: Umweltbilanz der aktiven Varianten bei einer maximalen Nutzungsdauer von 50 Jahren

Aufgrund des Bezugs auf die Nutzungsdauer ist für die Umweltwirkung eine vertretbare, möglichst lange Nutzungsdauer vorteilhaft. Dies verdeutlicht das Potential einer akkuraten Lebensdauerbestimmung, sowohl für das Tragwerk, als auch für seine Komponenten. Für eine rein elektrische Umsetzung kann das GWP der aktiven Varianten um den Anteil des Hydrauliköls und Hydraulikaggregats weiter verringert werden. Durch Verringerung der funktionsrelevanten Komponenten steigt zudem die Zuverlässigkeit des Systems. Wie zuvor in der Sicherheitsanalyse gezeigt, kann rein elektrisch zudem ein längeres Wiederholungsprüfungsintervall bzw. eine höhere Sicherheit erreicht werden. Durch die Energiewende und dem damit verbundenen Umstieg auf erneuerbare Energiequellen kann zukünftig mit einer weiteren Verringerung des energiebedingten Anteils am GWP der aktiven Varianten gerechnet werden, die in den vorliegenden Analysen nicht berücksichtigt wurde. Unter diesen Gegebenheiten ist die Umsetzung von Variante Aktiv 8 M1 zu empfehlen.

5.5.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist für die Aktivierung ein zusätzliches Notstromaggregat notwendig. Zudem ist durch die drastische Verringerung der Querschnitte keine Verlängerung der Ermüdungslebensdauer der aktiven Varianten

gegenüber den passiven gegeben. Für eine feste Nutzungsdauer von 10 Jahren ergibt sich für den adaptiven Hochhaus-Demonstrator die in Bild 5.23 gezeigte Aufteilung. Dargestellt ist die normative Auslegung nach Eurocode sowie eine theoretische passive Variante ohne Sicherheiten und die beiden aktiven Varianten.

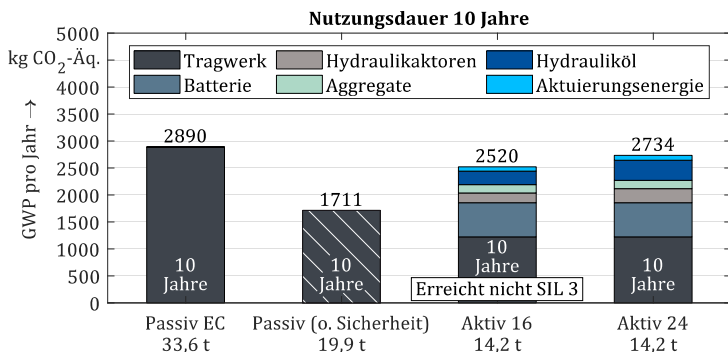


Bild 5.23: Umweltbilanz der aktiven Varianten gegenüber einer passiven Variante nach Eurocode sowie ohne Sicherheiten bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren

Die Variante Aktiv 16 schneidet von beiden aktiven Varianten besser ab, ist aber aufgrund der mangelnden Fehlertoleranz der Aktorik nicht für die funktional sichere Anwendung nach SIL 3 geeignet. Die Auslegung nach Eurocode führt zu einem etwas höheren Treibhauspotential gegenüber den aktiven Varianten. Eine fiktive, auf ein Minimum an Masse reduzierte Variante ohne Sicherheit führt zu einer deutlich reduzierten Umweltwirkung, ist jedoch nach Vorgaben des Eurocode so nicht realisierbar. In der Anwendung aktiver Systeme zur Unterstützung der Tragfähigkeit des Hochhaus-Demonstrators ist das Einsparpotential wesentlich geringer, während Elektronik sowie Kabel und Leitungen noch nicht berücksichtigt sind. Die sicherheitsgerechte Ausführung des Systems ist aufwendiger und bedarf zudem neben den vorgestellten Anforderungen an die Hardware einer Vielzahl weiterer Methoden und Prozesse zur Absicherung, um Normenkonformität nach EN 61508 zu erreichen. Im Betrieb sind schließlich regelmäßige Wiederholungsprüfungen und Wartungen innerhalb strenger Zeitfenster durchzuführen. Dies spiegelt sich nicht im GWP wieder, führt jedoch zu weiterem Aufwand. Generell lässt sich das System aber so absichern, dass ein gefahrbringender Ausfall nach aktuellen Richtlinien mit ausreichender Wahrscheinlichkeit vermieden wird.

Für die Adaption von statischen Lasten besteht weiter die Möglichkeit der Platzierung der Aktoren in den Tragwerksstützen. Die Aktuierung ist hierbei sowohl für Druck, als

auch für Zugkräfte möglich. Damit lässt sich eine einfache Fehlertoleranz realisieren. In diesem Fall ist zu beurteilen, inwieweit die Aktuierung einer dauerhaften Anforderung z. B. aufgrund einer permanent auszugleichenden, statischen Last wie dem Eigengewicht unterliegt. Hierfür sieht die EN 61508-1 [121] einen Ausfallgrenzwert pro Stunde und strengere methodische Vorgaben vor, um einen Ausfall der Adaptionfunktion abzusichern.

5.6 Bewertung der interdisziplinären Auslegungsmethode

Die vorgestellte Auslegungsmethode ermöglicht die Untersuchung des dynamischen Verhaltens adaptiver Tragwerke und deren Auslegung im Kontext Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit. Aufbauend auf den in Abschnitt 3.3.5 abgeleiteten Anforderungen erfolgt eine Bewertung, womit die dritte Forschungshypothese, welche die Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke mittels der vorgestellten Methode beinhaltet, belegt wird.

Für die Bemessung der Tragstruktur sind die nach Eurocode definierten Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit ausschlaggebend. Die Analyse hierfür erfolgt mittels eigens für den Standort des adaptiven Tragwerks ermittelten Lastkollektiven und umfasst gegenüber dem Eurocode ein Wind-Zeit-Profil zur Bewertung dynamischer Einflüsse. Dieses ermöglicht die Lebensdaueranalyse und Abschätzung der operativen Energie sowie eine festigkeits- und ermüdungsgerechte Bemessung unter Einbezug der Regeldynamik. Die Zuverlässigkeitsanforderungen leiten sich für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit aus den Anforderungen des Eurocodes ab. Für die Ausführung der Adaptionfunktion als Sicherheitsfunktion ist die Häufigkeit der Funktionsanforderung maßgeblich. Daher sind hier die Vorgaben der Sicherheitsnorm EN 61508 für funktionale Sicherheit als Grenzwert für einen gefahrbringenden Ausfall und nicht die Vorgabe einer Versagenswahrscheinlichkeit nach Eurocode maßgebend. Eine differenzierte Analyse von Zuverlässigkeit und Sicherheit ergibt sich aus der Notwendigkeit, diese Anforderungen für adaptive Tragwerke zu berücksichtigen. Der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsnachweis wird durch die simulative Untersuchung von Fehlerfällen im Adaptionsprozess unterstützt.

Der Einfluss unterschiedlicher Aktorkonfigurationen auf die Zuverlässigkeit adaptiver Tragwerke lässt sich mit Hilfe der Methode auswerten und vergleichen. Bestehende Anforderungen an Lastrichtung und -homogenität schränken die Möglichkeiten der Platzierung ein. Durch Modellieren der Adaptionfunktion mittels dyna-

mischer Petrinetze und Verknüpfung mit einer Monte-Carlo-Simulation ist die Erfassung von Reparatur, Wartung und Ersatzteilbedarf möglich. Als Bewertungs- und Vergleichskriterium dient die Umweltwirkung, die den Ersatzteilbedarf sowie Material- und Energieanteil adaptiver Tragwerke erfasst und bewertet. Die Nachhaltigkeit in Form einer verringerten Umweltwirkung wird durch eine gesteigerte Nutzungsdauer, die wiederum von der Lebensdauer des adaptiven Tragwerks abhängt, beeinflusst. Die abschließende Bewertung der Varianten des adaptiven Tragwerks erfolgt gegenüber dem passiven Pendant mittels des Treibhauspotentials (GWP) als anerkannte Vergleichsgröße.

Die Methode greift bestehende Vorgehensweisen und Grenzwerte der beteiligten Domänen Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Regelungstechnik und Ökobilanz auf und ermöglicht damit ein interdisziplinäres Arbeiten auf Basis bekannter Methoden und Modelle. Die entwickelte Methode ist dabei insofern flexibel und erweiterbar, als dass z. B. die Koppelung der Lebensdauerberechnung der Aktoren an die dynamische Lastkollektivsimulation bei vorhandenen Belastbarkeitsmodellen ohne weiteres möglich ist. Die Methode umfasst mit dem Nachweis der Zuverlässigkeit und durch das Einbinden der EN 61508 auch den Sicherheitsnachweis sowie den Ermüdungslebensdauervergleich mit abschließender Bewertung der Umweltwirkung und damit einen vollständigen Auslegungsprozess mit Bewertung des Potentials einer Aktivierung der Tragstruktur. Durch Ableiten und Verknüpfen der Vorgehensweisen aus aktuellen, anerkannten Normen der Disziplinen ist die Aktualität und Verbindlichkeit der entwickelten Methode gegeben. Ein konsistenter und verständlich aufgebauter Ablauf ermöglicht ein zielorientiertes Vorgehen unter den gewählten Randbedingungen mit eindeutigem Ergebnis. Die Anwendung der Methode wurde im Anwendungsbeispiel gezeigt. Die Umsetzung erfolgte an einem dreidimensionalen Modell, das für einen Simulationsdurchlauf wenige Minuten Rechenzeit benötigt und damit Praxistauglichkeit aufweist. Die Skalierbarkeit auf größere Bauwerke ist aus diesem Grund ebenfalls gegeben, wobei eine zweidimensionale Umsetzung als weitere Vereinfachung denkbar ist. Daneben sind durch die Verwendung der geläufigen Bewegungsgleichung Ansätze der Modellreduktion, die z. B. in [136] untersucht wurden umsetzbar und die Methode bleibt skalierbar.

Die Notwendigkeit der Methode leitet sich aus dem bisher nicht umfänglich erfassten Zielkonflikt der Auslegung adaptiver Tragwerke und der mangelnden Bewertung von Zuverlässigkeit und Sicherheit der adaptiven Komponenten nach herkömmlichen Vorgehensweisen ab. Wie gezeigt wurde, sind diese Zusammenhänge in der Methode verknüpft, womit schließlich die dritte Forschungshypothese der in Abschnitt 3.1 aus der Forschungsfrage formulierten Hypothesen mit dieser Arbeit belegt ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Adaptive Tragwerke sind eine vielversprechende Möglichkeit, den Verbrauch von Baumaterialien und die durch ihre Herstellung verursachte Umweltbelastung zu reduzieren. Bisher beinhaltet die konventionelle Entwurfspraxis von Tragwerken nach Eurocode, dass die Festigkeit und das Verformungsvermögen der Struktur für die ungünstigsten, sehr selten auftretenden Lastfälle, den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragfähigkeit, bemessen werden. In der Regel ist die zu ertragende Last viel geringer als die Bemessungslast, weshalb diese Strukturen für den größten Teil ihrer Nutzungsphase überdimensioniert sind. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Hochhaus-Tragwerken kommt zudem der exponentiell mit der Höhe zunehmend erforderliche Materialanteil für eine ausreichende Steifigkeit hinzu.

Adaptive Tragwerke ermöglichen die aktive Manipulation der inneren Kräfte, um dadurch eine Spannungshomogenisierung bzw. Dämpfung äußerer Einwirkungen wie Wind- oder Erdbebenlasten zu erreichen. Die Eurocode-Normenreihe beschreibt die Auslegung herkömmlicher Tragwerke, bei denen die zur Kräfte-manipulation integrierten mechatronischen Komponenten adaptiver Tragwerke wie Aktorik, Regelung und Sensorik nicht vorgesehen sind. Bestehende Untersuchungen zur Auslegung adaptiver Tragwerke beschränken sich wie der Eurocode bisher vornehmlich auf statische Analysen sowie darüber hinaus mit der generellen Regelbarkeit. Eine zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Auslegung adaptiver Tragwerke, insbesondere im Kontext der Nachhaltigkeit, wurde bisher vernachlässigt. Durch die enge Verknüpfung der Auslegung von Adaption und Tragwerk ist, wie bereits in Vorarbeiten erkannt, ein interdisziplinärer Auslegungsprozess erforderlich. Mit diesem Ziel entstand diese Arbeit in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich 1244 (SFB 1244) an der Universität Stuttgart. Kernpunkt war die Entwicklung einer Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke zur Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit.

In Abgrenzung zu den vorhergehenden, statischen Analysen berücksichtigt die in dieser Arbeit ausgearbeiteten Methode die aktive Kompensation von Windlasten in einer dynamischen Untersuchung. Lastvorgaben des Eurocode beinhalten keine Last-Zeit-Verläufe, weshalb ein auf örtlichen Windlasten basierendes Lastkollektiv zur Lebensdaueranalyse der Tragstruktur und Ermittlung des Energiebedarfs der Aktuierung erstellt wurde. Die Störgrößensimulation beruht auf einem linear-elastischen Modell auf

Basis der Bewegungsgleichung mit einer vorhergehenden Modalanalyse zur Parametrierung. Die Anzahl und Platzierung der Aktoren kann variiert werden und ist durch Vorgaben des Eurocode wie eine unabhängige Lastrichtung eingeschränkt. Die Auswertung der Simulation liefert die Ermüdungsfestigkeit und Betriebsenergie des adaptiven Tragwerks. Darüber hinaus erfolgt die Simulation von Fehlerfällen zur Ausfallanalyse der Adaptionfunktion als Grundlage für die Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalysen.

Der Eurocode unterscheidet die Auslegung in Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragfähigkeit und definiert hierfür unterschiedliche Zuverlässigkeitsniveaus. Die durch Überdimensionierung erreichte zuverlässige Auslegung garantiert ein hinreichendes Sicherheitsniveau der Tragstruktur. Die mit adaptiven Tragwerken einhergehenden mechatronischen Komponenten können auf diese Weise nicht abgesichert werden. Die Methode sieht daher je nach Grenzzustand eine differenzierte Auslegung adaptiver Tragwerke unter Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden des Maschinenbaus bzw. Einbezug der Sicherheitsnorm EN 61508 für funktionale Sicherheit vor. Daraus bestimmt sich die Systemarchitektur für die Adaptionfunktion und der erforderliche Ersatzteilbedarf. Schlussendlich ergibt sich die Umweltwirkung des adaptiven Tragwerks aus den Einflussgrößen Materialbedarf, Energiebedarf, Ersatzteilbedarf und Nutzungsdauer. Neben dem Vergleich der aktiven Varianten unterschiedlicher Aktoranzahl und Masse wird gegenüber der passiven Ausführung des Tragwerks die Rentabilität auf Grundlage des Einsparpotentials an Treibhausgasen ermittelt. Schließlich sind Maßnahmen wie Fail-Safe erläutert und deren Anwendung auf adaptive Tragwerke kritisch diskutiert.

Das Anwendungsbeispiel des Hochhaus-Demonstrators des SFB 1244 verdeutlicht den Zusammenhang von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke und dient als Nachweis der Anwendbarkeit der vorgestellten interdisziplinären Methode. Die Aktuierung kritischer Lasten führt hierbei aufgrund der lokalen Versteifung und Gewichtseinsparung zu einer verlängerten Ermüdungslebensdauer. Dies ermöglicht eine Steigerung der Nutzungsdauer und dadurch eine Verbesserung der Umweltwirkung. Die Anzahl der Aktoren beeinflusst den erzielbaren Lebensdauererfolg unwesentlich. Größeren Einfluss hat die Platzierung der Aktoren innerhalb der Tragstruktur und die Dauer der Aktuierung. Die zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Auslegung ist abhängig von den Grenzzuständen. Für die Gebrauchstauglichkeit orientiert sich diese an den Vorgaben des Eurocode, während für die Tragfähigkeit eine Analyse der funktionalen Sicherheit unter Berücksichtigung der Norm EN 61508 Anwendung findet.

Eine drastische Verringerung der Umweltwirkung hat sich in diesem Beispiel für die Auslegung der Adaption auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergeben. Das Einsparpotential an Treibhausgasen beträgt dabei bis zu 59 %, wobei sich durch Nutzung erneuerbarer Energiequellen eine weitere Reduktion erzielen lässt.

Als weitere Einsatzmöglichkeit adaptiver Tragwerke eignen sich Anwendungen, bei denen eine gesteigerte Funktionserfüllung durch Adaptierbarkeit sichergestellt werden kann. Dies sind Anwendungen, die bspw. eine theoretisch unendlich Steifigkeit erfordern [74]. Zudem vielversprechend ist der Einsatz zur Verlängerung der Ermüdungslebensdauer von Brücken durch eine geringe Anzahl Aktoren bei unidirektionaler Lastrichtung. Eine Kompensation des Mehrverbrauchs an Energie und Material muss gegenüber der längeren Nutzungsdauer bewertet werden. Für Hochhaus-Tragwerke liegt dieser Auslegungspunkt aufgrund der Ungewissheit der Lastrichtung nicht im Bereich einer geringeren Umweltwirkung gegenüber einer passiven Ausführung. Für diese Anwendungsfälle lässt sich mittels der vorgestellten Methode ebenfalls eine Auslegung durchführen.

Diese Arbeit zeigt das grundlegende Vorgehen zur Auslegung adaptiver Tragwerke auf, um eine den vorgegebenen Anforderungen entsprechende zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Auslegung unter Einbezug der Nachhaltigkeit zu erreichen. Der vorgestellte iterative, interdisziplinäre Auslegungsprozess wurde hierzu systematisch in Teilschritte strukturiert, um eine einfache Anwendbarkeit zu ermöglichen und eine Unterscheidung der Grenzzustände zu gewährleisten. Die Verwendung von Vorgehensweisen, Methoden und Modellen des Bauingenieurwesens, der Architektur, der Regelungstechnik sowie des Maschinenbaus binden alle Disziplinen in den Auslegungsprozess ein. Neue Ansätze oder Normen können in die Methode aufgenommen werden, wodurch die Aktualität sichergestellt ist. Eine mögliche Erweiterung durch eine vorgeschaltete Optimierung der Tragwerkstopologie führt für den speziellen Anwendungsfall auf die geeignetste Tragstruktur.

Die Absicherung adaptiver Tragwerke für die Grenzzustände bedarf einer zuverlässigen Systemarchitektur. Eine redundante, fehlertolerante Aktuierung ist wesentlicher Bestandteil hiervon. Durch die Redundanz eröffnen sich Eingriffsmöglichkeiten in die Adaption des Tragwerks. In weiterführenden Forschungsarbeiten kann unter Berücksichtigung der Vorgaben der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragfähigkeit durch Rekonfiguration der Adaption eine angepasste Aktuierung mit dem Zweck der Lebensdauerumverteilung im Tragwerk untersucht werden. Hierdurch lässt sich Einfluss auf den Verschleiß einzelner Aktoren sowie die Ermüdung des Tragwerks nehmen. Auf diese Weise ergibt sich eine Vielzahl an Optimierungsmöglichkeiten. Die Ermüdung

des Tragwerks lässt sich innerhalb der Struktur umverteilen, insbesondere wenn davon ausgegangen wird, dass die kritische Windrichtung fluktuiert. In Wartungsintervallen können mehrere Aktoren gleichzeitig gewartet werden, wenn die Verschleißerscheinungen dementsprechend gesteuert werden. Neben den Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit sowie Nachhaltigkeit ergibt sich die Möglichkeit des aktiven Zuverlässigkeitsmanagements. Dies ist wissenschaftlich bisher nicht untersucht jedoch von großem Interesse, da die Zuverlässigkeit in der Regel bereits durch die Auslegung festgelegt ist.

Ein aktives Zuverlässigkeitsmanagement adaptiver Tragwerke setzt die detaillierte Kenntnis der Restlebensdauer sowohl der Tragstruktur, als auch der Komponenten voraus. Für die Adaption an Lasten erfassen bereits zahlreiche Sensoren die Belastung des Tragwerks. In Verbindung mit stochastischen Belastbarkeitsmodellen kann hiermit eine Aussage über die Restlebensdauer z. B. mittels Prognostics and Health Management (PHM) getroffen werden. Für die Aktoren sind hierfür Lebensdauermodelle erforderlich, welche die wesentlichen Verschleißgrößen wie Hubweg und Druck aber auch Umgebungseinflüsse berücksichtigen. Anhand von Wettervorhersagen lässt sich eine Vorausrechnung der zu erwartenden Schädigung durch Umweltlasten durchführen.

Für die in der Regel zufällig auftretenden Hardwarefehler der Steuerungselektronik und Sensorik spielt die Diagnose eine wichtige Rolle. Diese Art von Fehlern muss erkannt und deren Auswirkung beherrscht werden, da sie durch ihr praktisch zufälliges Auftreten nicht anhand eines Merkmals vorhersagbar sind. Demgegenüber stehen die Verschleiß- und Alterungsfehler, deren Eintreten mittels Prädiktionsmodellen für die Lebensdauer abgeschätzt werden kann. Aus der Prädiktion ergibt sich der Zeitpunkt der vorbeugenden Wartung, die einem wahrscheinlichen Ausfall der Komponente zuvorkommt. Die sogenannte prädiktive Wartung erhöht die Verfügbarkeit der Adaptionfunktion, da Ausfallzeiten durch vorzeitige Wartung vermieden werden. Eine zu frühzeitige Wartung von Komponenten wirkt sich dagegen wiederum negativ auf die Nachhaltigkeit aus, da Lebensdauer verschenkt wird. Die Genauigkeit der Prognosemodelle muss daher ausreichend hoch sein. Eine Vermeidung von Überdimensionierung stellt ein generelles Problem in der Zuverlässigkeitstechnik dar, das durch präzise Lastannahmen und Werkstoffdaten sowie möglichst gute Schädigungsmodelle gelöst werden muss.

7 Literatur

- [1] Department of Economic and Social Affairs - Population Division, *World Population Prospects - Highlights*, New York, 2019. ISBN 978-92-1-148316-1.
- [2] United Nations Environment, *Sand and Sustainability - Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources: Synthesis for Policy Makers*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2019. ISBN 978-92-807-3751-6.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Urbanization Prospects - The 2018 Revision*. United Nations, New York, 2019. ISBN 978-92-1-148319-2.
- [4] OECD, *Material Resources, Productivity and the Environment. OECD Green Growth Studies*. OECD Publishing, Paris, 2015. ISBN 978-92-64-19050-4.
- [5] WELKE, M., et al., *Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. 1. Auflage. Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main, 2018.
- [6] SOBEK, W., *Ultraleichtbau*. In: Stahlbau 83 11, S. 784–89, 2014.
- [7] GWINNER, D., *More than a Dream - a Renewable Electricity Future*. In: NREL Continuum Magazine, S. 2–7, 2013.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1990:2010-12, *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [9] BERTSCHE, B.; LECHNER, G., *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeit*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Berlin, Heidelberg, 2004. ISBN 978-3-540-34996-9.
- [10] BECKER, N., *VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 2 - Ressourceneffizienz der Tragwerke*. 2. Auflage. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014.
- [11] BRUTTEL, O., *Nachhaltigkeit als Kriterium für Konsumententscheidungen*. In: Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift 29 1, S. 41–45, 2014.

- [12] VIEWEG, W., *Nachhaltige Marktwirtschaft - Eine Erweiterung der Sozialen Marktwirtschaft*. 2., aktualisierte Auflage. Springer Gabler, Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-22985-6.
- [13] SOBEK, W., *Bauschaffen - auch im Sinn der Nachhaltigkeit*. In: ARCH+ 184, S. 88–89, 2007.
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 15978:2012-10, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2012).
- [15] FIGL, H., et al., *ÖKOBAUDAT - Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*. Stand Januar 2017. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, 2017. ISBN 978-3-87994-288-6.
- [16] Thinkstep a Sphera company, *GaBi ts - Software-System and Database for Life-Cycle Engineering*, Echterdingen (1992-2019).
- [17] Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (DSW), *Weltbevölkerung - Hintergründe zum Bevölkerungswachstum*, Hannover, 2020. Abrufdatum 07.01.2020: URL: www.dsw.org/weltbevoelkerung/.
- [18] UN Environment and International Energy Agency, *Global Status Report 2017 - Towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector*, 2017. ISBN 978-92-807-3686-1.
- [19] OECD, *Global Material Resources Outlook to 2060 - Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD Publishing, Paris, 2019. ISBN 978-92-64-30745-2.
- [20] MUFTI, A. A.; BAKHT, B., *Fazlur Khan (1929-1982): Reflections on his Life and Works*. In: Canadian Journal of Civil Engineering 29 2, S. 238–45, 2002.
- [21] HELAL, J.; STEPHAN, A.; CRAWFORD, R., *Beyond the 'Premium-for-Height' Framework for Designing Structural Systems for Tall Buildings - Considering Embodied Environmental Flows*. In: Rajagopalan, P.; Andamon, M. M. (Hrsg.): Engaging Architectural Science: Meeting the Challenges of Higher Density. 52nd International Conference of the Architectural Science Association. Australia, 2018.

-
- [22] ALI, M. M.; MOON, K. S., *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*. In: Architectural Science Review 50 3, S. 205–23, 2007.
- [23] SOONG, T. T., *Active Structural Control: Theory and Practice*. Wiley; Longman Scientific & Technical, New York, Harlow, Essex, 1990. ISBN 0-582-01782-3.
- [24] SPENCER, B. F.; NAGARAJAIAH, S., *State of the Art of Structural Control*. In: Journal of Structural Engineering 129 7, S. 845–56, 2003.
- [25] CONNOR, J. J., *Introduction to Structural Motion Control*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003. ISBN 978-0130091383.
- [26] KORKMAZ, S., *A Review of Active Structural Control: Challenges for Engineering Informatics*. In: Computers & Structures 89 23-24, S. 2113–32, 2011.
- [27] BEL HADJ ALI, N.; SMITH, I.F.C., *Dynamic Behavior and Vibration Control of a Tensegrity Structure*. In: International Journal of Solids and Structures 47 9, S. 1285–96, 2010.
- [28] MOORED, K. W.; BART-SMITH, H., *Investigation of Clustered Actuation in Tensegrity Structures*. In: International Journal of Solids and Structures 46 17, S. 3272–81, 2009.
- [29] WROLDSEN, A. S.; OLIVEIRA, M. C. de; SKELTON, R. E., *Modelling and Control of Non-Minimal Non-Linear Realisations of Tensegrity Systems*. In: International Journal of Control 82 3, S. 389–407, 2009.
- [30] ADAM, B.; SMITH, I. F., *Tensegrity Active Control: Multiobjective Approach*. In: Journal of Computing in Civil Engineering 21 1, S. 3–10, 2007.
- [31] FEST, E.; SHEA, K.; SMITH, I. F. C., *Active Tensegrity Structure*. In: Journal of Structural Engineering 130 10, S. 1454–65, 2004.
- [32] SHEA, K.; FEST, E.; SMITH, I. F. C., *Developing Intelligent Tensegrity Structures with Stochastic Search*. In: Advanced Engineering Informatics 16 1, S. 21–40, 2002.
- [33] DOMER, B.; SMITH, I. F. C., *An Active Structure that Learns*. In: Journal of Computing in Civil Engineering 19 1, S. 16–24, 2005.
- [34] MOTRO, R., *Tensegrity - Structural Systems for the Future*. 1. Auflage. Biddles Ltd., London, United Kingdom, 2003. ISBN 1-903996-37-6.
- [35] REINHORN, A. M., et al., *Active Bracing System: A Full Scale Implementation of Active Control*. Technical Report NCEER-92-0020. National Center for

- Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY, 1992.
- [36] SENATORE, G.; DUFFOUR, P.; WINSLOW, P., *Synthesis of Minimum Energy Adaptive Structures*. In: Structural and Multidisciplinary Optimization 60 3, S. 849–77, 2019.
- [37] SOONG, T. T.; CIMELLARO, G. P., *Future Directions in Structural Control*. In: Structural Control and Health Monitoring 16 1, S. 7–16, 2009.
- [38] STAVROULAKIS, G. E., et al., *Robust Active Control Against Wind-Induced Structural Vibrations*. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 11, S. 895–907, 2006.
- [39] TEUFFEL, P., *From Adaptive to High-Performance Structures*. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Steel Structures, Nov. 3.-5., Seoul, Korea, 2011.
- [40] ALDEMIR, U., *A Simple Active Control Algorithm for Earthquake Excited Structures*. In: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 25 3, S. 218–25, 2010.
- [41] LI, C.; LI, J.; QU, Y., *An Optimum Design Methodology of Active Tuned Mass Damper for Asymmetric Structures*. In: Mechanical Systems and Signal Processing 24 3, S. 746–65, 2010.
- [42] LI, L.; SONG, G.; OU, J., *Nonlinear Structural Vibration Suppression Using Dynamic Neural Network Observer and Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control*. In: Journal of Vibration and Control 16 10, S. 1503–26, 2010.
- [43] MATTA, E.; STEFANO, A. de, *Robust Design of Mass-Uncertain Rolling-Pendulum TMDs for the Seismic Protection of Buildings*. In: Mechanical Systems and Signal Processing 23 1, S. 127–47, 2009.
- [44] POURZEYNALI, S.; LAVASANI, H. H.; MODARAYI, A. H., *Active Control of High Rise Building Structures using Fuzzy Logic and Genetic Algorithms*. In: Engineering Structures 29 3, S. 346–57, 2007.
- [45] RAMAMOORTHY, M.; RAJAMOHAN, V.; AK, J., *Vibration Analysis of a Partially Treated Laminated Composite Magnetorheological Fluid Sandwich Plate*. In: Journal of Vibration and Control 22 3, S. 869–95, 2016.
- [46] RAMEZANI, M.; BATHAEI, A.; GHORBANI-TANHA, A. K., *Application of Artificial Neural Networks in Optimal Tuning of Tuned Mass Dampers Implemented in High-Rise*

-
- Buildings Subjected to Wind Load*. In: Earthquake Engineering and Engineering Vibration 17 4, S. 903–15, 2018.
- [47] YANG, J. N.; AKBARPOUR, A.; GHAEMMAGHAMI, P., *New Optimal Control Algorithms for Structural Control*. In: Journal of Engineering Mechanics 113 9, S. 1369–86, 1987.
- [48] LEMAITRE, C.; SOBEK, W., *Design Principles of Adaptive Truss Structures*. In: IASS (Hrsg.): Shell and Spatial Structures: Structural Architecture. Towards the Future Looking to the Past, 2007.
- [49] NEUHÄUSER, S., *Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.
- [50] NUDEHI, S.; MUKHERJEE, R.; SHAW, S. W., *Active Vibration Control of a Flexible Beam Using a Buckling-Type End Force*. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics 128 2, S. 278–86, 2006.
- [51] DJOUADI, S., et al., *Active Control of Tensegrity Systems*. In: Journal of Aerospace Engineering 11 2, S. 37–44, 1998.
- [52] LIM, C.-W., *Active Vibration Control of the Linear Structure with an Active Mass Damper applying Robust Saturation Controller*. In: Mechatronics 18 8, S. 391–99, 2008.
- [53] WAGNER, J. L., et al., *On Steady-State Disturbance Compensability for Actuator Placement in Adaptive Structures*. In: at - Automatisierungstechnik 66 8, S. 591–603, 2018.
- [54] LIN, C.-C.; CHANG, C.-C.; WANG, J.-F., *Active Control of Irregular Buildings Considering Soil–Structure Interaction Effects*. In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 3, S. 98–109, 2010.
- [55] WANG, Y.; LYNCH, J. P.; LAW, K. H., *Decentralized Controller Design for Large-Scale Civil Structures*. In: Earthquake Engineering & Structural Dynamics 38 3, S. 377–401, 2009.
- [56] LU, L.-Y., et al., *Experiment and Analysis of a Fuzzy-Controlled Piezoelectric Seismic Isolation System*. In: Journal of Sound and Vibration 329 11, S. 1992–2014, 2010.

- [57] WANG, A.-P.; LIN, Y.-H., *Vibration Control of a Tall Building Subjected to Earthquake Excitation*. In: Journal of Sound and Vibration 299 4-5, S. 757–73, 2007.
- [58] GUO, T.; LU, Q.; LI, J., *PI Force Feedback Control for Large Flexible Structure Vibration with Active Tendons*. In: Acta Mechanica Sinica 24 6, S. 721–25, 2008.
- [59] WEICKGENANNT, M., et al., *Optimal Sensor Placement for State Estimation of a Thin Double-Curved Shell Structure*. In: Mechatronics 23 3, S. 346–54, 2013.
- [60] ISSA, J.; MUKHERJEE, R.; SHAW, S. W., *Vibration Suppression in Structures using Cable Actuators*. In: Smart Materials and Structures 132 3, S. 677, 2010.
- [61] MIAH, M. S.; KALISKE, M., *Monitoring and Control of Structures Considering Diverse Uncertainties*. In: Proceedings of SPIE 10970, Sensors and Smart Structures, S. 64, 2019.
- [62] SHARIATMADAR, H.; GOLNARGESI, S.; AKBARZADEH-T, M.-R., *Vibration Control of Buildings using ATMD against Earthquake Excitations through Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller*. In: Asian Journal of Civil Engineering 15, S. 321–38, 2014.
- [63] KOBORI, T.; SHUICHI, K., *Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System*. In: Earthquake Engineering & Structural Dynamics 22 11, S. 925–41, 1992.
- [64] MINSILI, L.S., et al., *An Active Vibration Control Method of Bridge Structures by the Linearization of Feedback Gain matrix*. In: Botswana Journal of Technology 18 1, 2010.
- [65] KORKMAZ, S.; BEL HADJ ALI, N.; SMITH, I. F.C., *Determining Control Strategies for Damage Tolerance of an Active Tensegrity Structure*. In: Engineering Structures 33 6, S. 1930–39, 2011.
- [66] YAO, J.T.P.; NATKE, H. G., *Reliability of Structures with Active Control*: IEEE International Conference on Fuzzy Systems. March 8-12, 1992, Town & Country Hotel, San Diego, California. New York, 1992.
- [67] SOBEK, W., *Entwerfen im Leichtbau*. In: Themenheft Forschung Leichtbau 03, S. 70–82, 2007.
- [68] SOBEK, W., *The Future of Sustainable Architecture - Resources, Recyclability and Ultra-Lightweight*. In: a+u 524, S. 6–13, 2014.

-
- [69] SOBEK, W., et al., *Adaptive and Lightweight*: TU/e (Hg.) 2006 – International Conference on Adaptable Building.
- [70] CHA, J. Z.; PITARRESI, J. M.; SOONG, T. T., *Optimal Design Procedures for Active Structures*. In: Journal of Structural Engineering 114 12, S. 2710–23, 1988.
- [71] TEUFFEL, P., *Entwerfen adaptiver Strukturen - Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [72] SENATORE, G.; DUFFOUR, P.; WINSLOW, P., *Energy and Cost Assessment of Adaptive Structures: Case Studies*. In: Journal of Structural Engineering 144 8, S. 1–23, 2018.
- [73] SENATORE, G.; DUFFOUR, P.; WINSLOW, P., *Exploring the Application Domain of Adaptive Structures*. In: Engineering Structures 167, S. 608–28, 2018.
- [74] SENATORE, G., et al., *Shape Control and Whole-Life Energy Assessment of an 'Infinitely Stiff' Prototype Adaptive Structure*. In: Smart Materials and Structures 27 1, S. 15022, 2018.
- [75] SENATORE, G., et al., *Designing Adaptive Structures for Whole Life Energy Savings*. In: Zingoni, A. (Hrsg.): Research and applications in structural engineering, mechanics and computation. Boca Raton, FL, 2013.
- [76] REKSOWARDOJO, A. P.; SENATORE, G.; SMITH, I. F. C., *Design of Structures that Adapt to Loads through Large Shape Changes*. In: Journal of Structural Engineering, 2019.
- [77] SOBEK, W., *Antrag auf die Einrichtung und Förderung des Sonderforschungsbereichs 1244: Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen - DFG Projekt: 279064222. Finanzierungsantrag für die Jahre 2017-2020*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [78] BECHMANN, R.; GABRIEL, S.; MRZIGOD, A., *SFB 1244 - Demonstrator, Genehmigungsplanung - Statische Berechnung, Kapitel III - Demonstrator*. Werner Sobek Stuttgart AG, Stuttgart, 2018.
- [79] SINAPIUS, J. M., *Adaptronik - Prinzipie - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen*. Springer Vieweg, Berlin, 2018. ISBN 978-3-662-55883-6.

- [80] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, VDI 2206:2004-06, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2004).
- [81] NEUMANN, D., *Adaptronics: A Concept for the Development of Adaptive and Multifunctional Structures*. In: Janocha, H. (Hrsg.): *Adaptronics and Smart Structures. Basics, Materials, Design, and Applications*. s.l., 2007.
- [82] KELLER, A.; BINZ, H., *Definition und Abgrenzung hybrider, intelligenter Konstruktionselemente*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-922823-79-7.
- [83] ISERMANN, R., *Mechatronische Systeme*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-32336-5.
- [84] PREUMONT, A., *Vibration Control of Active Structures - An Introduction*. Fourth edition. Springer International Publishing; Springer, Cham, 2018. ISBN 978-3-319-72295-5.
- [85] YAO, T. P., *Concept of Structural Control*. In: *Journal of the Structural Division* Vol. 98, Issue 7, S. 1567–74, 1972.
- [86] HOUSNER, G. W., et al., *Structural Control: Past, Present, and Future*. In: *Journal of Engineering Mechanics* 123(9), S. 897–971, 1997.
- [87] GIENGER, A., et al., *Robust Fault Diagnosis for Adaptive Structures with unknown Stochastic Disturbances*. In: *IEEE Transactions on Control Systems Theory*, 2018.
- [88] GIENGER, A., et al., *Data-based Distributed Fault Diagnosis for Adaptive Structures using Convolutional Neural Networks*. In: *Unmanned Systems* 15 Heft 1, 2020.
- [89] BÖHM, M., et al., *Homogenizability of Element Utilization in Adaptive Structures*. In: *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, S. 1263–68, 2019.
- [90] WEIDNER, S., et al., *The Implementation of Adaptive Elements into an Experimental High-Rise Building*. In: *Steel Construction* 11 2, S. 109–17, 2018.
- [91] KEIL, S., *Dehnungsmessstreifen*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2017. ISBN 978-3-658-13611-6.

-
- [92] GUERRA, F. S., et al., *Deformation Measurement of Large Buildings by Holographical Point Replication*. In: Liang, H.; Groves, R.; Targowski, P. (Hrsg.): *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII*. 24-26 June 2019, Munich, Germany. Bellingham, Washington, 2019.
- [93] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1991-1-1:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [94] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1993-1-1:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1 - Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [95] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1997-1:2014-03, *Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2014).
- [96] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1998-1:2010-12, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1 - Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [97] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), VDI 6200:2010-02, *Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [98] Woo, S., *Reliability Design of Mechanical Systems*. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [99] JÄGER, P., *Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Dissertation*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [100] MÜLLER, K.-H., *Zuverlässigkeit und Funktionseffektivität komplizierter technischer Systeme*. Akademie-Verlag, Berlin, 1986.
- [101] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [102] VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, VDI 4003:2007-03, *Zuverlässigkeitsmanagement*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2007).

- [103] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 40041:1990-12, *Zuverlässigkeit - Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1990).
- [104] Department of Defense, *Military Handbook - Reliability Prediction of Electronic Equipment. MIL-HDBK-217F*, Washington DC, 1991.
- [105] WEINRICH, U., *Methoden zur Bestimmung der Ausfallraten von elektrischen und elektronischen Systemen am Beispiel der Lenkungselektronik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-25463-6.
- [106] HAIBACH, E., *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-29363-7.
- [107] KÖHLER, M., et al., *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Springer, Berlin, 2012. ISBN 978-3-642-13163-9.
- [108] PALMGREN, A., *Die Lebensdauer von Kugellagern*. In: VDI-Z 58, S. 339–41, 1924.
- [109] MINER, M., *Cumulative Damage in Fatigue*. In: Journal of Applied Mechanics 12, S. 159–64, 1945.
- [110] WÄCHTER, M.; MÜLLER, C.; ESDERTS, A., *Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie - Kurz und bündig*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2017. ISBN 9783658174583.
- [111] ZEIDLER, E., *Springer-Handbuch der Mathematik I - Begründet von I.N. Bronstein und K.A. Semendjaew. Weitergeführt von G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler. Herausgegeben von E. Zeidler*. Springer Spektrum Wiesbaden, Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-00284-8.
- [112] BIROLINI, A., *Reliability Engineering*. Springer, Dordrecht, 2007. ISBN 978-3-540-49388-4.
- [113] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [114] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 61025:2007-08, *Fehlzustandsbaumanalyse*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2007).
- [115] POZSGAI, P., *Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme. Dissertation*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006.

-
- [116] VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, VDI 4008-6:1999-04, *Monte-Carlo-Simulation*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1999).
- [117] EBERLIN, S.; HOCK, B., *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-03572-3.
- [118] SPAETHE, G., *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*. 2., neubearbeitete Auflage. Springer Vienna, Wien, New York, 1992. ISBN 3-211-82348-4.
- [119] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-4:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 4: Begriffe und Abkürzungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [120] NOWIZKI, N., *Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2018.
- [121] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-1:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [122] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN ISO 12100:2011-03, *Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [123] NEUDÖRFER, A., *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte - Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*. 7., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg, Berlin [Germany], Heidelberg [Germany], 2016. ISBN 978-3-642-45446-2.
- [124] BÖRCSÖK, J., *Funktionale Sicherheit - Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme*. 3., überarbeitete Auflage. VDE-Verl., Berlin, 2011. ISBN 978-3-8007-3305-7.
- [125] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-2:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische/elektronische/programmierbare elektronische Systeme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [126] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-6:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/*

- programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 6: Anwendungsrichtlinie für IEC 61508-2 und IEC 61508-3*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [127] VOGEL, M., et al., *Beurteilung der Dauerhaftigkeit und Restnutzungsdauer von Betonbauteilen mittels probabilistischer Methoden*. In: Müller, H.; Nolting, U.; Haist, M. (Hrsg.). 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 2006.
- [128] NIKOLAIDIS, E.; GHIOCEL, D. M.; SINGHAL, S., *Engineering Design Reliability Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2005. ISBN 0-8493-1180-2.
- [129] PAPAIOANNOU, I., *Non-intrusive Finite Element Reliability Analysis Methods. Dissertation*. Technische Universität München, München, 2012.
- [130] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1991-1-4:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4 - Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [131] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4 - Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [132] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Daten- und Kartendienst der LUBW - Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen für Wind*, 2019. Abrufdatum 20.11.2019: URL: udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/.
- [133] HAFNER, A. (Hrsg.). 12. Internationales Branchenforum für Frauen IBF 2015, *Carbon-Foorprint von Holzbauten und Konstruktionen*, 25.06.2015, Meran, 2015.
- [134] KÖHLER, J., *Reliability of Timber Structures. Dissertation*. ETH Zürich, Zürich, 2006.
- [135] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1993-1-9:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9 - Ermüdung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [136] FRÖHLICH, B., et al., *Geometric Element Parameterization and Parametric Model Order Reduction in Finite Element Based Shape Optimization*. In: Computational Mechanics 63 5, S. 853–68, 2019.

-
- [137] GEIGER, F., et al., *Anwendung der Redundanzmatrix bei der Bewertung adaptiver Strukturen*. In: Bischoff, M.; Scheven, M. V.; Oesterle, B. (Hrsg.): *Berichte der Fachtagung Baustatik - Baupraxis 14*: 23. und 24. März 2020, Universität Stuttgart. Stuttgart, 2020.
- [138] OSTERTAG, A., et al., *System-Safety in the Application of Adaptive Load-Bearing Structures*. In: IEEE Xplore (Hrsg.): *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2019.
- [139] SOBEK, W., et al., *Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalentragwerks - Teil 1: Grundlagen und Theorie der angewandten Methoden*. In: *Stahlbau* 85 3, S. 195–99, 2016.
- [140] SOBEK, W., et al., *Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalentragwerks - Teil 2: Anwendung der Fehlerbaumanalyse sowie der Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse*. In: *Stahlbau* 85 6, S. 380–86, 2016.
- [141] OSTERTAG, A., et al., *Reliable Design of Adaptive Load-Bearing Structures with Focus on Sustainability*. In: Baraldi, P.; Di Maio, F.; Zio, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*. Singapore, 2020.
- [142] ZILCH, K., et al., *Handbuch für Bauingenieure - Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit*. 2., aktualisierte Auflage. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-14450-9.
- [143] LUNZE, J., *Regelungstechnik 2 - Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. 10., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Springer Verlag, Berlin, 2020. ISBN 978-3-662-60759-6.
- [144] OSTERTAG, A.; DAZER, M.; BERTSCHE, B., *Methode zur zuverlässigen, sicheren und nachhaltigen Auslegung adaptiver Tragwerke*. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Riedel, O.; Spath, D.; Roth, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021*. Stuttgart, 2021.
- [145] ANSYS, Inc., *ANSYS Mechanical APDL 2019 R1*. Windows x64, V19.3 (2018).
- [146] HEIDINGSFELD, M., et al., *Gramian-Based Actuator Placement with Spillover Reduction for Active Damping of Adaptive Structures*: 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 3-7 July 2017. Piscataway, NJ, 2017.

- [147] WAGNER, J.; BÖHM, M.; SAWODNY, O., *Nonlinear Modelling and Control of Tension-Only Elements in Adaptive Structures*. In: IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 2019.
- [148] ECKSTEIN, C., *Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern. Dissertation*. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [149] LUCAN, K.; BERTSCHE, B., *Standard-Lastkollektive für die Nutzfahrzeuggesteuerung*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 121 5, S. 78–83, 2019.
- [150] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2003/4/EG über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen und zur Aufhebung der Richtlinie 90/313/EWG des Rates*: Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 41, S. 26–32, 2003.
- [151] BRANLARD, E., *Generation of Time Series from a Spectrum. Report*. Technical University of Denmark, Riso, 2010.
- [152] MathWorks, *Matlab- und Simulink*. Windows x64, R2019a (2019).
- [153] SCHLOTTMANN, D.; SCHNEGAS, H., *Auslegung von Konstruktionselementen - Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinenbau*. 3. Auflage. Springer Vieweg, Berlin, 2016. ISBN 978-3-662-48806-5.
- [154] BOSKOVIC, J. D.; MEHRA, R. K., *Stable Adaptive Multiple Model-Based Control Design for Accommodation of Sensor Failures*: ACC. Proceedings of the 2002 American Control Conference : May 8-10, 2002, Hilton Anchorage and Egan Convention Center, Anchorage, Alaska, USA. Piscataway, N.J., 2002.
- [155] BOSKOVIC, J. D.; BERGSTROM, S. E.; MEHRA, R. K., *Retrofit Reconfigurable Flight Control in the Presence of Control Effector Damage*: Proceedings of the 2005 American Control Conference. ACC, June 8-June 10, 2005, Hilton Portland & Executive Tower, Portland, Oregon. Evanston, IL, Piscataway, N.J., 2005.
- [156] Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, *Naturkatastrophen in Deutschland - Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale*, München, 1999.
- [157] SCHNEIDER, J., *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure*. 2., überarbeitete Auflage. Vdf Hochschulverlag AG, Zürich, 2012. ISBN 3-7281-2167-3.
- [158] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-5:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/*

-
- programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 5: Beispiele zur Ermittlung der Stufe der Sicherheitsintegrität (Safety Integrity Level)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [159] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., EN 61508-3:2011-02, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 3: Anforderungen an Software*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2011).
- [160] MÜNZING, P., et al., *Automated ASIL Allocation and Decomposition according to ISO 26262, Using the Example of Vehicle Electrical Systems for Automated Driving*. In: SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems 11 2, S. 123–30, 2018.
- [161] MELIN, H., *Analysis of the Climate Impact of Lithium-Ion Batteries and How to Measure it*. Circular Energy Storage, 2019.
- [162] ICHA, P.; KUHS, G., *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019*. Climate Change 13/2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.
- [163] Werner Sobek Stuttgart AG, *217081 Demonstrator: Mock-Up Gesamtansicht*, Stuttgart, 2018.
- [164] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, VDI 2230-2:2014-12, *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Mehrschraubenverbindungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2014).
- [165] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, VDI 2230-1:2015-11, *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2015).
- [166] DENSON, W., et al., *Nonelectronic Parts Reliability Data*. Defense Technical Information Center, Rome, NY, 1995.
- [167] Aceinna, *OpenIMU330 - Triple Redundant 1.5°/Hr SMT IMU*, 2020. Abrufdatum 17.08.2020: URL: navview.blob.core.windows.net/web-resources/6020-1800-01%20OpenIMU330B_Rev_E.pdf?t=1593183415710.
- [168] BERGHMANS, F.; EVE, S.; HELD, M., *An Introduction to Reliability of Optical Components and Fiber Optic Sensors*. In: NATO Security through Science Series B: Physics and Biophysics 47, S. 73–100, 2007.

- [169] Bachmann electronic, *Systemübersicht*, Österreich, 11/2019. Abrufdatum 17.08.2020: URL: www.bachmann.info/issuu-pages/systemuebersicht-2020-deutsch/.
- [170] Texas Instruments, *Quality & Reliability - MTBF/FIT Estimator - TMS320F2837xD Dual-Core Microcontroller, Data Sheet*, Texas, 1995-2020. Abrufdatum 03.11.2020: URL: www.ti.com/quality/docs/estimator.tsp.
- [171] Meteomedia, *Anzahl der Sturmtiefs, die vor allem Deutschland betroffen haben, seit der Sturmtiefsaison 2006/07*, 05.12.2013. Abrufdatum 11.07.2020: URL: de.statista.com/statistik/daten/studie/150883/umfrage/sturmtiefs-in-mittleuropa-seit-der-sturmtiefsaison-2006-07/.
- [172] Institut für Maschinenelemente - Universität Stuttgart, *REALIST Programmpaket*. Windows, V2.0 (2016).
- [173] BRIEN, J., *SIL-Herstellererklärung - Funktionale Sicherheit nach IEC 61508 und IEC 61511. 3/2-Wege Vorsteuer-Magnetventil*, Ingelfingen-Criesbach, 2016.
- [174] ALBERTZ, V., et al., *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke - Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiko. Zuverlässigkeitskenngrößen und Betriebserfahrungen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1980. ISBN 3-88585-014-1.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit vom Autor betreute, unveröffentlichte studentische Arbeiten:

IDRIZI, S.: *Fail-Safe Prinzipien für ausgewählte Komponenten adaptiver Tragwerke*. (Bachelorarbeit). Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2017.

BIAN, H.: *Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse des Ausfallverhaltens von Komponenten und Strukturen adaptiver Tragwerke*. (Studienarbeit). Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2018.

PRÄSCHER, A.: *Analyse von Eurocode DIN EN 1990 und IEC 61508 zur sicherheitsgerechten Auslegung adaptiver Tragwerke*. (Studienarbeit). Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2019.

WEGGEN, M.: *Zuverlässigkeits- und Ausfallanalyse eines adaptiven Tragwerks*. (Bachelorarbeit). Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2019.

EDER, M.: *PHM in Anwendung auf die Aktorik adaptiver Tragwerke unter Einbezug von Wetterdaten*. (Studienarbeit). Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2019.

8 Anhang

A Simulationsmodell und Querschnittskalierung

Bild 8.1 zeigt die Elementnummerierung des Tragwerkmodells des Demonstrator-Hochhauses der Umsetzung in Matlab.

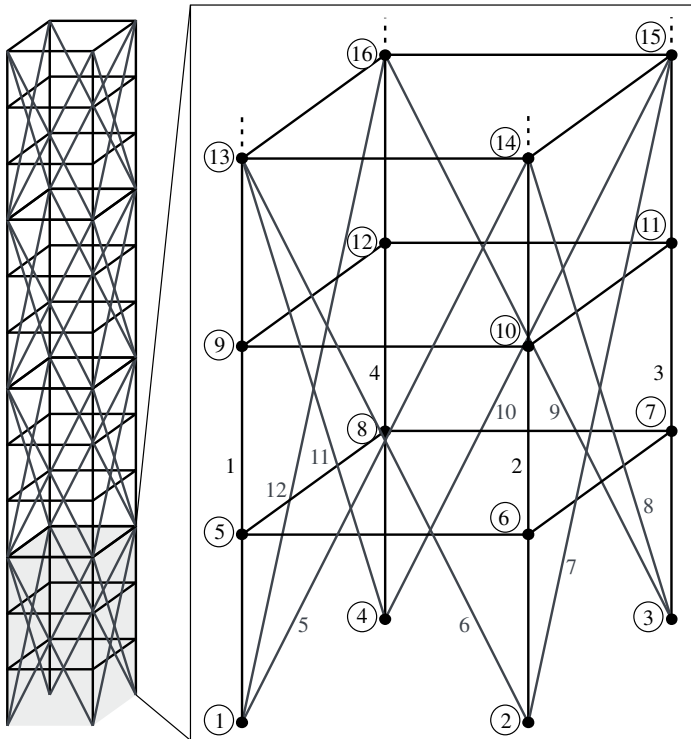


Bild 8.1: Matlab-Modell des Hochhaus-Demonstrators mit Element-/ und Knotennummern [90]

Tabelle 8.1 zeigt die Abmaße der Tragwerksteile, die zu den errechneten Tragwerksmassen führen. Für die Kraftübertragung der Aktoren wurden die Diagonalen nicht angepasst. Zudem erfolgte keine Skalierung der horizontalen Auskreuzungen, die die Stockwerke tragen.

Tabelle 8.1: Tragwerksmasse in t und Abmaße in mm der Simulationsmodelle

m_{TW}	14,18	16,17	18,28	19,95	22,38	24,68	27,45	30,05	33,64	34,79
$\square b_c$	160	170	190	200	220	230	250	260	280	300
t_{w1}	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10
$t_{w2/b}$	4	4,4	4,8	5,2	5,6	6	6,4	6,8	7,2	8
$\square h_{b1}$	110	130	140	150	160	170	180	190	210	200
$\square h_{b2}$	90	100	110	110	120	130	140	150	160	120
h_v	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
h_v	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
b_R	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
h_h	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

B Detaillierte Simulationsergebnisse und Simulationsablauf

In Bild 8.2 bis Bild 8.6 ist der differenzierte Vergleich der fünf verschiedenen aktiven Varianten mit dem passiven Tragwerk dargestellt.

Die Konfiguration mit acht Aktoren im untersten Modul in Bild 8.2 reduziert die Auslenkung konstant über der Tragwerksmasse. An den Datenpunkten im Diagramm lässt sich der Tragwerksknoten mit der Maximalauslenkung ablesen. Entlang der abnehmenden Tragwerksmasse erfolgt der Übergang von der ersten zur zweiten Schwingungseigenmode, wonach die Maximalauslenkung nicht mehr an den obersten Knotenpunkten auftritt. Mit Abnahme des Eigengewichts ist die Platzierung der Aktoren zunehmend ungünstig, weshalb die Spannung in den Stützen und Diagonalen aufgrund höherer Biegespannungen und Aktorkräfte gegenüber der passiven Variante stärker ansteigt. Das konstante Lebensdauerverhältnis wird zunächst von den Schraubenverbindungen bestimmt und mit geringerem Querschnitt vom geschweißten Flansch abgelöst. Es erfolgt keine Skalierung der Schraubverbindung, wobei der Flanschquerschnitt abnimmt.

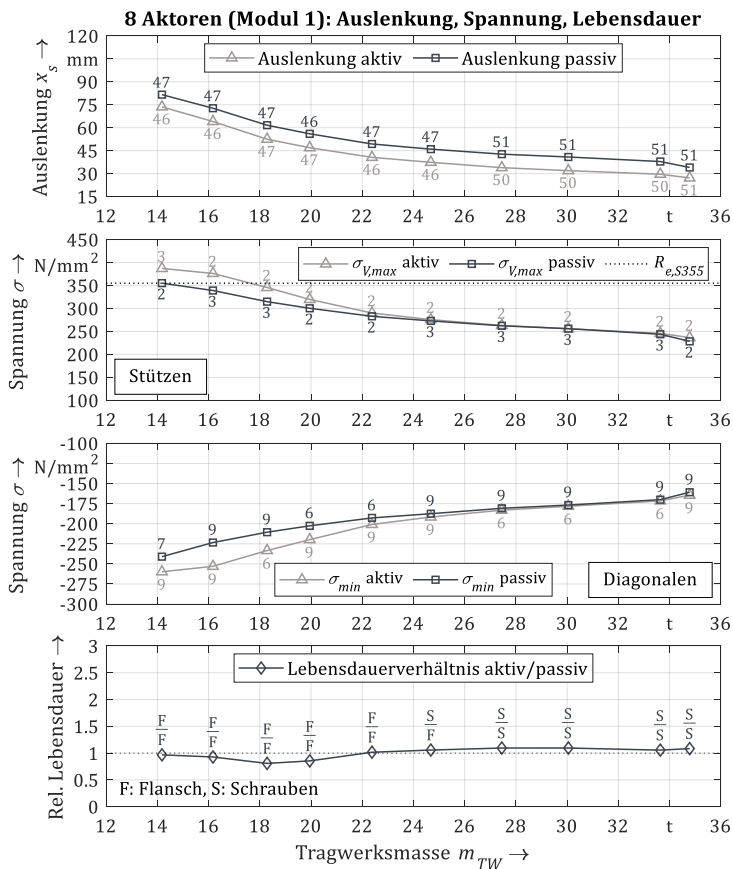


Bild 8.2: Auslenkung, Spannung und Strukturermüdungslebensdauer der Tragwerksvarianten verglichen mit der passiven Variante, 8 Aktoren in Modul 1

Bild 8.3 zeigt die Auswertung der Konfiguration mit acht Aktoren, platziert im zweiten Modul. Diese Konfiguration dämpft die Auslenkung ohne eine merkliche Spannungserhöhung. Das Lebensdauerverhältnis steigt mit abnehmender Tragwerksmasse, wobei sich ein Knick an der Stelle des Wechsels der ermüdungsbestimmenden Kerbstele von Schraubenverbindung zu geschweißtem Flansch ergibt.

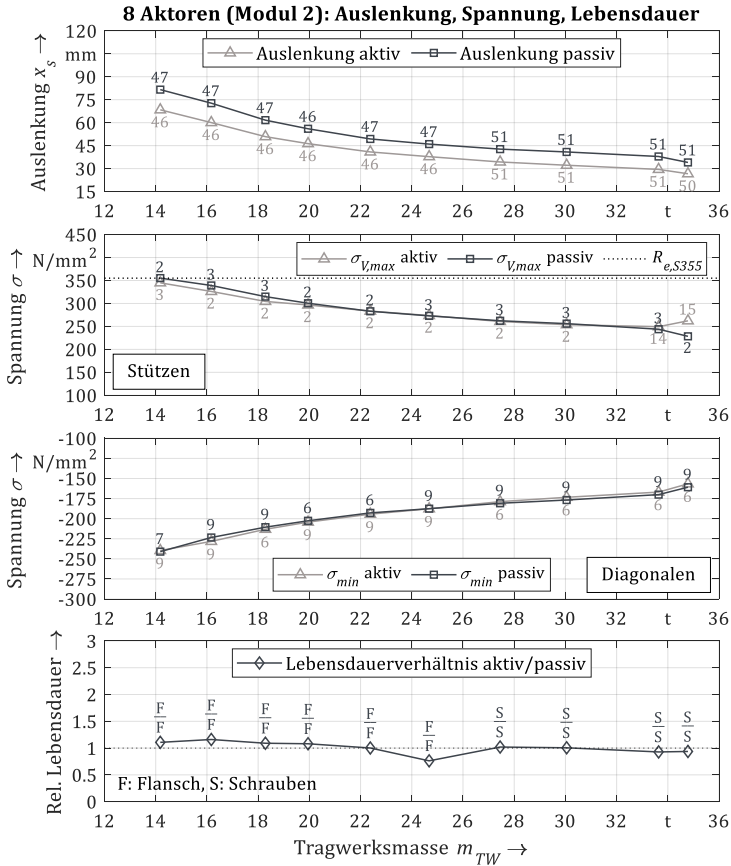


Bild 8.3: Auslenkung, Spannung und Strukturermüdungslebensdauer der Tragwerksvarianten verglichen mit der passiven Variante, 8 Aktoren in Modul 2

Demgegenüber stellt die in Bild 8.4 gezeigte Platzierung von acht Aktoren im dritten Modul die ungünstigste Variante dar. Ausschließlich für geringere Tragwerksmassen ist eine Begrenzung der Auslenkung ohne drastischen Spannungsanstieg möglich. Die Ermüdungslebensdauer liegt für höhere Tragwerksmassen zudem deutlich unter der des passiven Tragwerks gleicher Masse, weshalb sich ein Lebensdauerverhältnis kleiner eins einstellt.

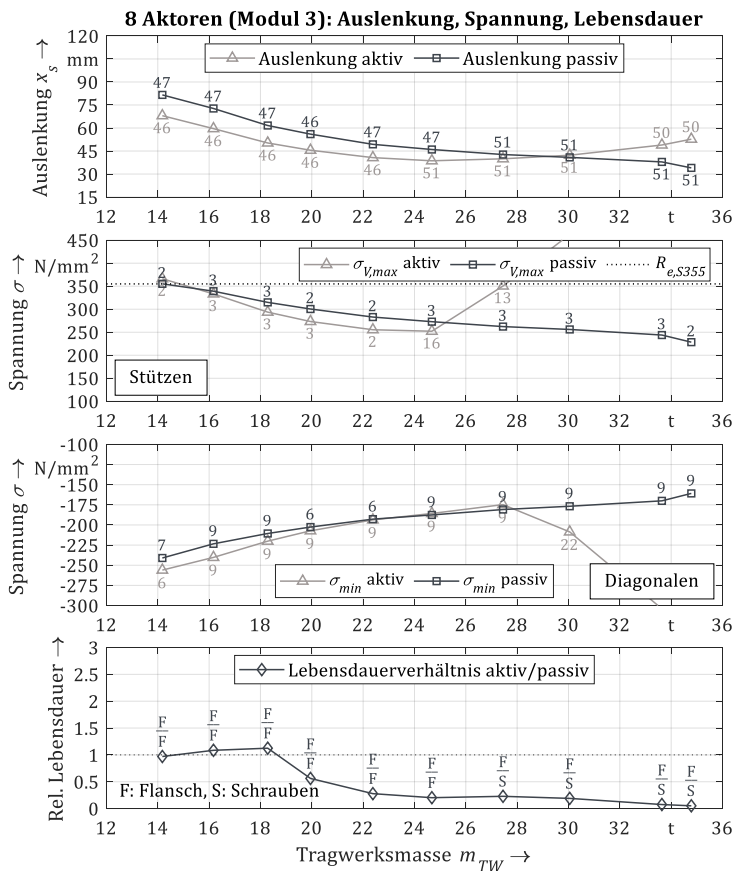


Bild 8.4: Auslenkung, Spannung und Strukturermüdungslebensdauer der Tragwerksvarianten verglichen mit der passiven Variante, 8 Aktoren in Modul 3

Bild 8.5 zeigt die Auswertung der Platzierung von 16 Aktoren im ersten und zweiten Modul. Die deutliche Auslenkungsbegrenzung nimmt mit abnehmender Tragwerksmasse zu. Die Spannung verhält sich weitgehend parallel zur passiven Variante, außer im Fall der maximalen Tragwerksmasse mit erster Schwingungsmode. Das Lebensdauerverhältnis liegt für eine abnehmende Tragwerksmasse deutlich über eins.

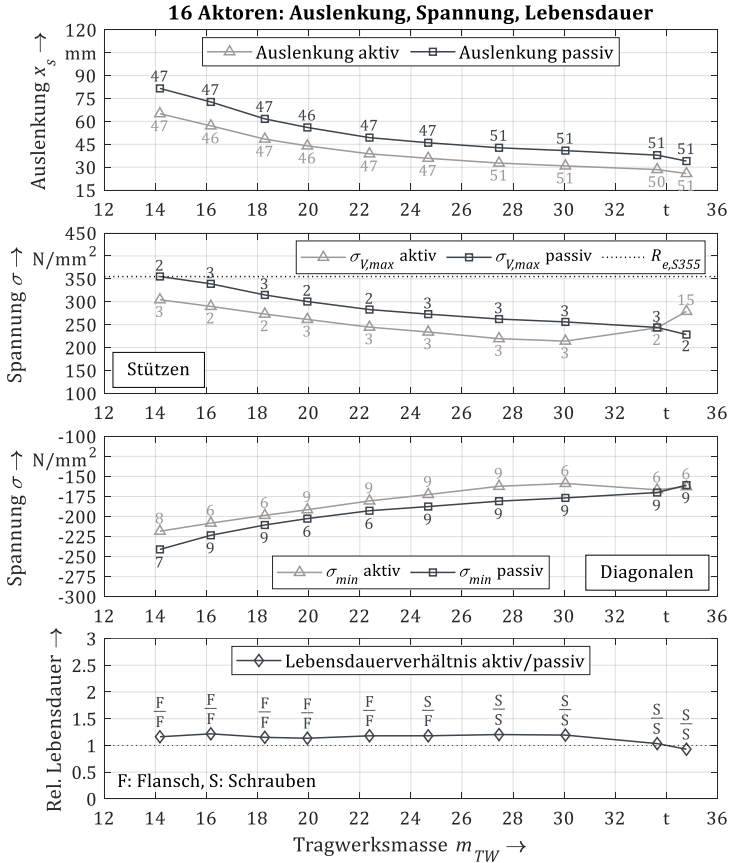


Bild 8.5: Auslenkung, Spannung und Strukturermüdungslebensdauer der Tragwerksvarianten verglichen mit der passiven Variante, 16 Aktoren in Modul 1 & 2

Mit der Maximalbestückung von 24 Aktoren im ersten, zweiten und dritten Modul ergibt sich nach Bild 8.6 eine zunehmende Reduktion der Auslenkung mit abnehmender Masse, sowie eine konstante Spannungsminderung und Lebensdauersteigerung.

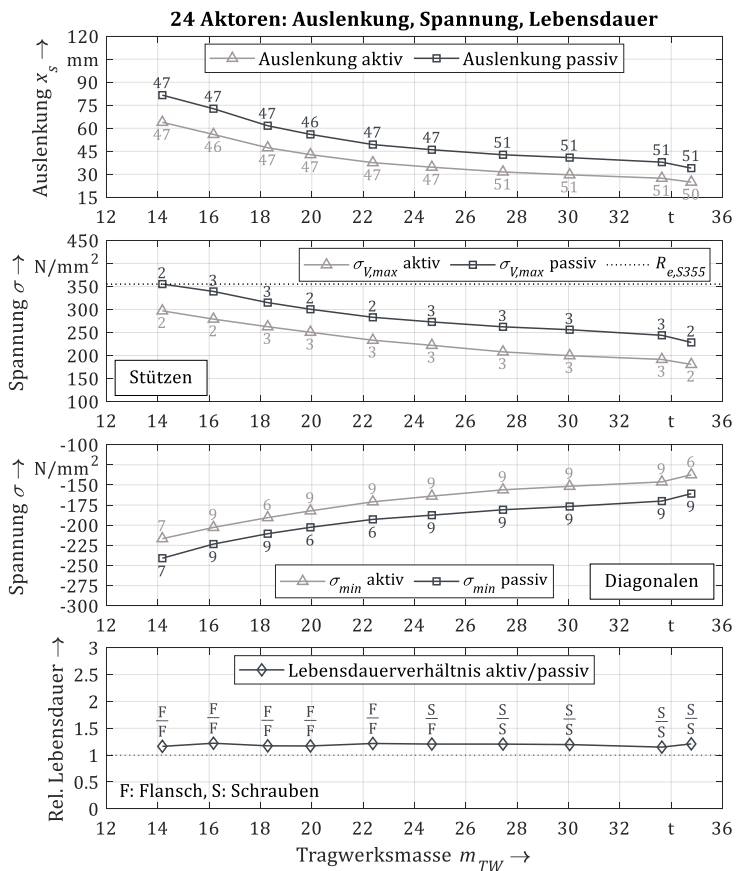


Bild 8.6: Auslenkung, Spannung und Strukturermüdungslebensdauer der Tragwerksvarianten verglichen mit der passiven Variante, 24 Aktoren in Modul 1, 2 & 3

In Bild 8.7 ist der Simulationsablauf als Ablaufgrafik zur simulativen Analyse adaptiver Tragwerke dargestellt. Die Iterationen auf der linken Seite ergeben sich je nach gewünschten Untersuchungsergebnissen und Anzahl an Varianten. Rechts sind die Eingangs- und Ausgangsgrößen aufgeführt.

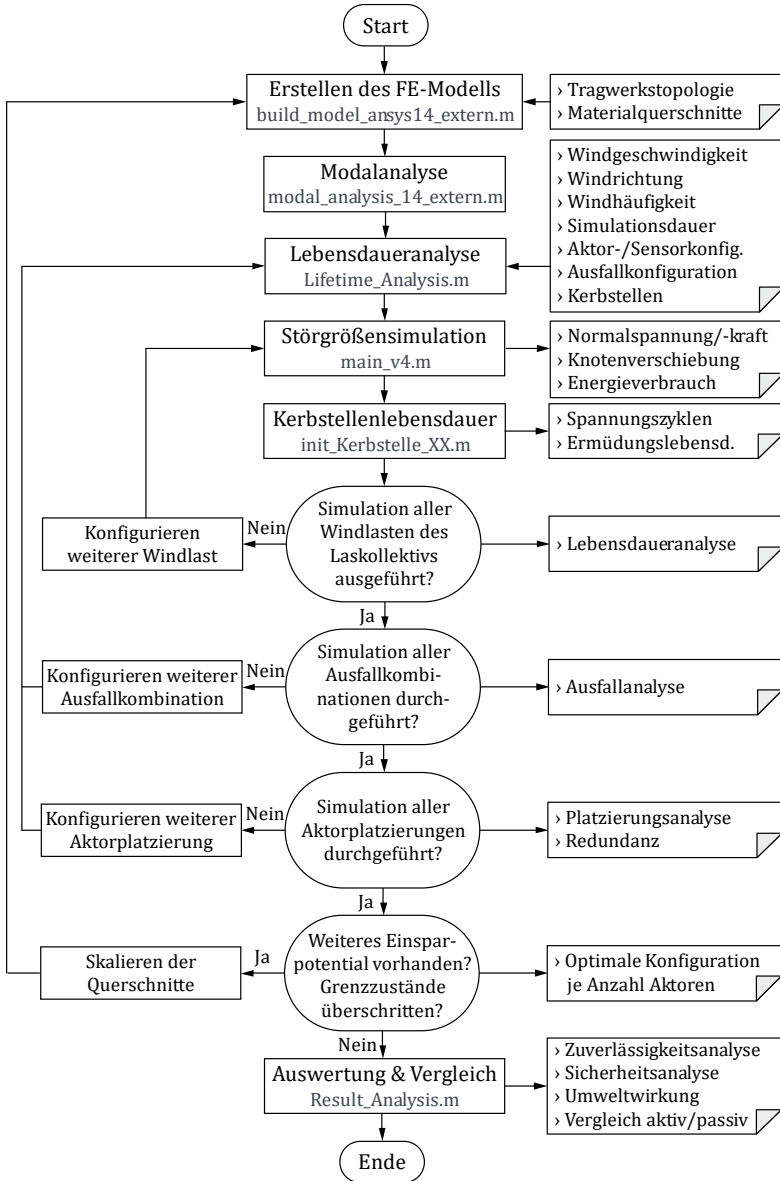


Bild 8.7: Simulationsablauf und Aufteilung in Matlab

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera K. Karow	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit W. Sommer	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffstörungen beim Hohlrad-Verzahnungen mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elasto-hydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenus	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagerereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-berechnung nach dem Booleschen Modell
61	C. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-wendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberma	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserher-stellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Siefried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	C. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Loseilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozess
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenbauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper- und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw-Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenauflfläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Loseilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenläufigen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	C. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	S. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenläuflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungseräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaiber	Betriebs- und Benutzungsseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsmin- derung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenläufläche
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauer- er vorherhersage von Wellendichtringen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugma- schinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsver- halten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Niffler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtringen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebeeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Remppis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehalteter Dichtungsgegenläuflächen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebsstrangerprobung
170	J. Gölz	Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE- Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprog- nos en
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	S. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V. Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtungen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenauflä-chen und Radial-Wellendichtungen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe aus PTFE-Compound
193	N. Dakov	Elastohydrodynamische Simulation von Wellendichtungen am Beispiel der PTFE-Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen
194	Z. Beslic	Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben
195	S. Jetter	Zuverlässigkeitsprognose mechanischer Komponenten auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit
196	O. R. Orozco	Availability of Particle Accelerators: requirements, prediction methods and optimization
197	V. Schramm	Dependable System Development Methodology and Case Study for the LHC Beam Loss Monitoring System at CERN
198	J. Gröber	Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme
199	K. Lucan	Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse
200	F. Müller	Realitätsnahe Modellierung, Simulation und Analyse der operativen Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskennwerte technischer Systeme mit Vertrauensbereich

