



EIFER

EUROPÄISCHES INSTITUT FÜR ENERGIEFORSCHUNG
INSTITUT EUROPEEN DE RECHERCHE SUR L'ENERGIE
EUROPEAN INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH

Strukturbelastungen Strukturen

KIT



- **Strukturbelastungen**
- **Strukturen**
 - **Rotorblätter**
 - **Turm**
 - **Fundament**

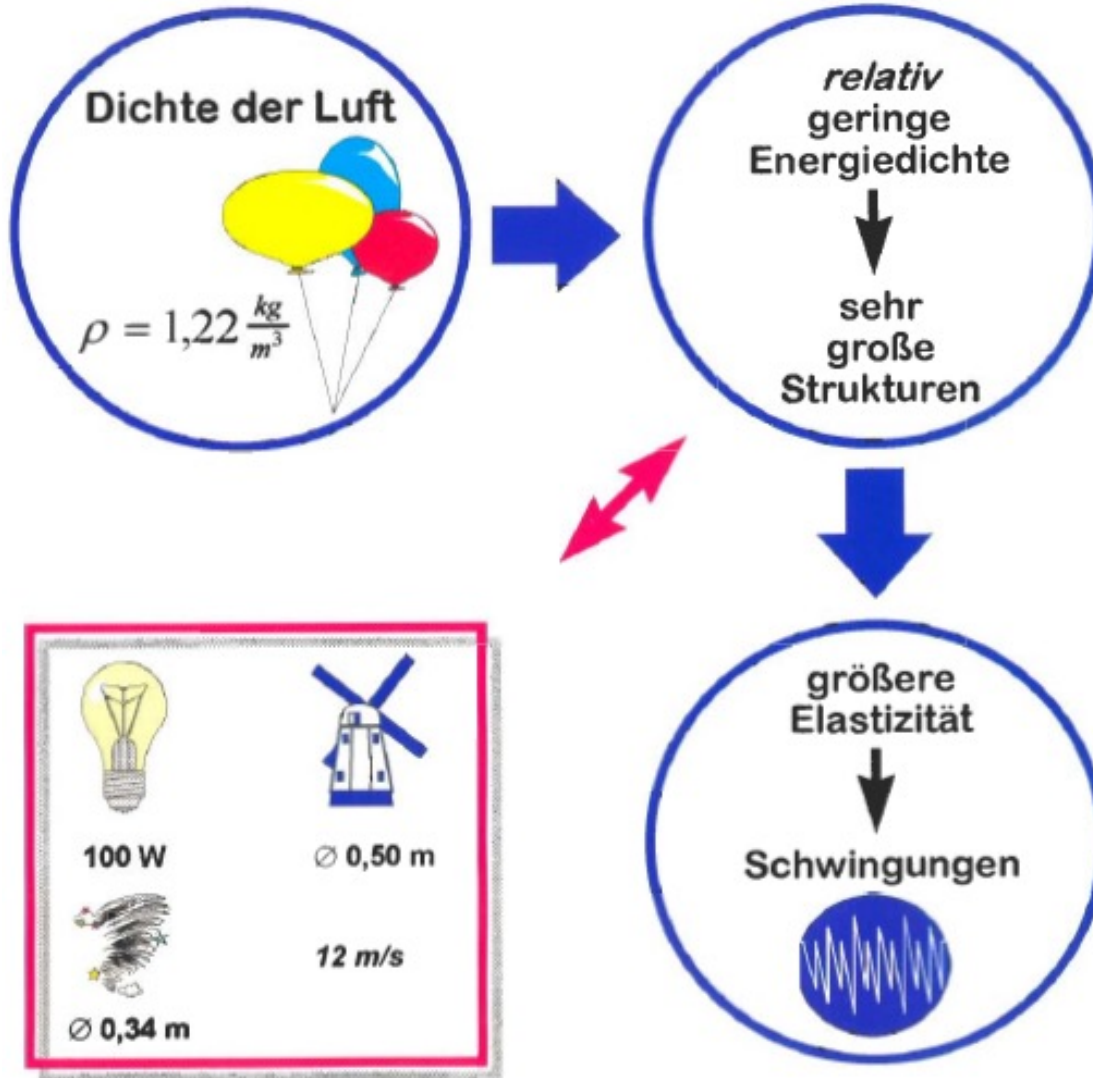
Strukturbelastungen

Ursachen - Natur des Windes



Strukturbelastungen

Ursachen – Dichte der Luft



Strukturbelastungen

Grundlagen der Strukturdimensionierung

Bruchfestigkeit bei Extrembelastungen



Jahrhundert Boe
 $42 \frac{m}{s} \approx 150 \frac{km}{h}$

Keine Berechnungen für:

- Tornado
- Hurricane
- Blizzard
- etc.

$> 50 \frac{m}{s} \approx 180 \frac{km}{h}$

Steifigkeit und Resonanzfreiheit



Grundlage
Rotor-Turm

optimale Abstimmung der
Komponenten aufeinander
bei allen vorkommenden
Standardlastfällen

Dauerfestigkeit



- 20-50 U/min
- 20-30 a
- 10^7 - 10^8 Lastwechsel

- WEC 10^6 LW = 1000 Std
- PKW LT = 2000-3000 Std

Strukturbelastungen

Krafteinteilung

♣ *Gut Berechenbar*

♠ *Nicht Berechenbar*

	Luftkräfte	Massenkräfte
zeitlich konstant	mittlere Windgeschwindigkeit ♣	Fliehkräfte ♣ Gewicht der Gondel ♣
umlaufperiodisch	Turmschatten, -vorstau ♣ Höhenprofil, Schräganströmung ♣	Coriolis-/Kreiselkräfte ♣ Unwucht, Gewicht der Flügel ♣
stochastisch, langzeit	turbulentes Langzeitverhalten ♠	
transient, kurzzeit	Böhen, <i>Pitch</i> , <i>Stall</i> , <i>Nachführung</i> , <i>Bremsen</i> , <i>Netzabschaltung</i>	



- lückenloser Überblick der Betriebszustände
 - Definition der Lastfälle
- Ausgangspunkt Lasten auf den Rotor
 - Weitergabe an restliche Bauteile

Strukturbelastungen

Lastfälle

Kombination	Lastfall	Bemerkung
Normalbetrieb	Einschaltgeschwindigkeit	<i>Dimensionierungsgrundlage</i>
	Teillastgeschwindigkeit	
	Nenngeschwindigkeit	
	Vollastgeschwindigkeit	
	Abschaltgeschwindigkeit	
Mannöver	Anfahren	<i>Ermüdung durch Eigengewicht</i>
	Bremsen	<i>Nur Notbremse ist extreme Belastung</i>
	Stillstand	<i>größere Belastung als Normalbetrieb</i>
Extrembedingung	Jahrhundertböe	<i>42 m/s (60m/s)</i>
	extreme Gradienten	<i>geographische Extremlagen, defekte Nachführung</i>
	partielle Böe	<i>hochgradig unsymmetrisch - hohes Giermoment</i>
	Eisansatz	<i>Verringerung des Auftriebs</i>
	rech. Einwirkung	<i>Tornado etc. außerhalb der Berechnung</i>
Störung	Winkelregelung	<i>aerodynamischen Belastungen</i>
	Nachführregelung	<i>extreme Schräganströmung - hohe Giermomente</i>
	Generator Kurzschluß	<i>7-faches Nennmoment im Triebstrang</i>
	Überdrehzahl	<i>Netzausfall - extrem gefährlich</i>
	extreme Unwucht	<i>Rotorverlust</i>
	Notabschaltung	<i>hohe Biegebeanspruchung bis Bruchgrenze</i>
	Vogelschlag	<i>weder ökologisch noch ökonomisch problematisch</i>
Montage / Wartung	Stillstand	<i>höhere Belastung als Normalbetrieb</i>

Strukturbelastungen

Entwurfslasten - Luftkräfte

Klasse	gleichförmige Anströmung	Höhengradient Schräganströmung	Turbumströmung	Turbulenz Böen
Problem	Auslegungsschnellaufzahl	Periodische Wechsellast	Lee-Läufer	kurzzeitig extreme Belastungen
Lösungsmöglichkeit	Pitch-Steuerung optimale Stallregelung optimale Verwindung	2-3 Blätter Pendelnaben Schlag-Schwenkgelenke	Turmdurchmesser Turmabstand	Pitch-Stallregelung komplexer Nabenaufbau Drehzahlnachgiebigkeit
Zusatzinfo		<i>Pendelnabe bei Zweiblattrotor</i>	<i>Lee-Läufer → 30-40% 1-facher Turmabstand (LUV) Eigenfrequenz / Geräusch</i>	

Nabenformen

- Gelenklos
- Blattschlaggelenke
 - *symmetrisch / asymmetrisch*
- Pendelrotor
 - *asymmetrisch*
- Winkelrückstellung
 - *schnelles Gleichgewicht*
- Blattschwenkgelenke
 - *zu großer Aufwand*
- Biegeelastizität
 - *zu viele Freiheitsgrade*

Drehzahlnachgiebigkeit

- Torsionselastizität
- mech. Drehzahlschlupf
 - *2-3 % / hyd. Kupplung*
- elec. Drehzahlschlupf
 - *Asynchrongenerator*

Drehzahlelastizität

- 80-120% Drehzahlvariabel
 - *Frequenzumrichter*

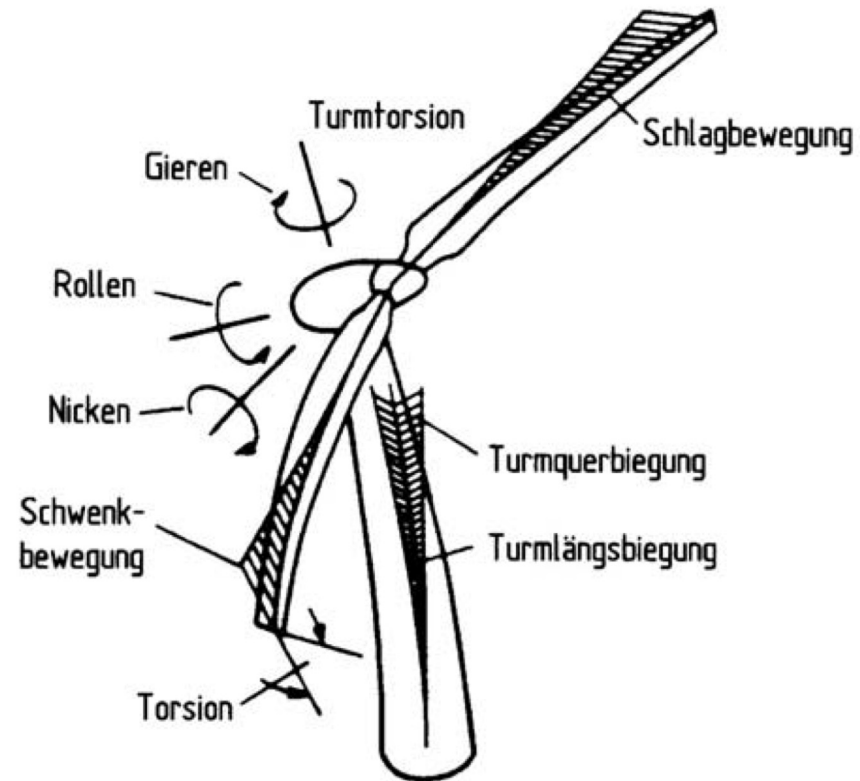
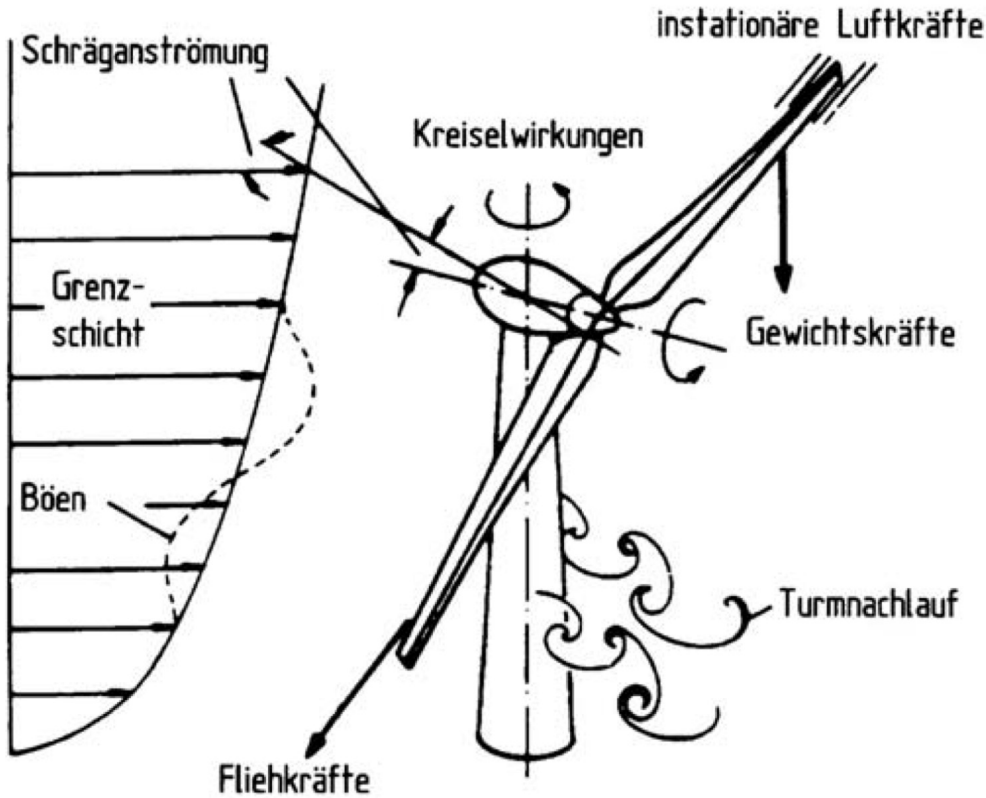
Strukturbelastungen

Entwurfslasten - Massenkräfte

Klasse	Eigengewicht	Zentrifugalkraft	Kreiselkräfte
Problem	wechselnde Zug-Druckkräfte Schlag- Schwenkräfte	Konuswinkel bei LUV-Rotor	Windnachführung
Lösungsmöglichkeit	Blattnabengelenke	Konuswinkel bei LUV-Rotoren vermeiden	Gierdämpfer
Zusatzinfo	<i>begrenzende Größe bei Großanlagen</i>	<i>LEE-Rotor unkritisch</i>	<i>LEE-Rotor sehr kritisch</i>

Strukturbelastungen

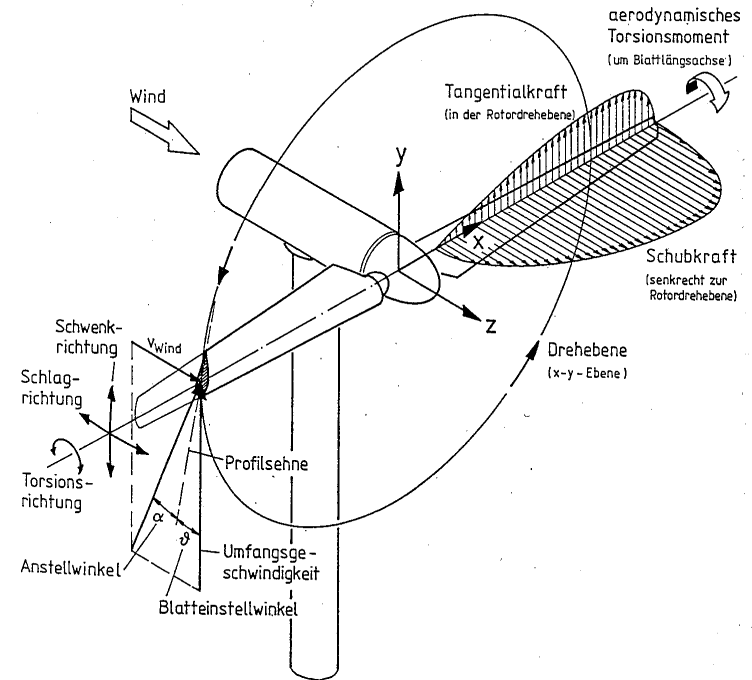
Begriffe



Strukturbelastungen

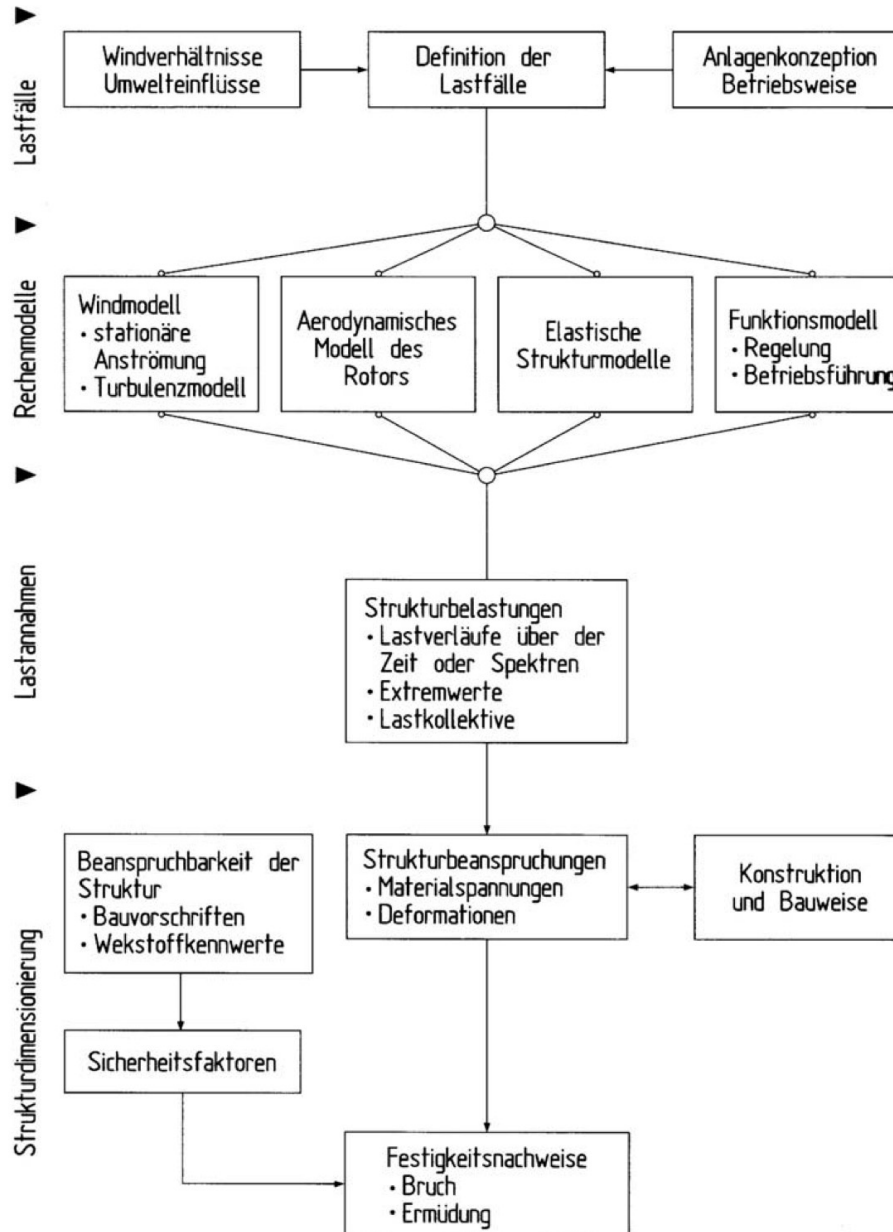
Krafteinteilung

durch:	Luftkräfte	Massenkräfte
Stationäre Belastungen	<p>mittlere Windgeschwindigkeit</p>	<p>Fliehkräfte</p>
Instationäre Belastungen	<p>Höhenprofil der Windgeschwindigkeit</p> <p>Turmschatten beim laeseitigen Rotor</p>	<p>Gewichtskräfte</p> <p>Kreisel- und Corioliskräfte</p>
	<p>Schräganströmung</p> <p>Turmworstau beim lauseitigen Rotor</p>	
nicht periodische, stochastische Belastungen	<p>Windturbulenzen</p>	



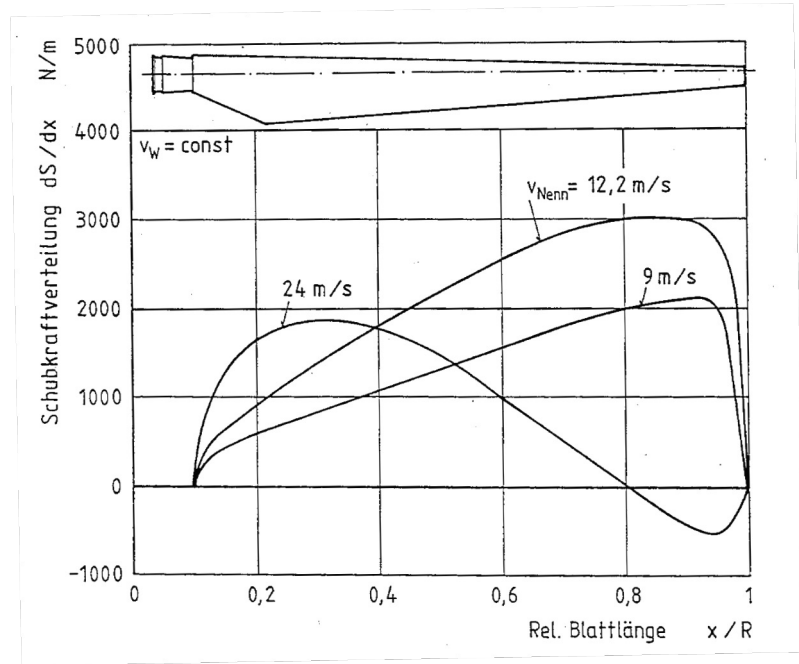
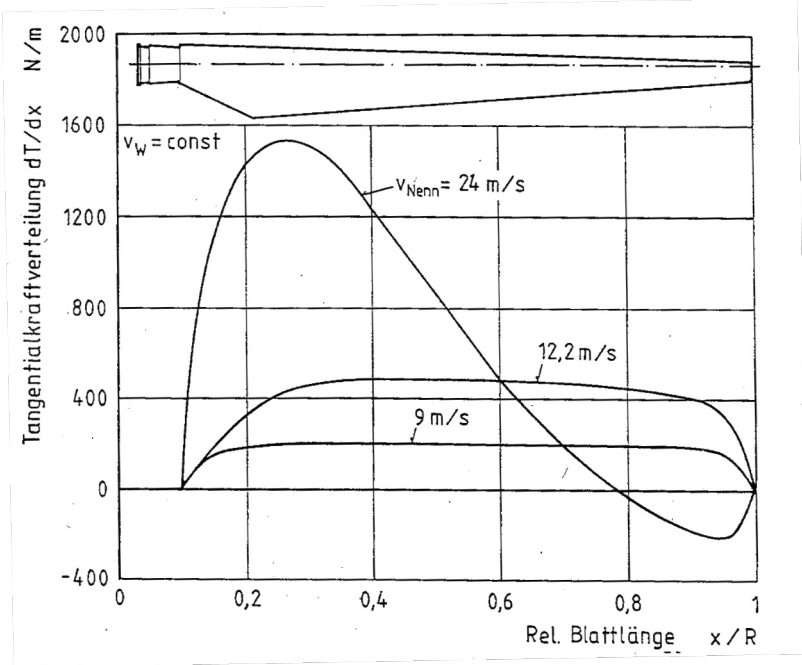
Strukturbelastungen

Struktogramm des Vorgehens



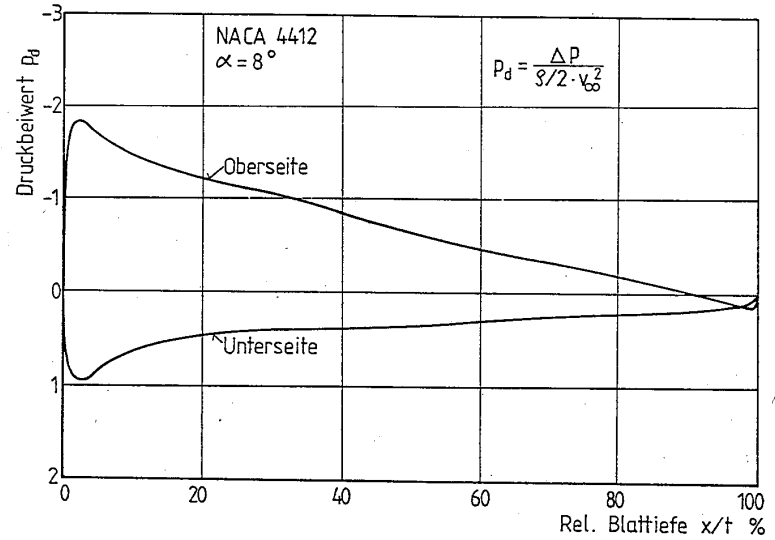
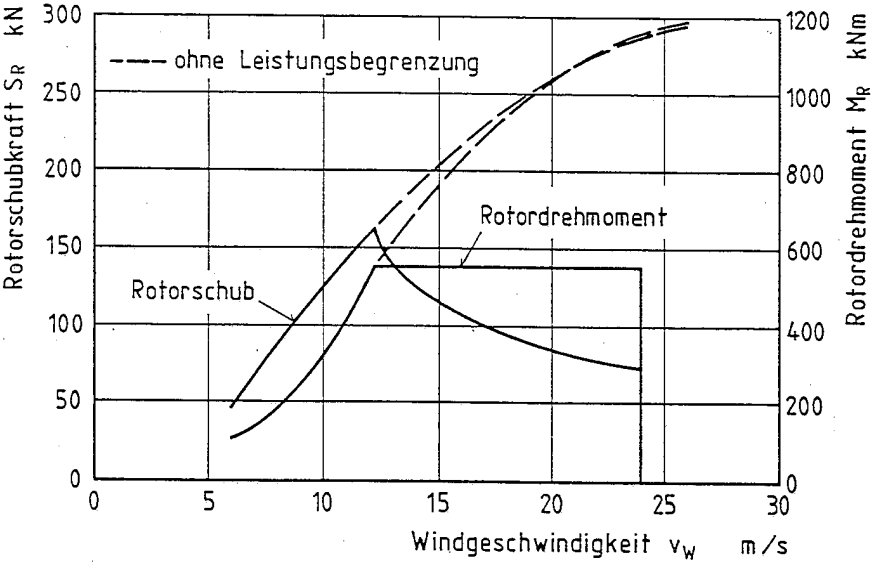
Strukturbelastungen

Tangentialkraft - Schubkraft



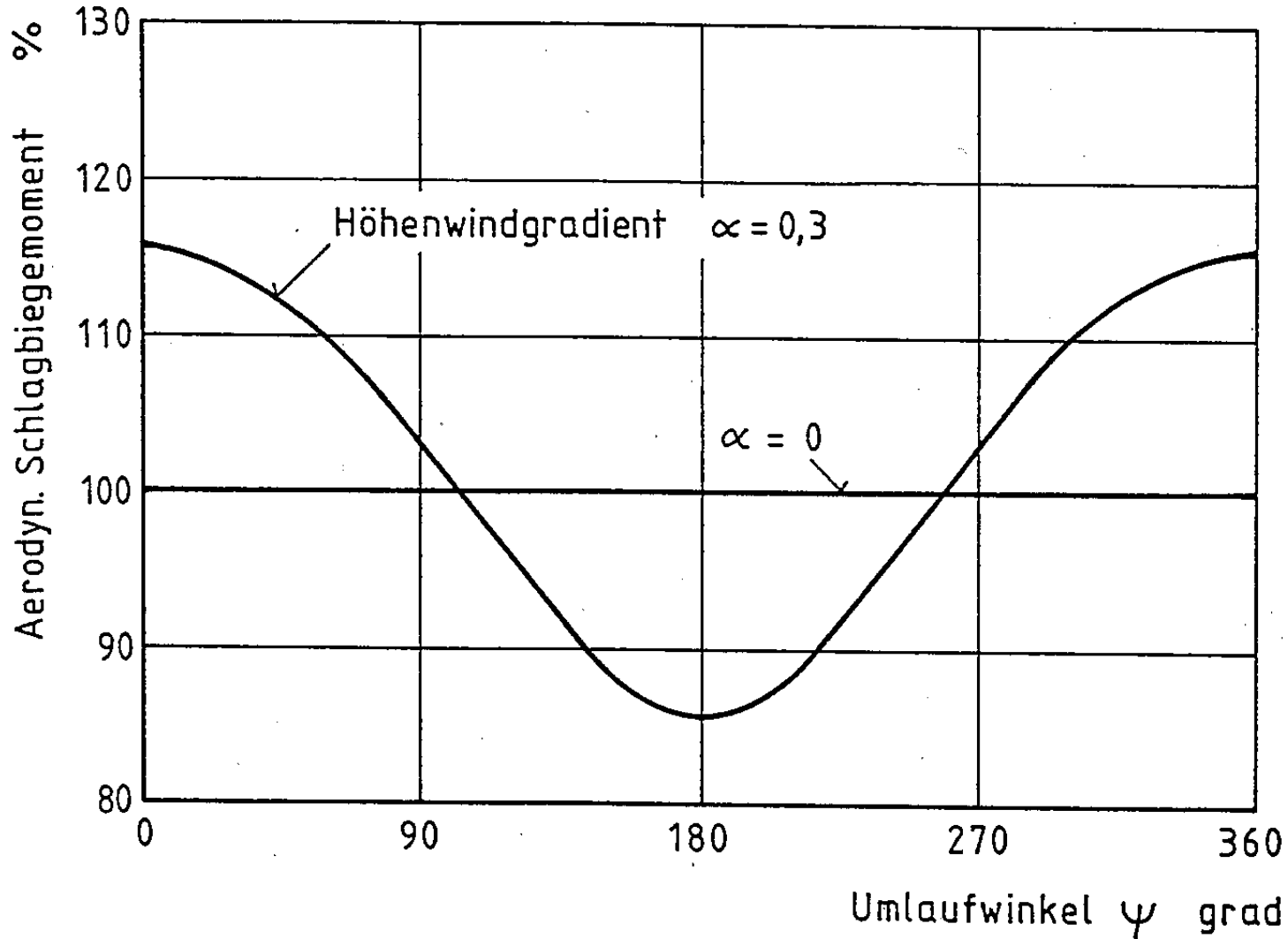
Strukturbelastungen

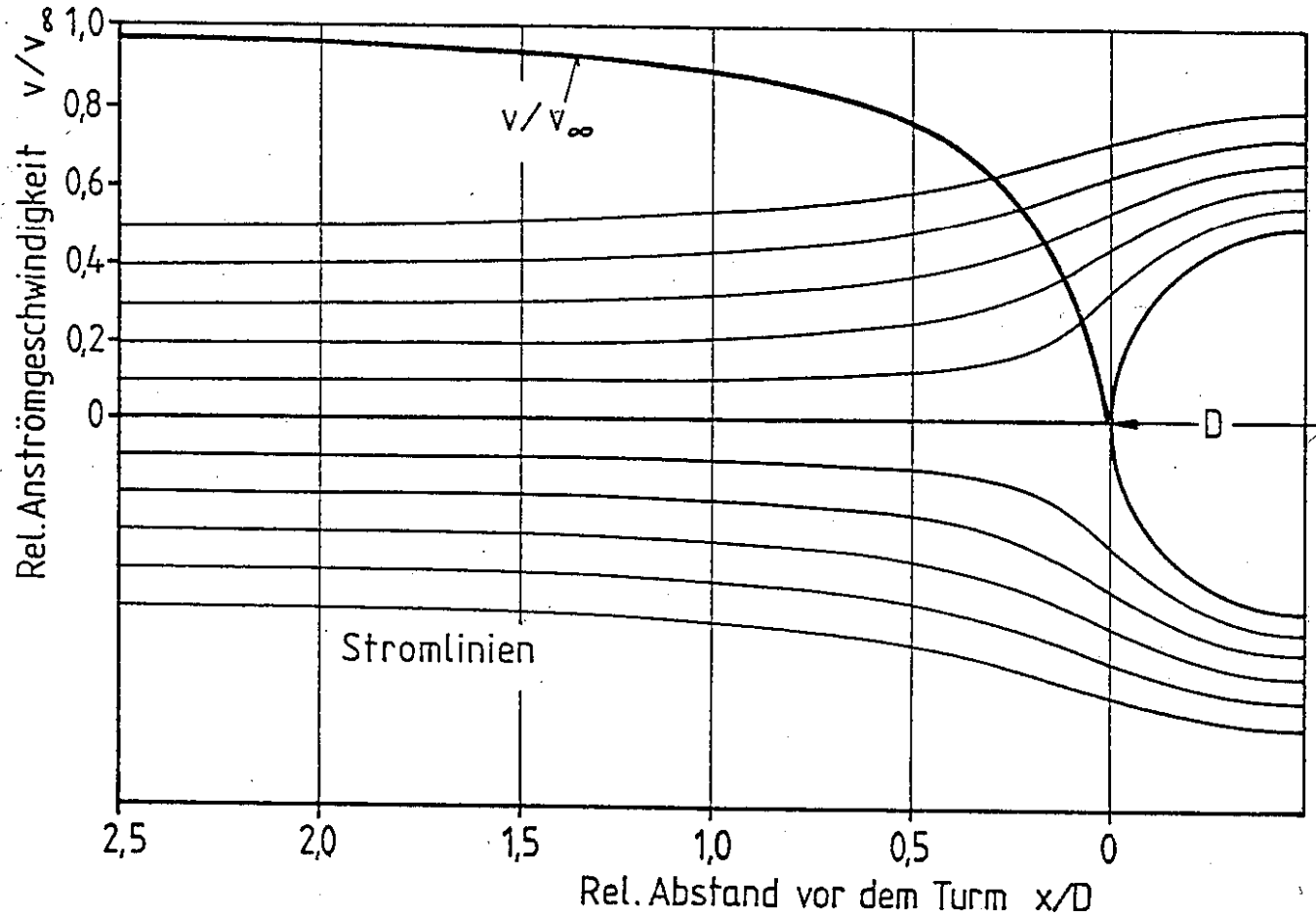
Rotorschub und Rotordrehmoment / Druckverteilung



Strukturbelastung

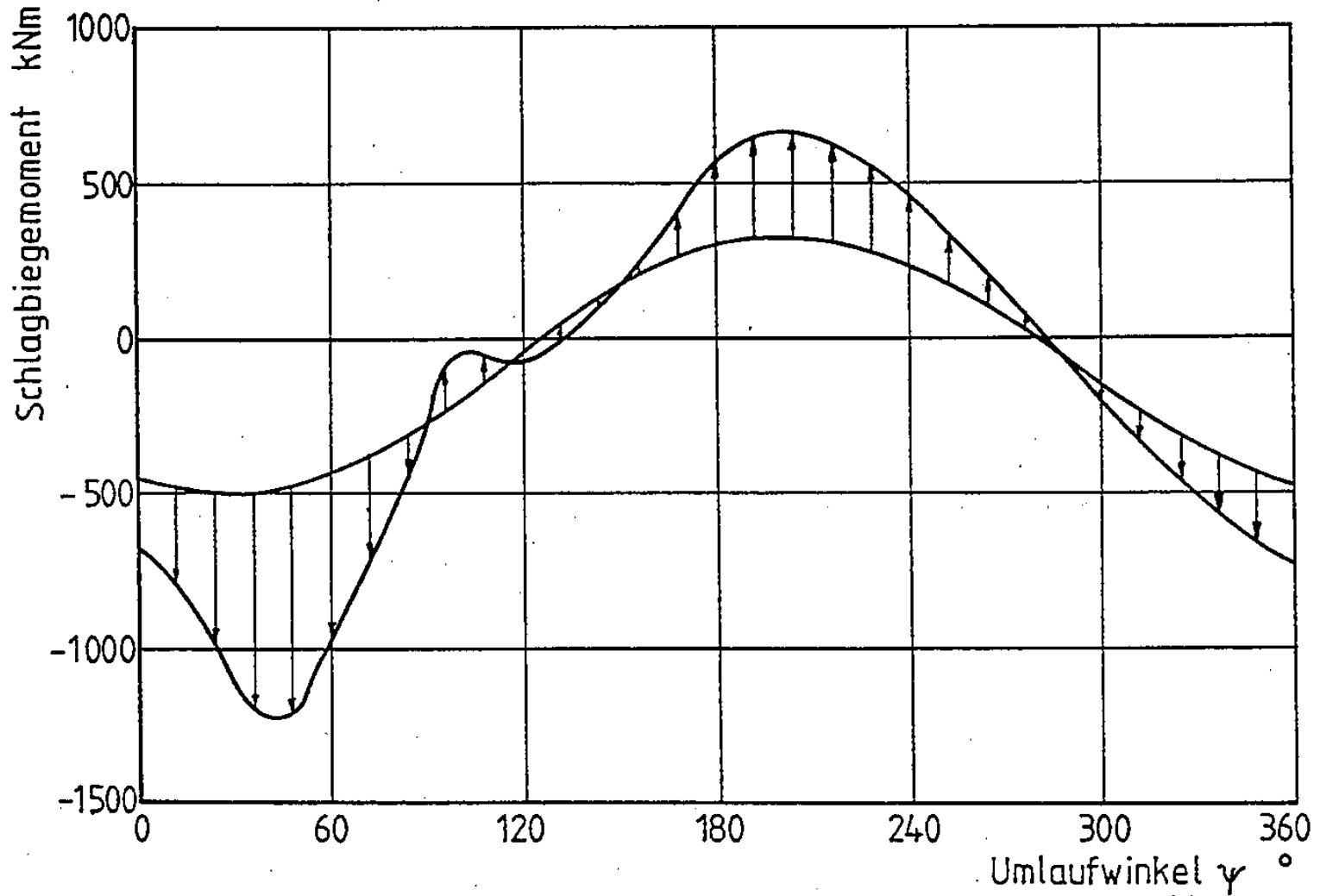
Umlaufperiodisches Schlagbiegemoment





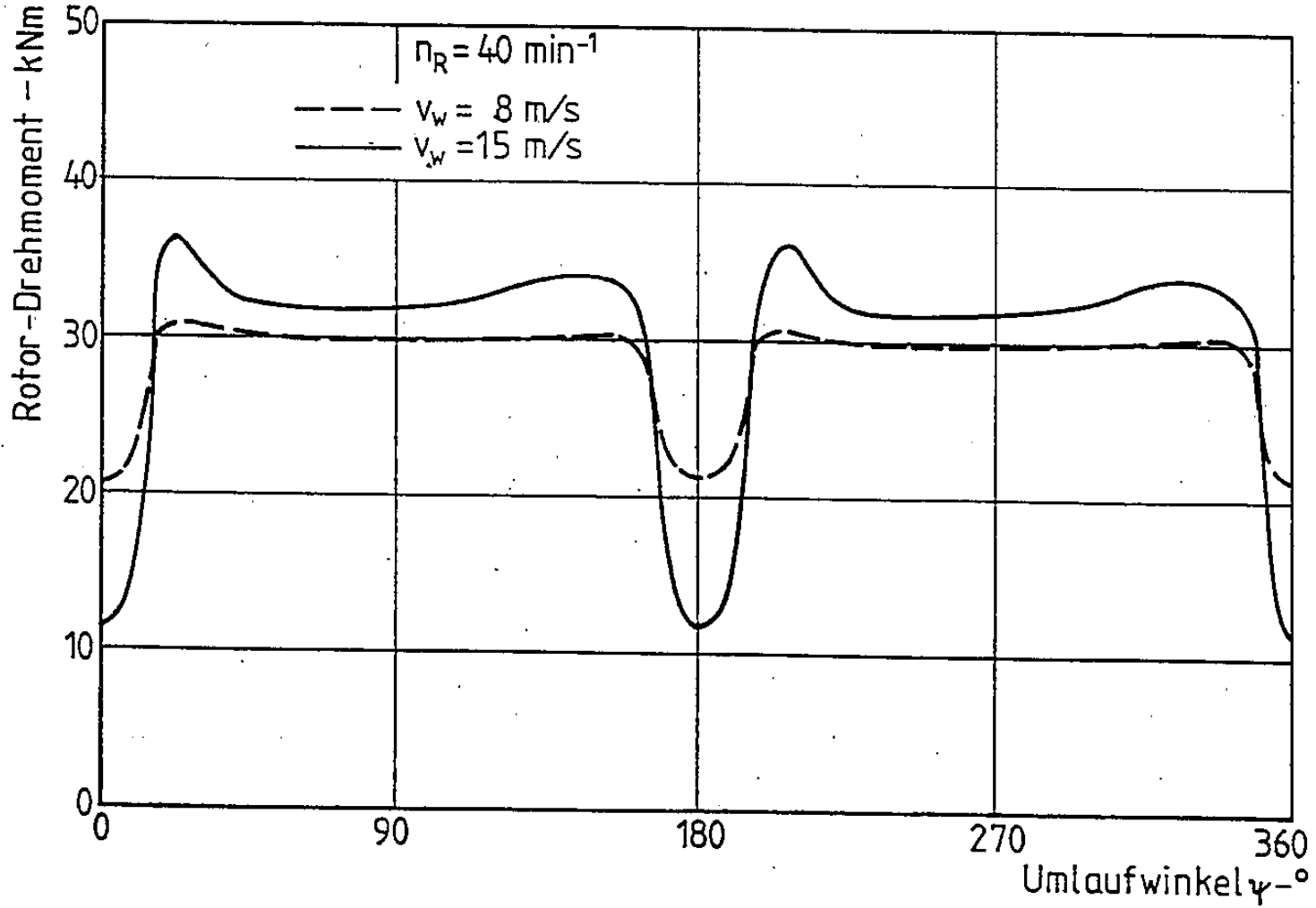
Strukturbelastungen

Turmschatten – Growian (1-Blatt - LEE)



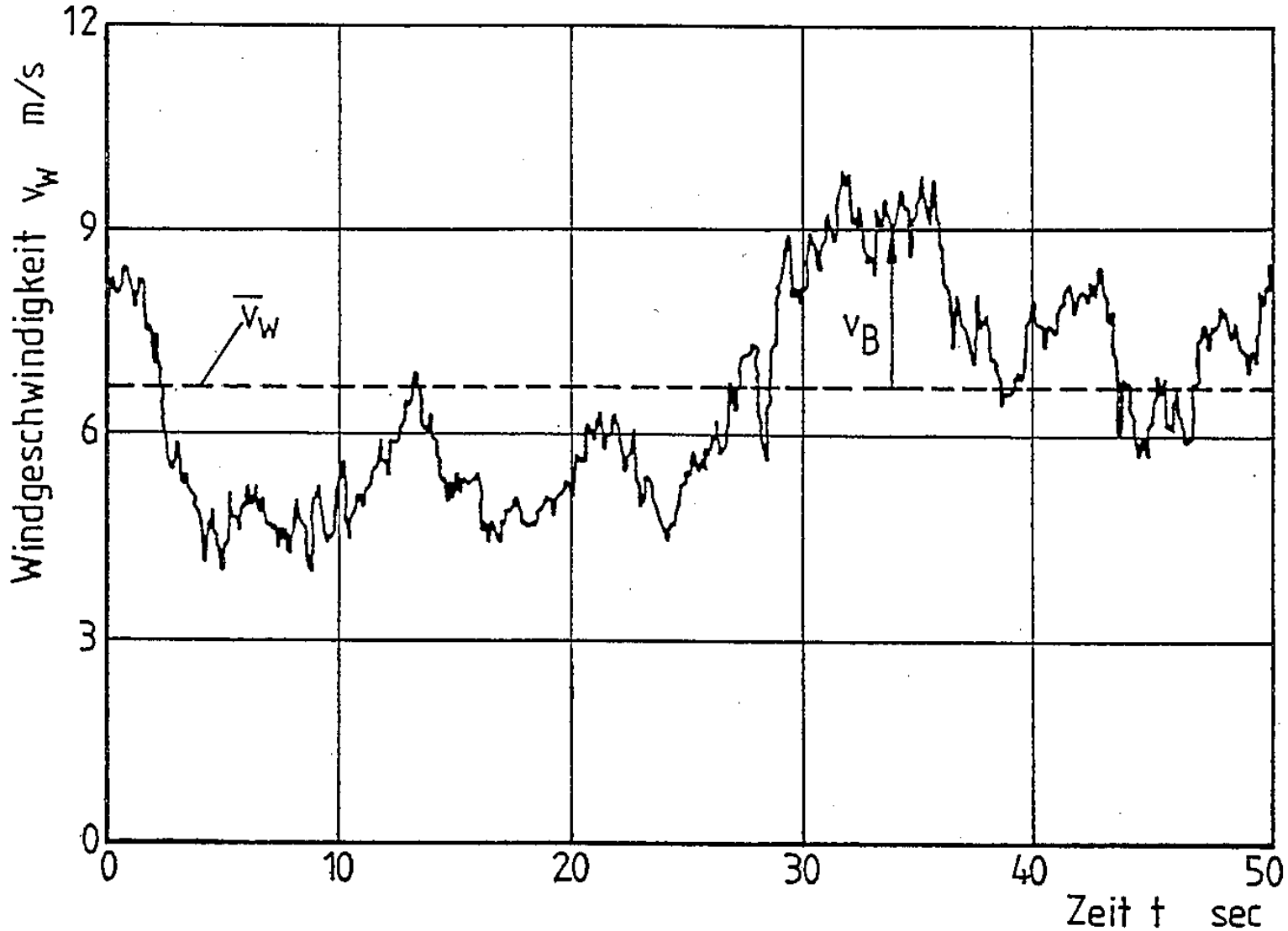
Strukturbelastungen

Turmschatten – MOD0 (2-Blatt – LEE)



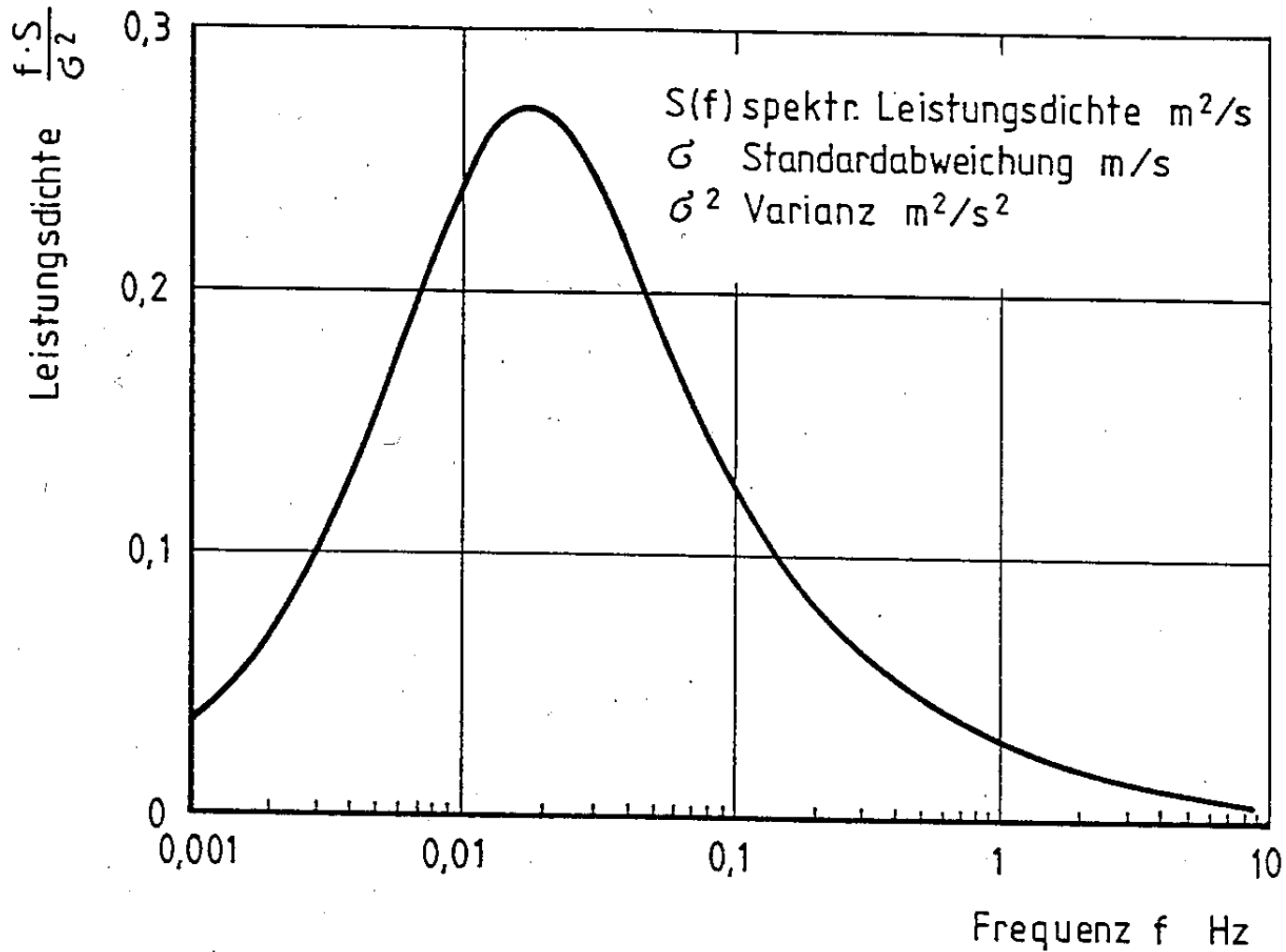
Strukturbelastungen

Windgeschwindigkeit hochaufgelöst



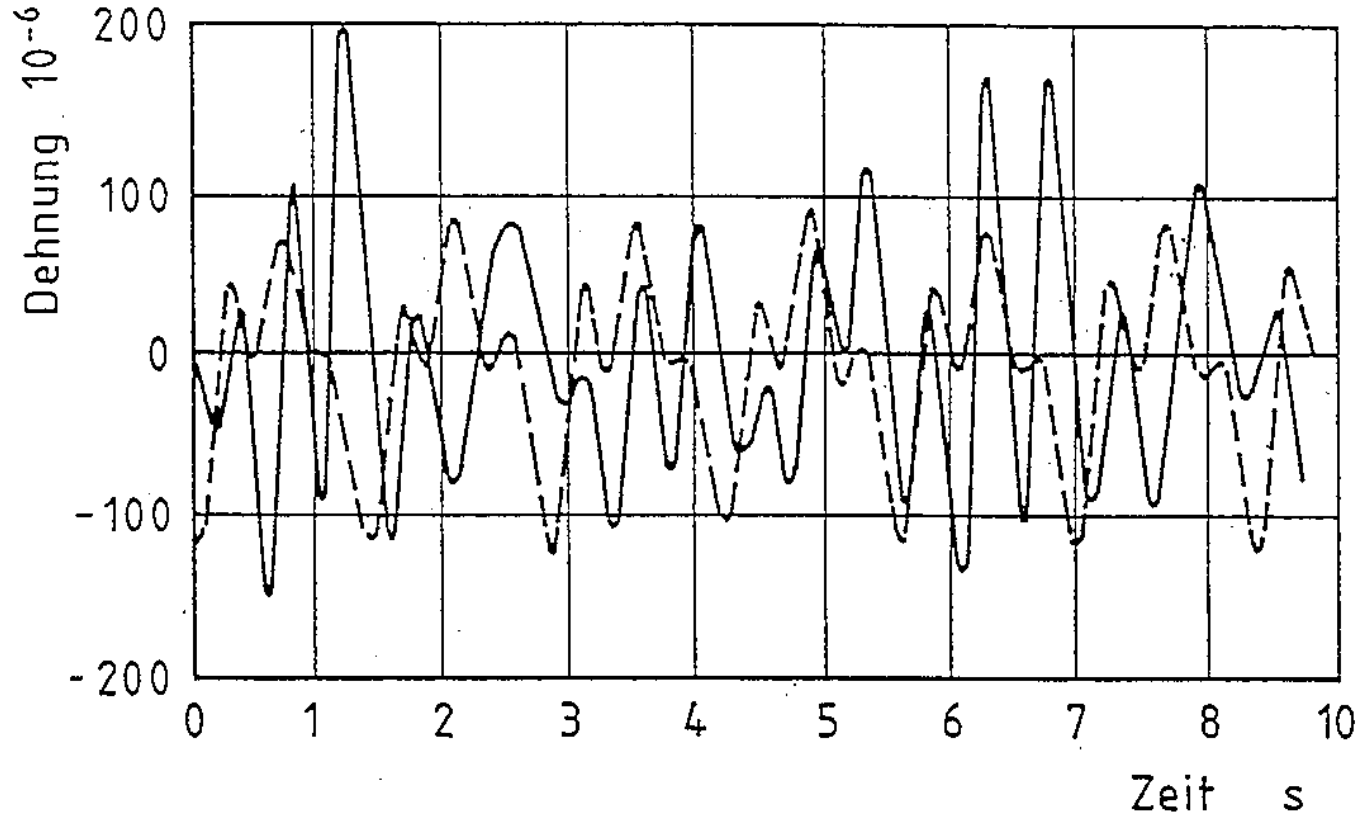
Strukturbelastungen

Turbulenzspektrum



Strukturbelastungen

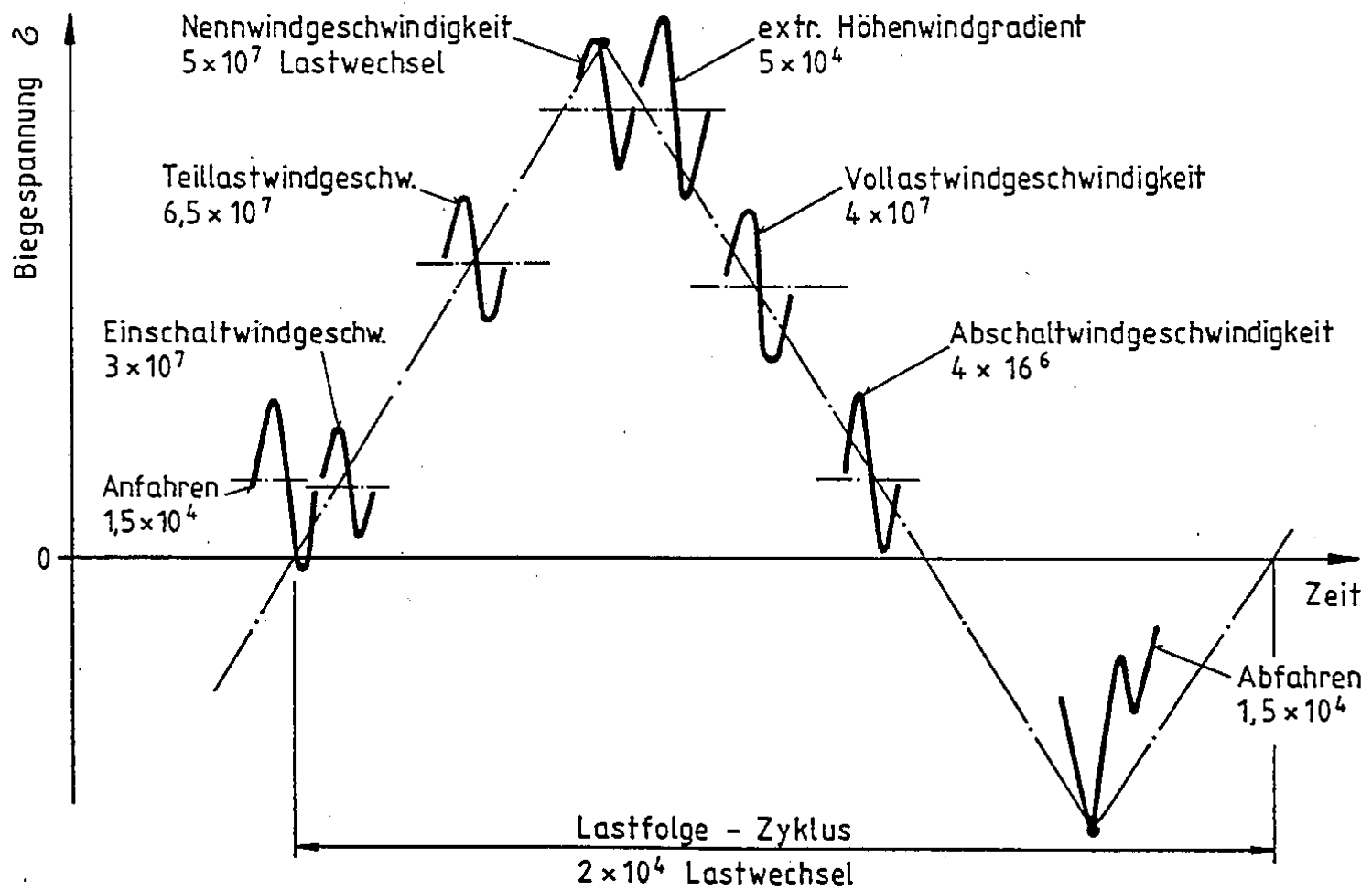
Dehnung HPW300



- nur unter dem Einfluß umlaufperiodischer Störungen der Anströmung
- mit Berücksichtigung der Windturbulenz

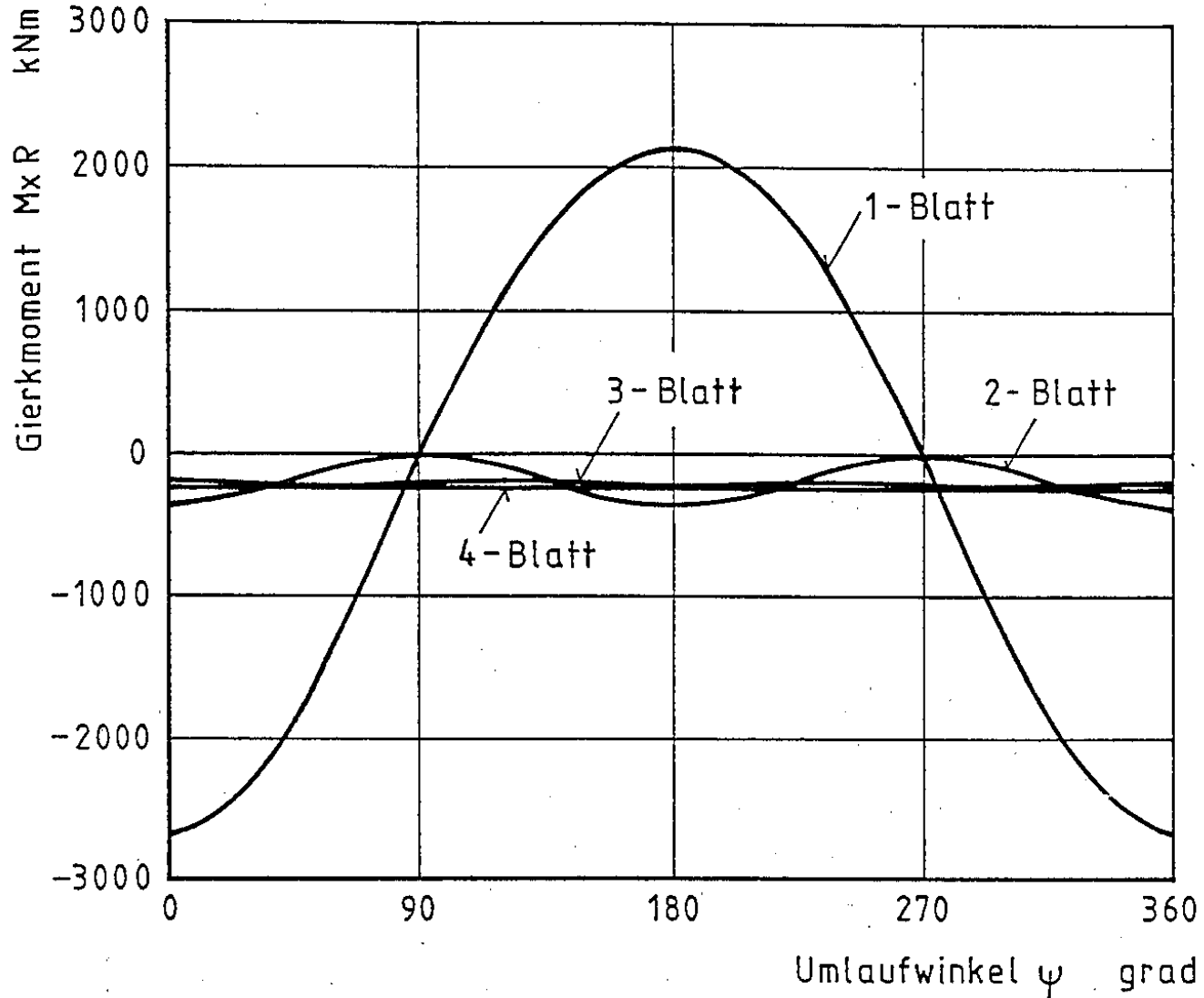
Strukturbelastungen

Idealisierte Lastfolge



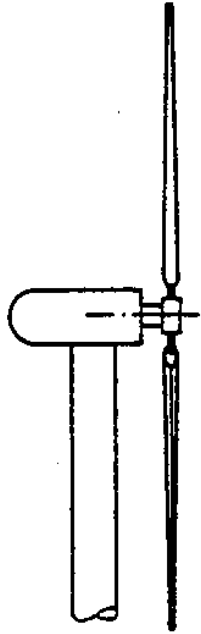
Strukturbelastungen

Unsymmetrische Anströmung - Giermoment

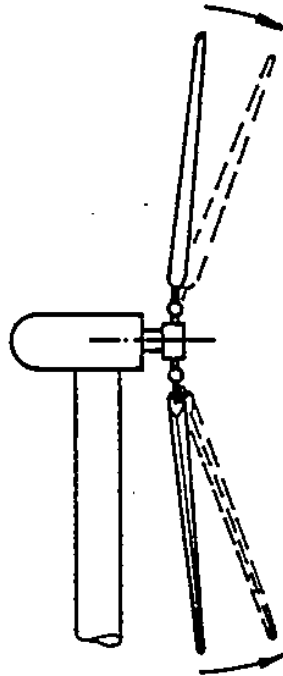


Strukturbelastungen

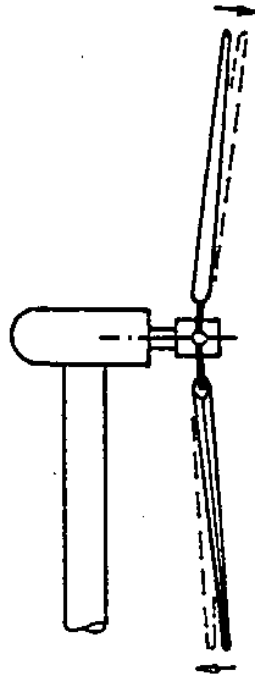
Rotornabengelenke



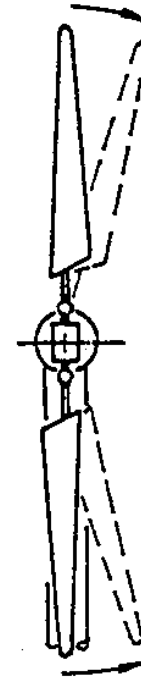
Gelenkloser
Rotor



Blattschlag -
gelenke



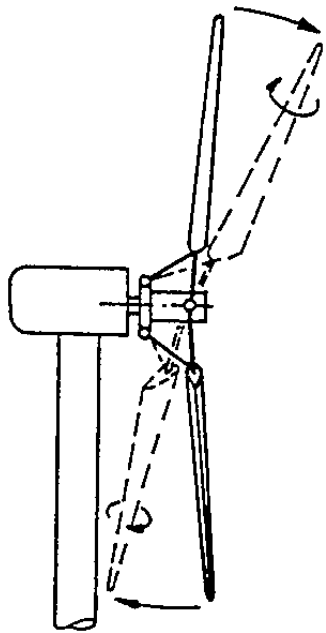
Pendelrotor



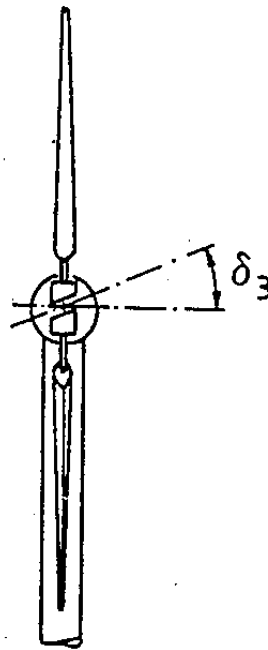
Blattschwenk-
gelenke

Strukturbelastungen

Blattwinkelrücksteuerung



a.



b.

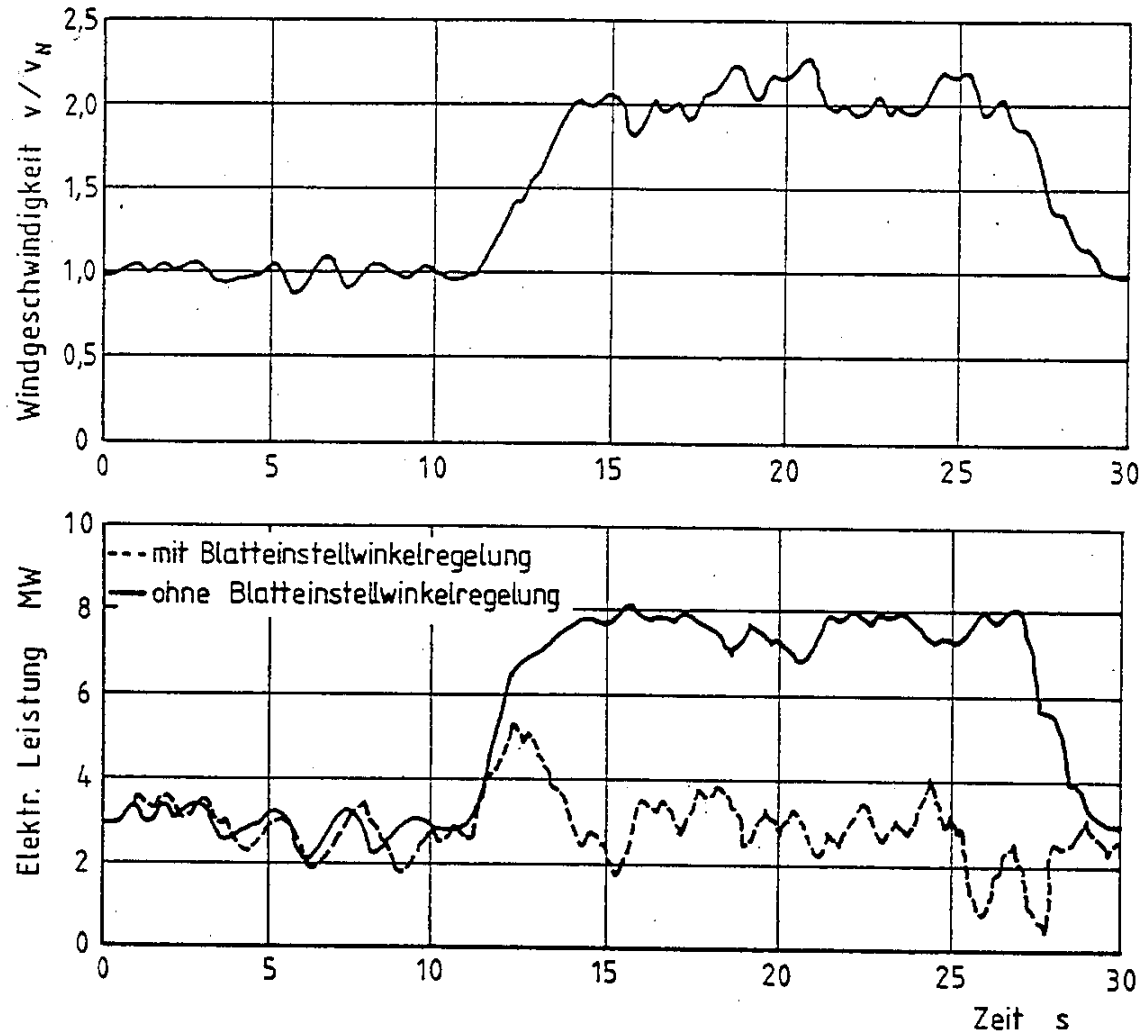
Bild 6.26. Blattwinkelrücksteuerung beim Pendelrotor

a) über ein mechanisches Gestänge

b) mit einer Schrägstellung der Pendelachse (δ_3 -Winkel)

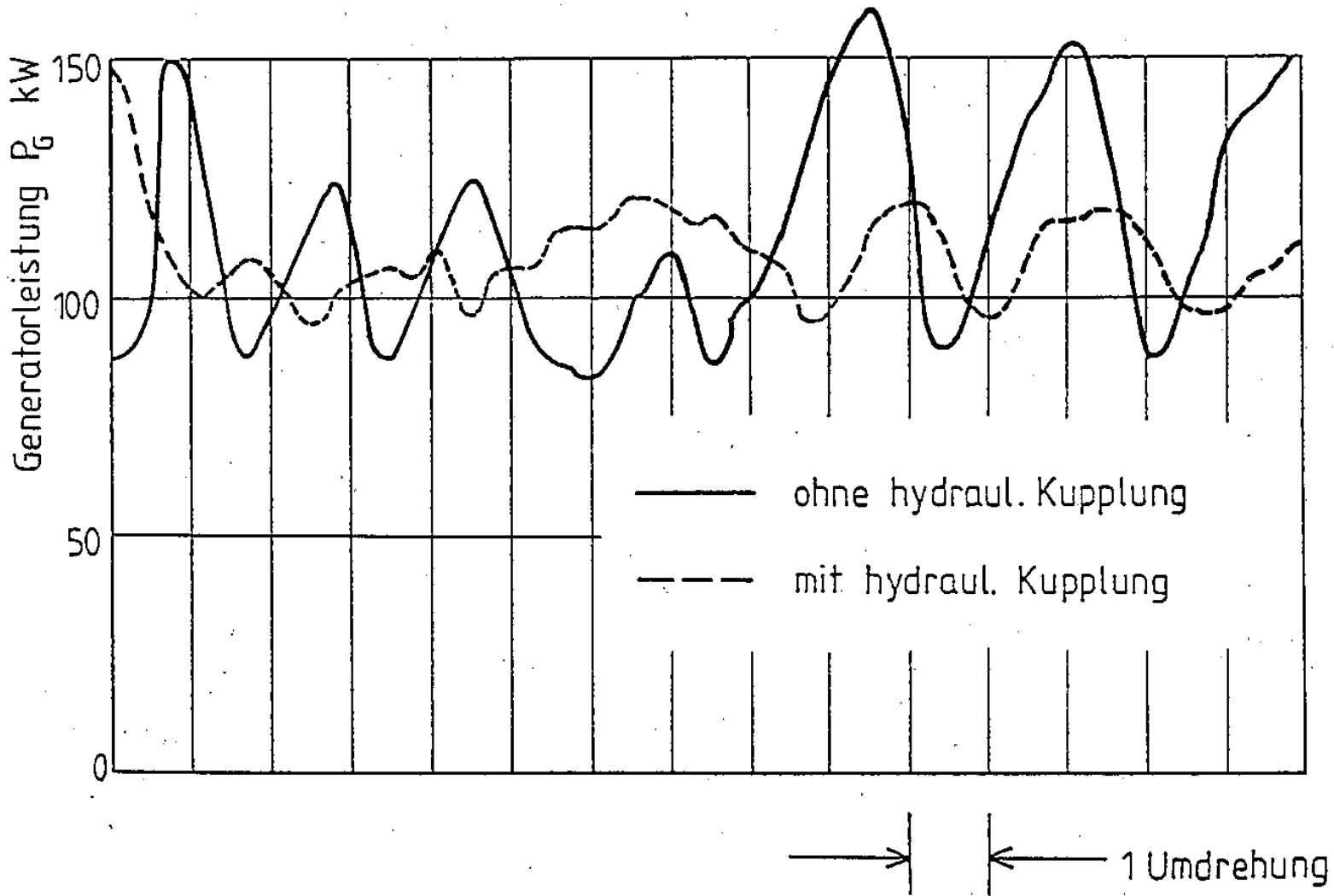
Strukturbelastungen

Blattwinkelrücksteuerung - Auswirkungen



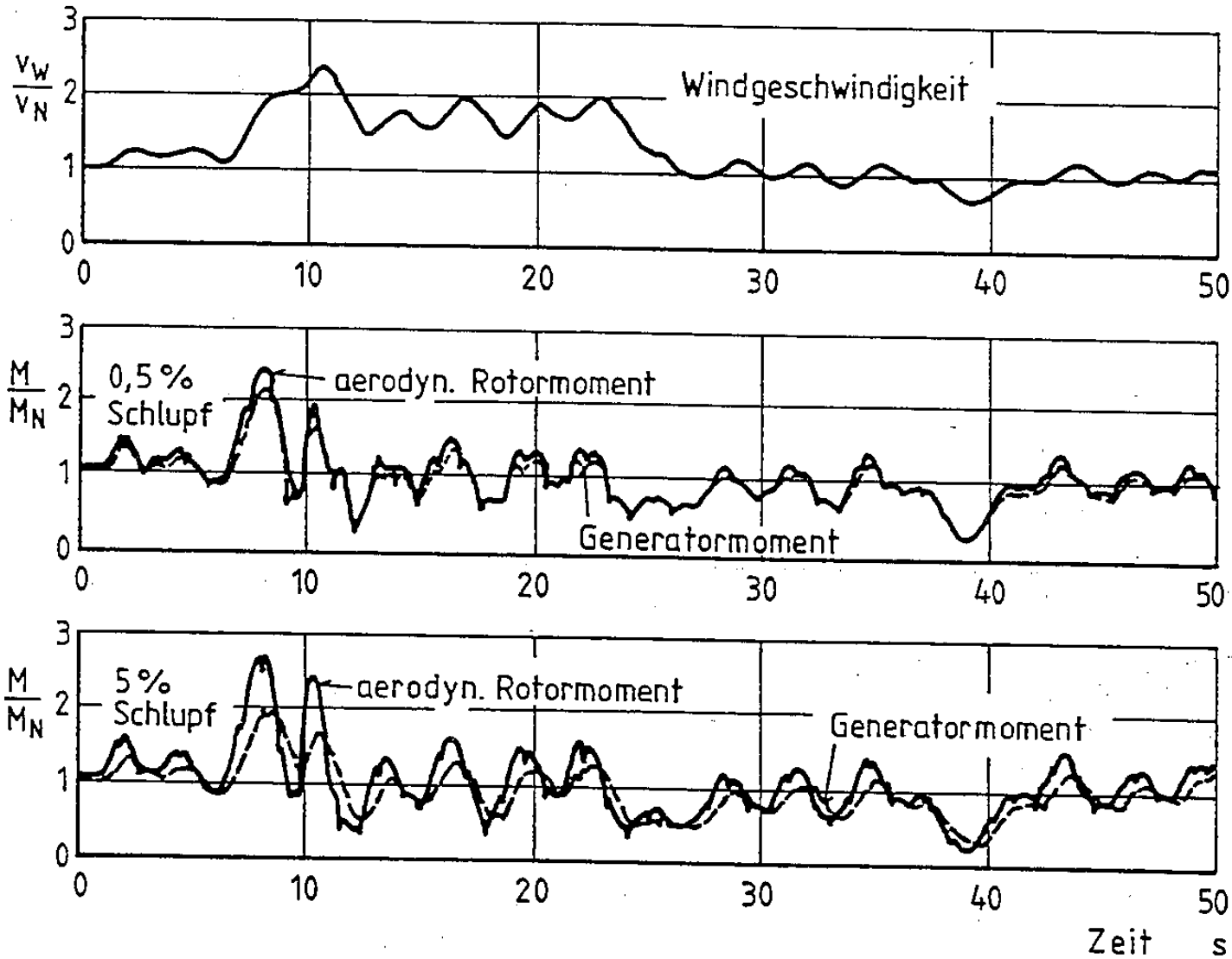
Strukturbelastungen

Hydraulische Kupplung



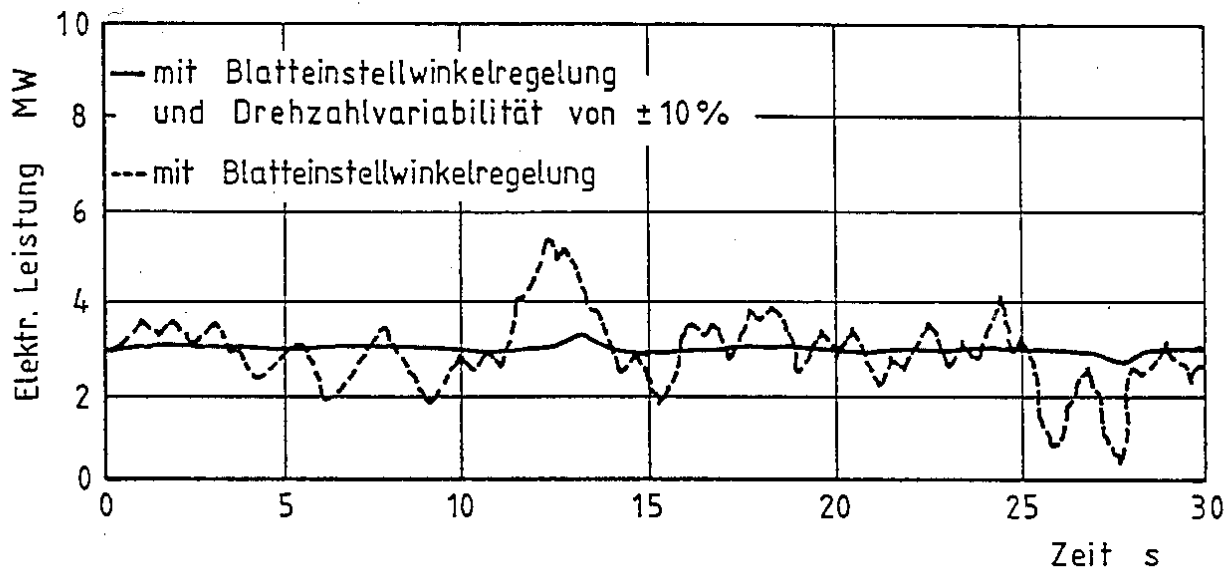
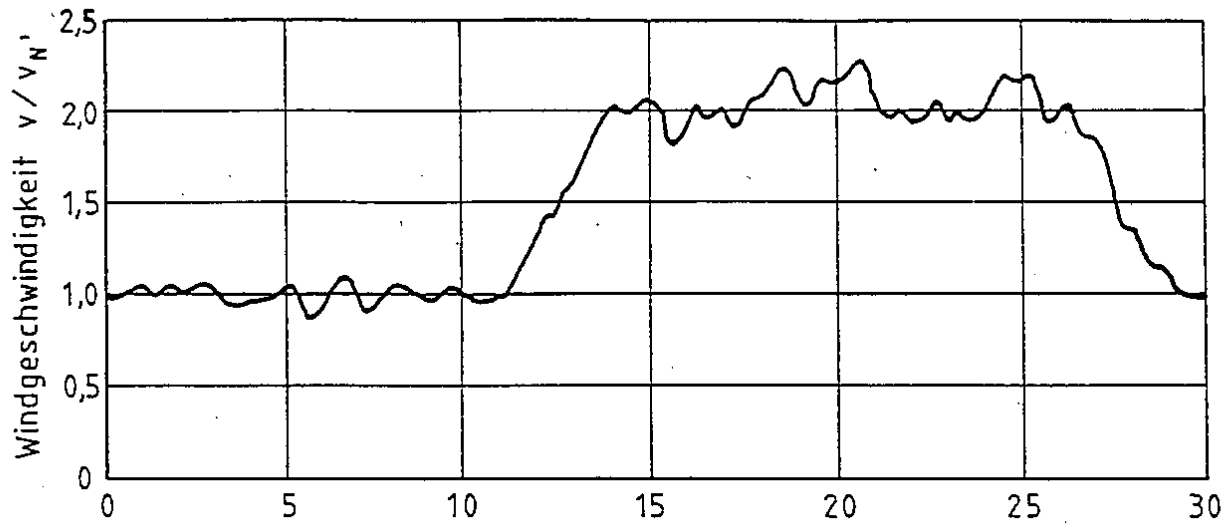
Strukturbelastungen

Asynchrongenerator



Strukturbelastungen

Drehzahlvariabler Synchrongenerator mit Frequenzumrichter

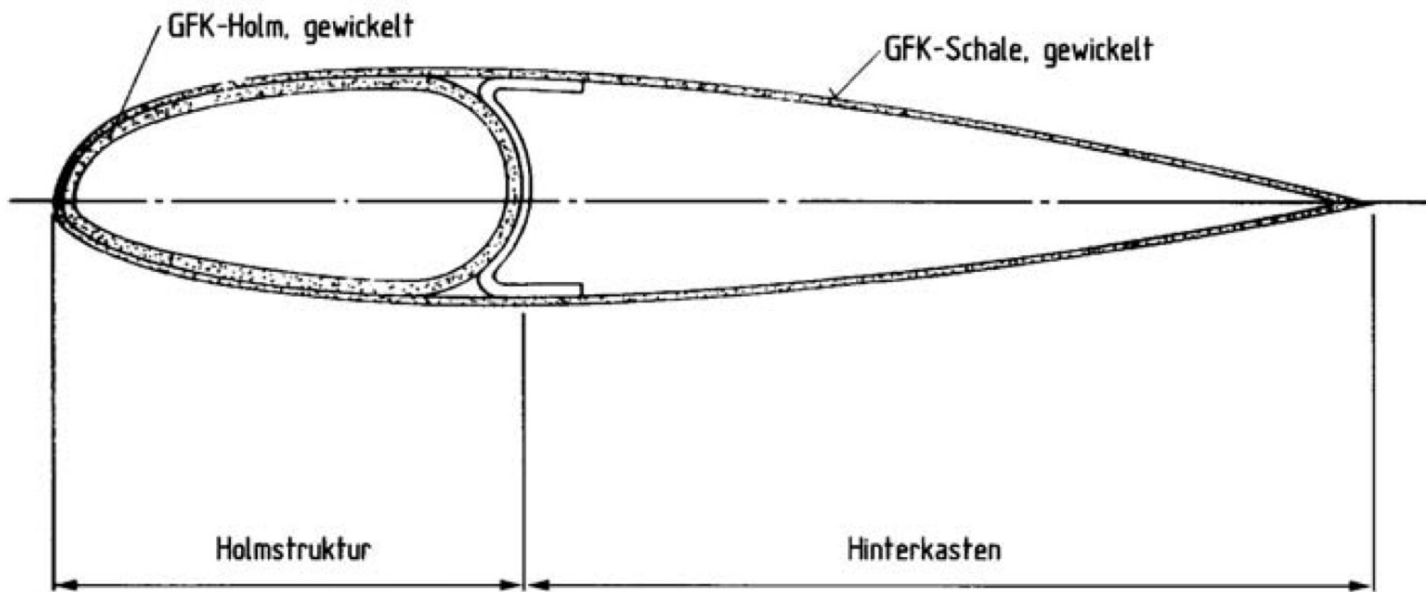
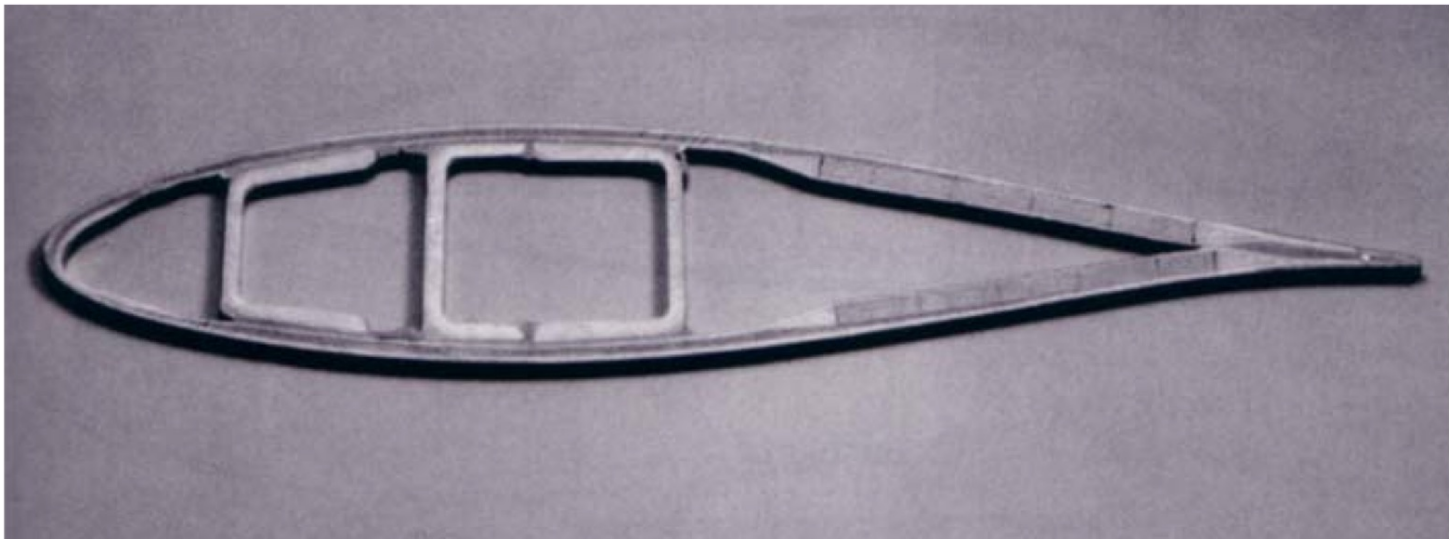


- **Nabe**
 - **Stahlguss**
 - **Schmiedeteile, Stahlblech**
- **Rotorblätter**
 - **Verstärkter Kunststoff**
 - Glasfaserverstärkter Kunststoff
 - Kohlenstofffasern
 - Epoxidharz als Bindemittel
 - **Holz, Holz-Epoxid, Holz-Fiberglas-Epoxid**
 - Selten, in der Entwicklung, recyclingfähig



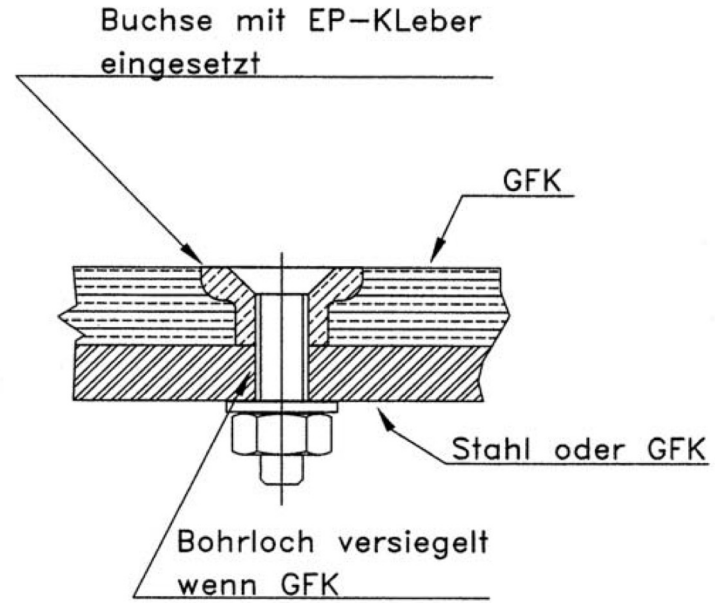
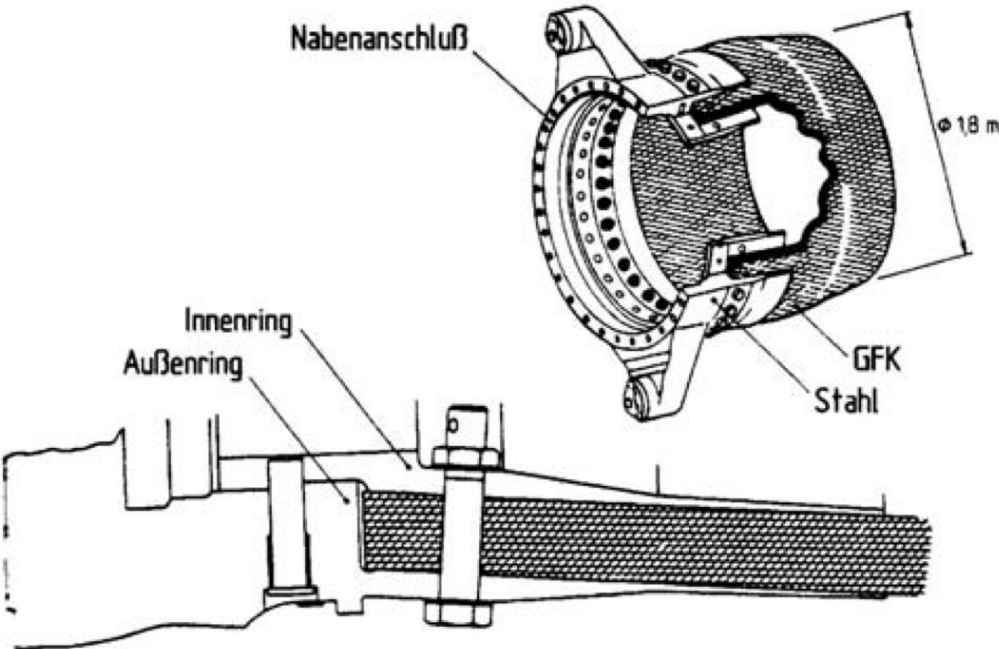
Strukturbelastungen

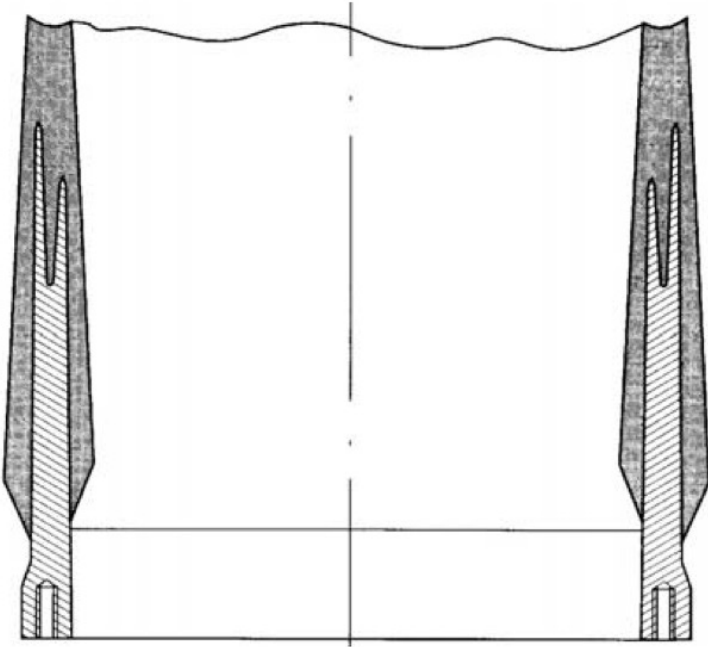
Rotorblatt GFK



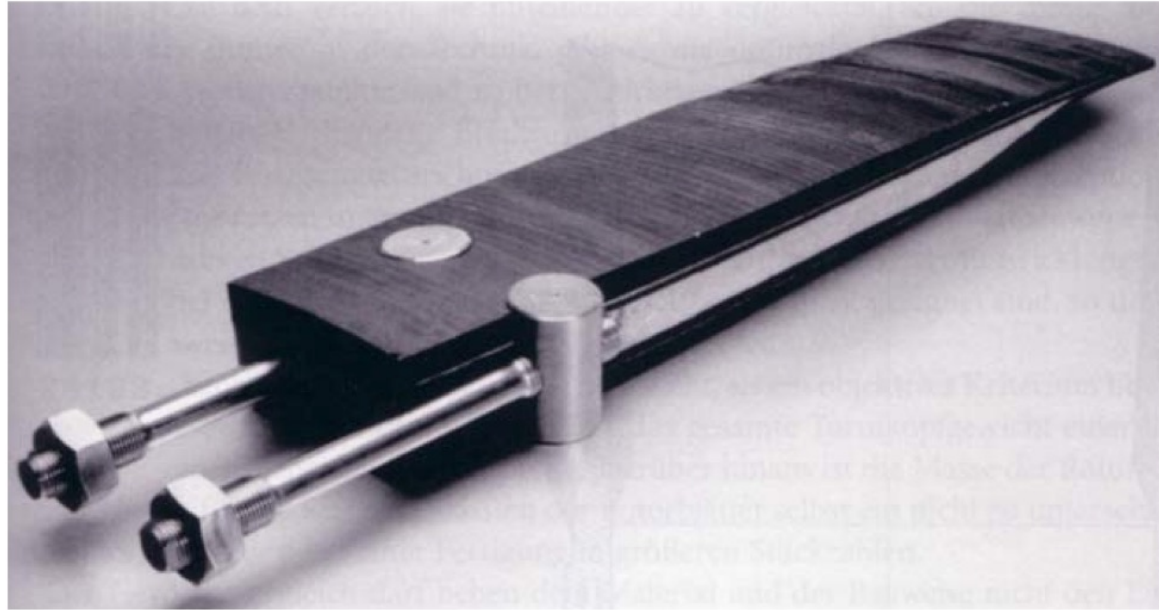
Strukturbelastungen

Nabenverbindung





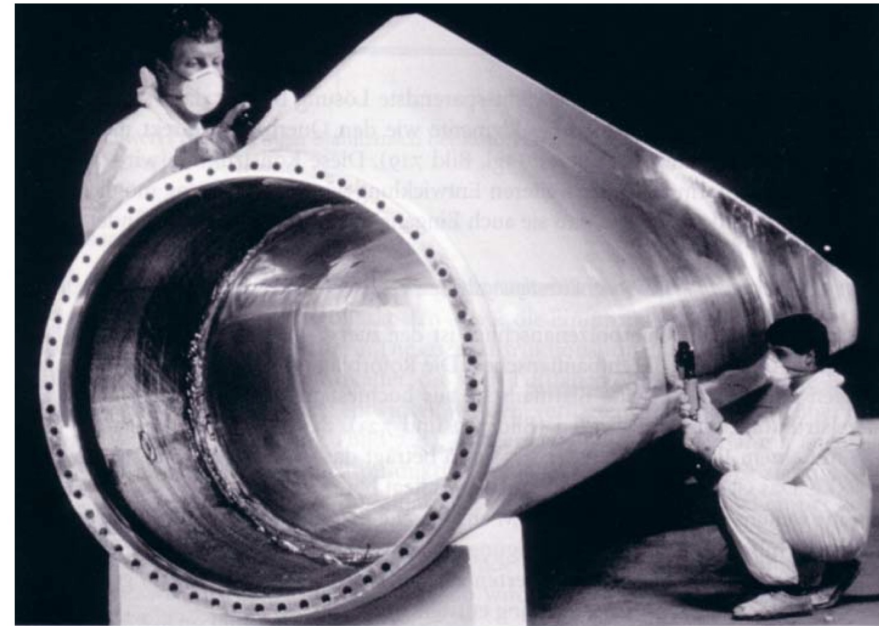
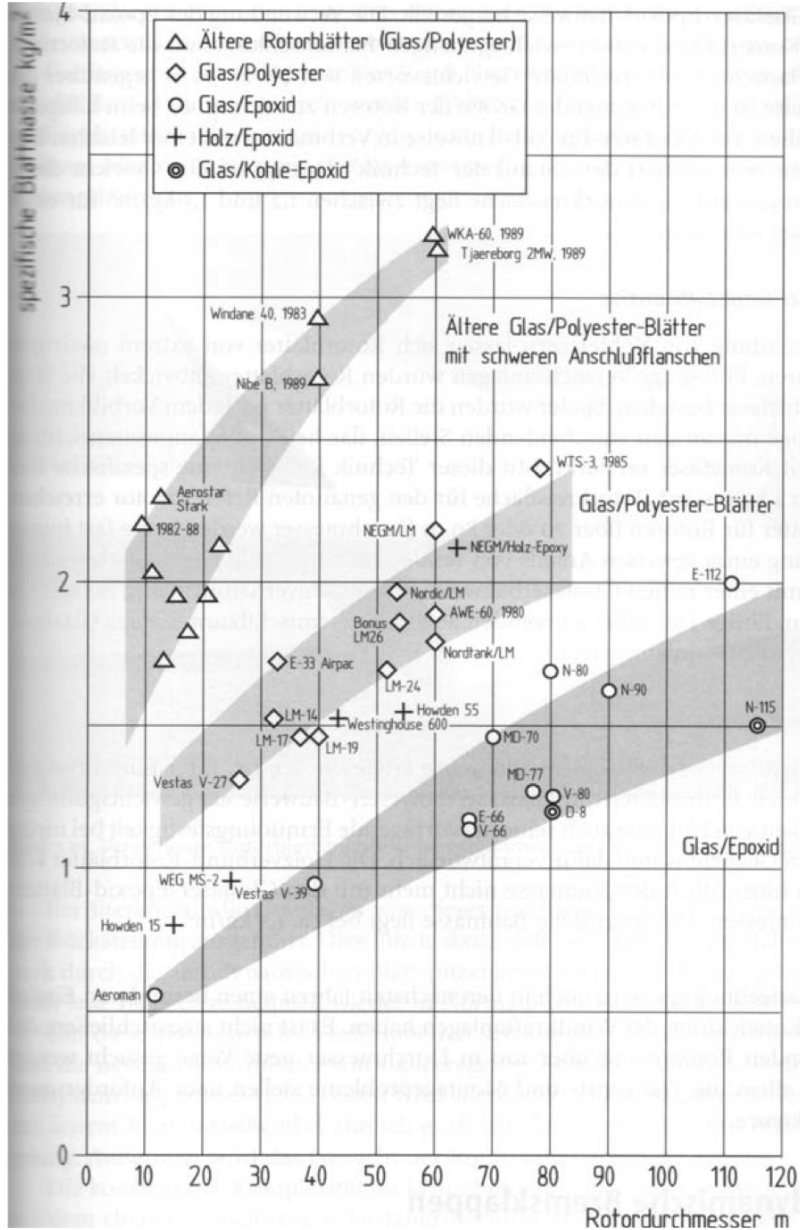
Leichtbauflansch



Querbolzen (Ikea-Anschluss)

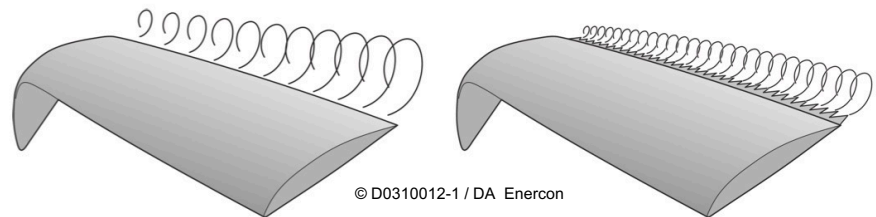
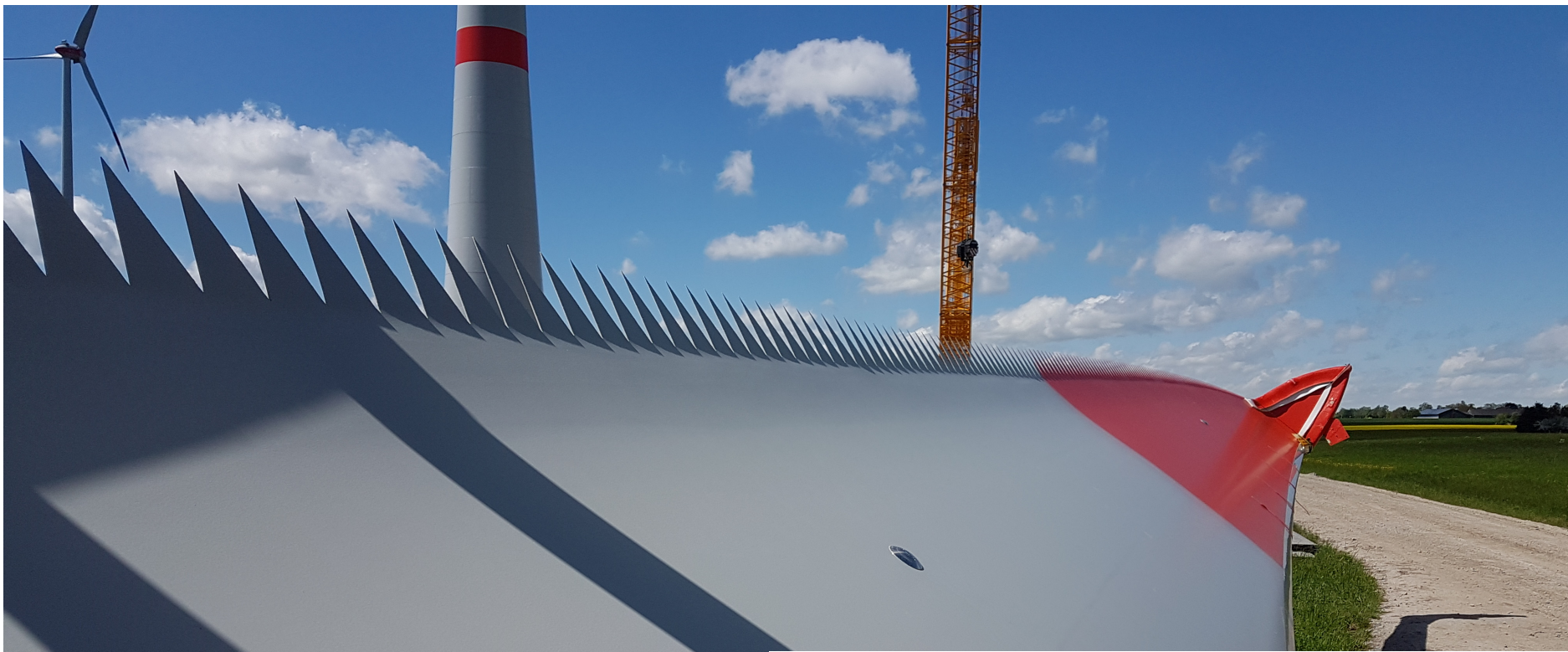
Strukturbelastungen

Rotorblatt Fertigung / Gewicht



Strukturbelastungen

Rotorblatt Geräuschminderung



Von Foto: Michael Paetzold, Lizenz: Creative Commons by-sa-3.0 de, CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68668334>

Strukturbelastungen

Rotorblatt Transport



Strukturbelastungen

Rotorblatt Defekte



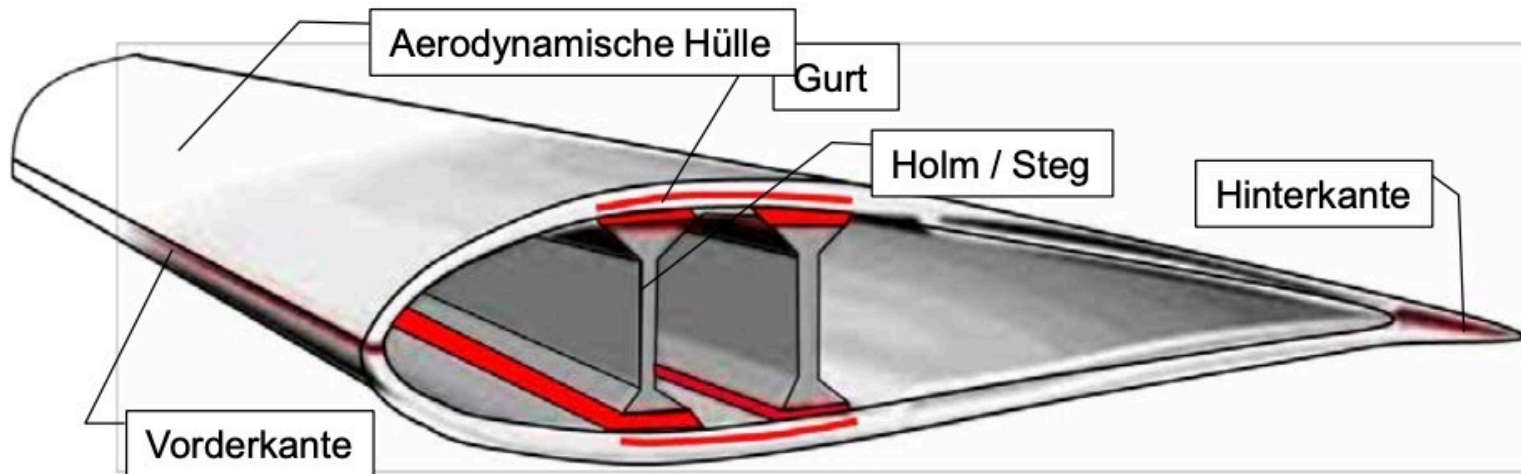
Schadenstypen an Rotorblättern

Schäden an der aerodynamischen Hülle

- Risse und Delaminationen, besonders an der Vorder- und Hinterkante
- Geplatze Rotorblattspitze nach Blitzeinschlag

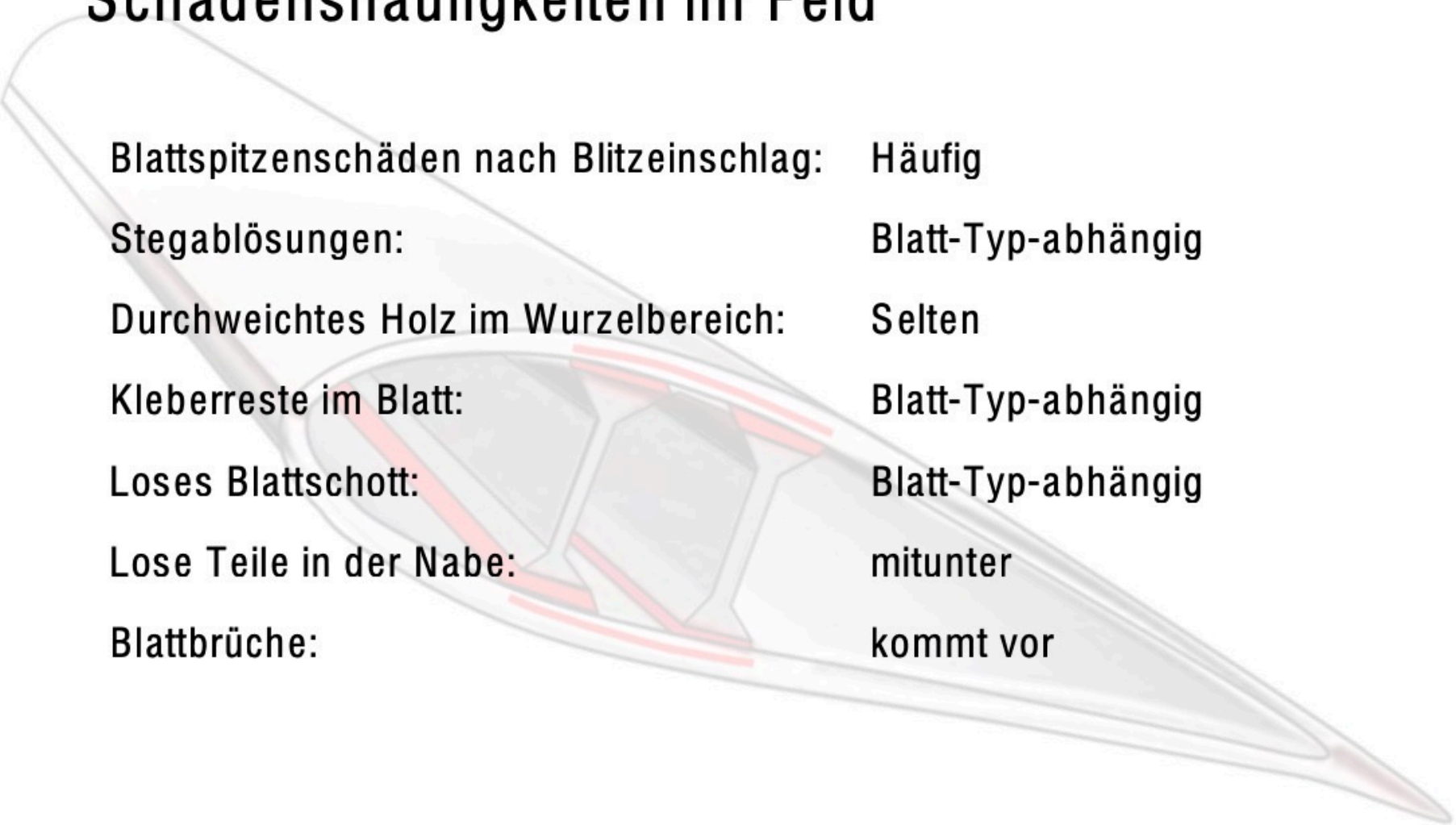
Strukturschäden kritischer Art

- Delaminationen / Brüche des Gurtes
- Delaminationen / Brüche des Holms oder bzw. des Stegs




Lose Teile

Schadenshäufigkeiten im Feld



Blattspitzenschäden nach Blitzeinschlag:	Häufig
Stegablösungen:	Blatt-Typ-abhängig
Durchweichtes Holz im Wurzelbereich:	Selten
Kleberreste im Blatt:	Blatt-Typ-abhängig
Loses Blattschott:	Blatt-Typ-abhängig
Lose Teile in der Nabe:	mitunter
Blattbrüche:	kommt vor

- **Beispiel Enercon E-126**
 - **Nabe inkl. Rotorblättern 320 Tonnen**
 - \varnothing 126m (12.667 m²) (4.000-10.000 m² )
 - **Gondel 120 Tonnen**
 - 18m x 6m x 6m (Einfamilienhaus)
 - **Generator 220 Tonnen**
 - Synchrongenerator hat höheres Gewicht

Strukturbelastungen Gondel (Maschinenhaus)



Strukturbelastungen

Gondel (Maschinenhaus)



© <https://www.werdumer-blatt.de/Seiten/013/05/Windpark.html>

Strukturbelastungen

Gondel (Maschinenhaus)



© <https://www.werdumer-blatt.de/Seiten/013/05/Windpark.html>

- Gewicht von Gondel und Rotor
- Lasten durch Windschwankungen
- Konstruktion
 - Röhren
 - Beton (in-situ oder Fertigteile)
 - Stahl (2-4 Segmente)
 - Hybrid
 - Holz (untersucht – 100m implementiert)
 - Gittermast (Stahl – USA, Indien)
 - Abgespannte Masten
- $h > 80\text{m}$ Fahrstuhl oder Lift
- 15-20% der Investitionskosten
 - Kosten versus jährlicher Energieertrag

Strukturbelastungen

Turmkonzepte II

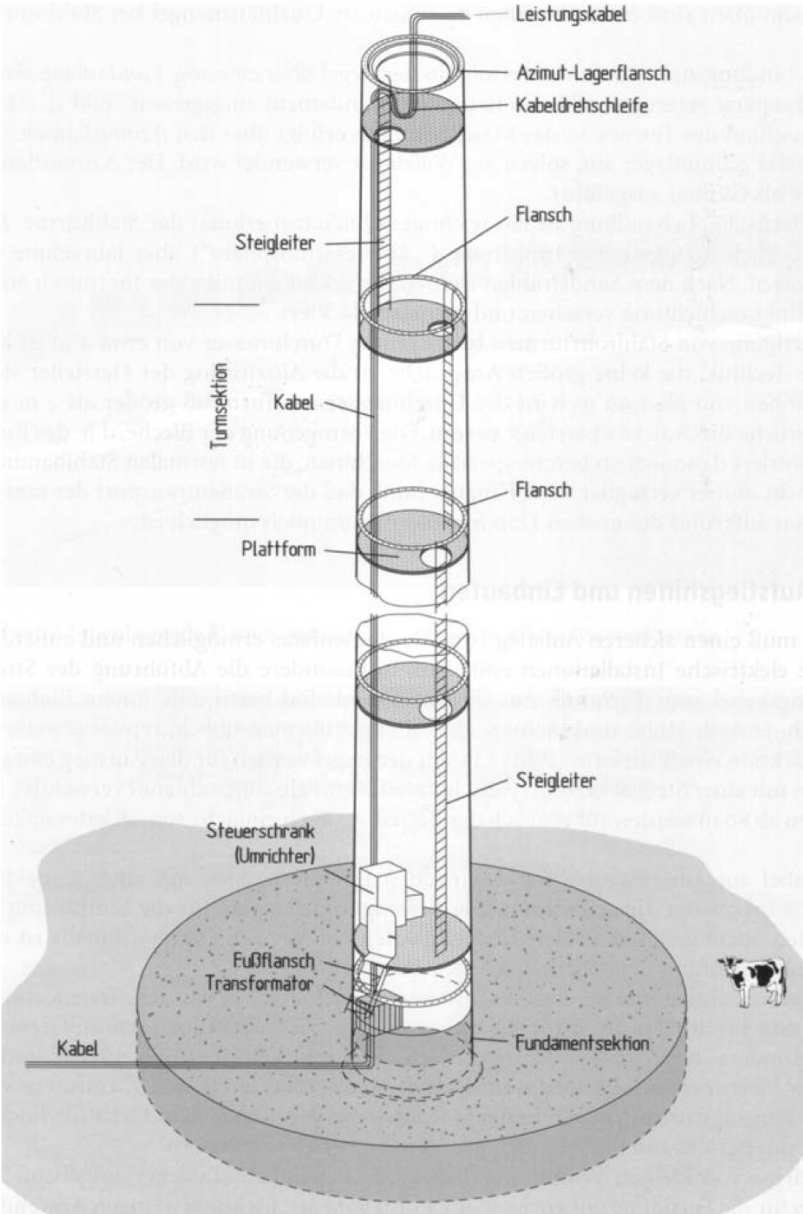
Windkraftanlage	Stahl					Beton		
	zylindrisch	zylindrisch mit konischem Fuß	konisch	zylindrisch mit Abspannung	Gitterbauweise	Fertigteilbauweise	Ortbeton	Ortbeton
Rotor: 3-Blatt								
Durchmesser: 60 m								
Drehzahl: 23 U/min								
Kopfmasse: ca. 180 t								
Nabenhöhe: 50 m								
Turmhöhe: 46,6 m								
1. Biegeeigenfrequenz [Hz]	0,567	0,577	0,570	0,551	0,60	0,65	0,941	0,947
Vielfaches der Nenndrehzahl [P]	1,48	1,51	1,49	1,44	1,57	1,70	2,45	2,47
Oberer Durchmesser [m]	3,5	3,5	3,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Unterer Durchmesser [m]	3,5	7,1	4,4	2,5	11,6	3,5	8,4	5,5
Wandstärke [mm]	55 + 15 gestuft	25 15 gestuft	30 15 gestuft	20/15 gestuft	16/10	520/250 gestuft	300	300
Masse								
- Turm ¹⁾ [t]	150	120	111	40	110	465	485	477
- Einbauten [t]	22	22,5	22,8	20	22,5	21	22,5	22,5
Gesamtmasse ²⁾ [t]	172	142,5	133,8	60+Spannseile	ca. 120	486	507,5	499,5
Ungefähre Kostenrelation [%]	100	90	85	95	70	60	75	75

¹⁾ inkl. Aussteifungen und Anschlussflansche

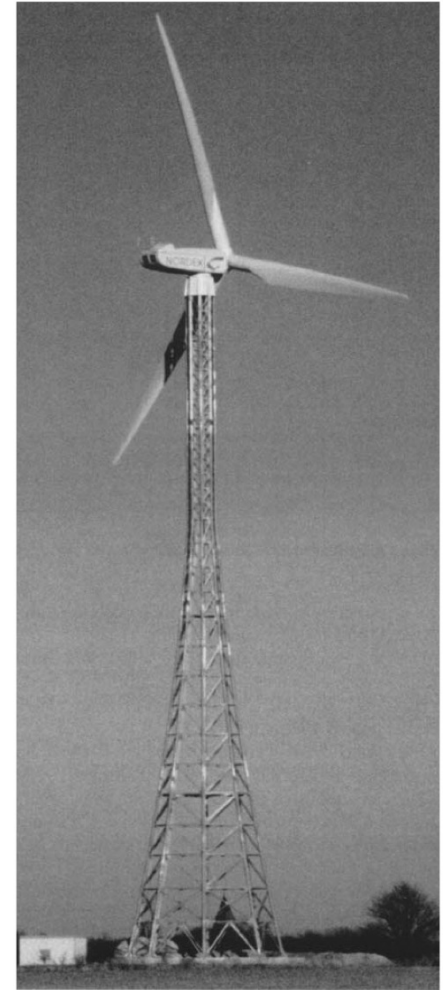
²⁾ inkl. Einbauten

Strukturbelastungen

Turmkonzepte II



Growian



Stahlbeton
konisch

Strukturbelastungen

Turmkonstruktionen



Strukturbelastungen Turmgrößen



Strukturbelastungen Konstruktion



Strukturbelastungen

Konstruktion (Turm inkl. Aufzug E-126)



© <https://www.werdumer-blatt.de/Seiten/013/05/Windpark.html>



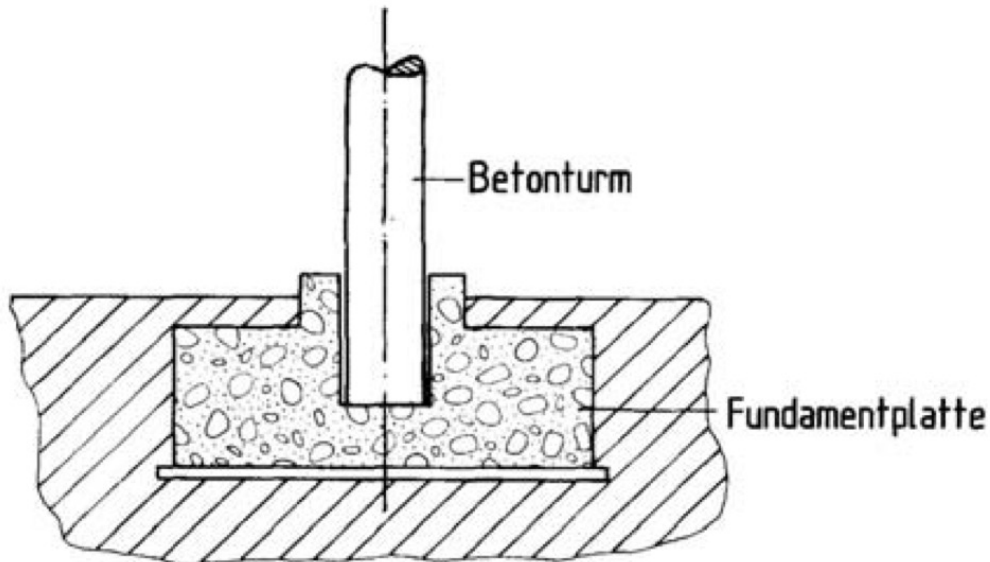
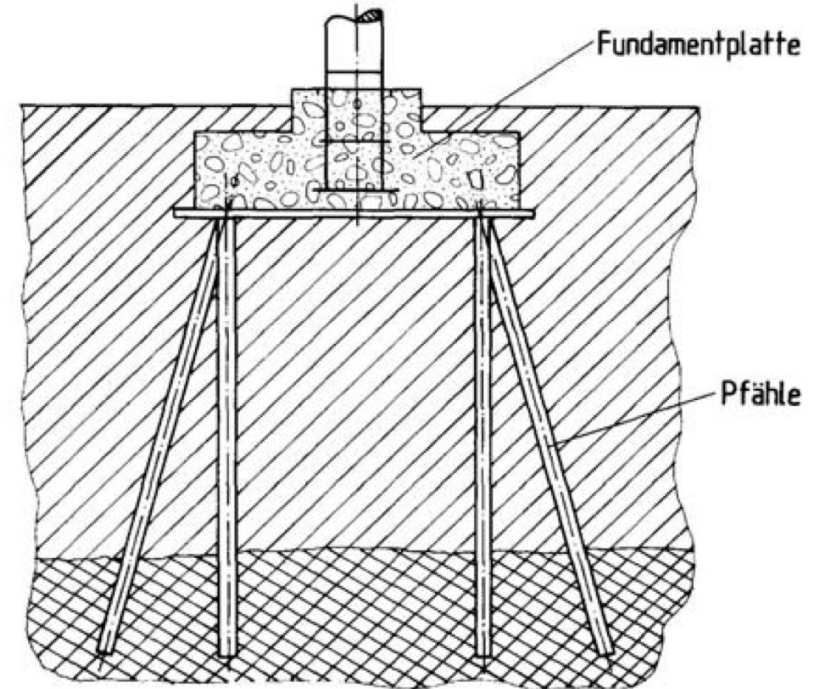
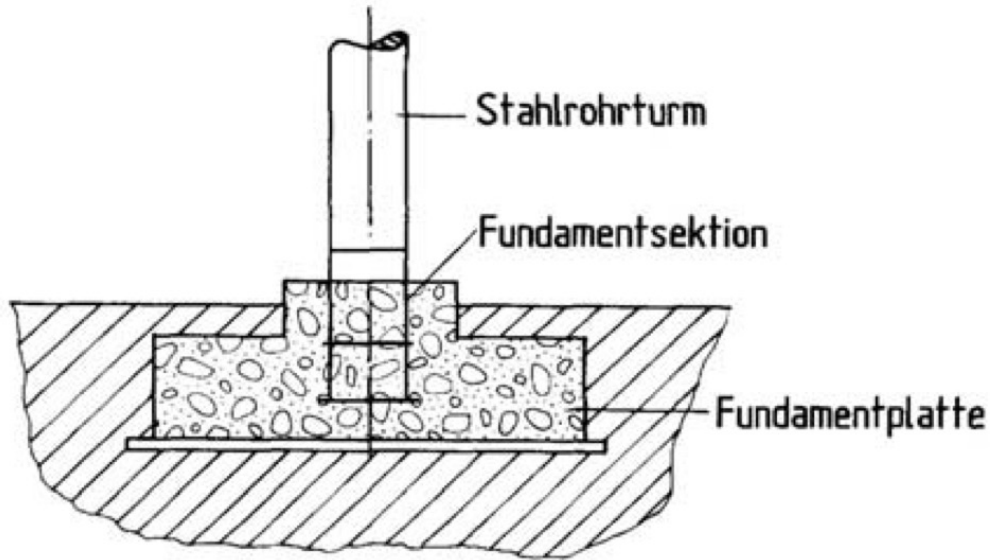
© <https://www.werdumer-blatt.de/Seiten/013/05/Windpark.html>

E-126

- Turmgewicht 2.400 Tonnen
- 135 m
- 35 Ringe zu je 16,5m

Strukturbelastungen

Fundamente



E-126

- \varnothing 20-30 m
- 4 m Tiefe
- Pfahlgründung ca. 15 m
- 3.500 Tonnen

Strukturbelastungen

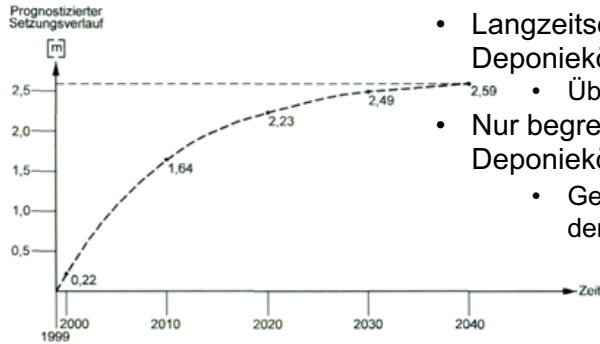
Fundamente II



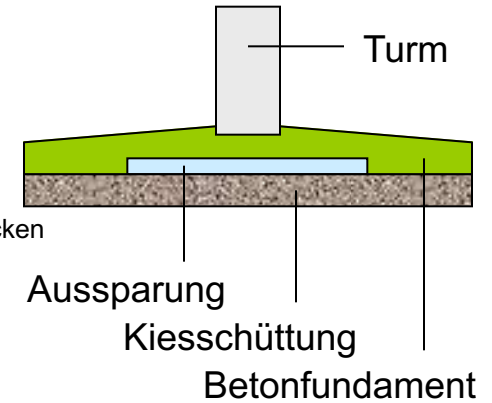


Strukturbelastungen

Fundament Windmühlenberg Karlsruhe



- Langzeitsetzungen infolge organischer Umsetzungen im Deponiekörper
 - Über 3m Setzung erwartet
- Nur begrenzte statische und dynamische Steifigkeit des Deponiekörpers
 - Gefahr des „Aufreitens“ in der Fundamentmitte durch Eindrücken der Ränder bei wechselnder Momentenbelastung

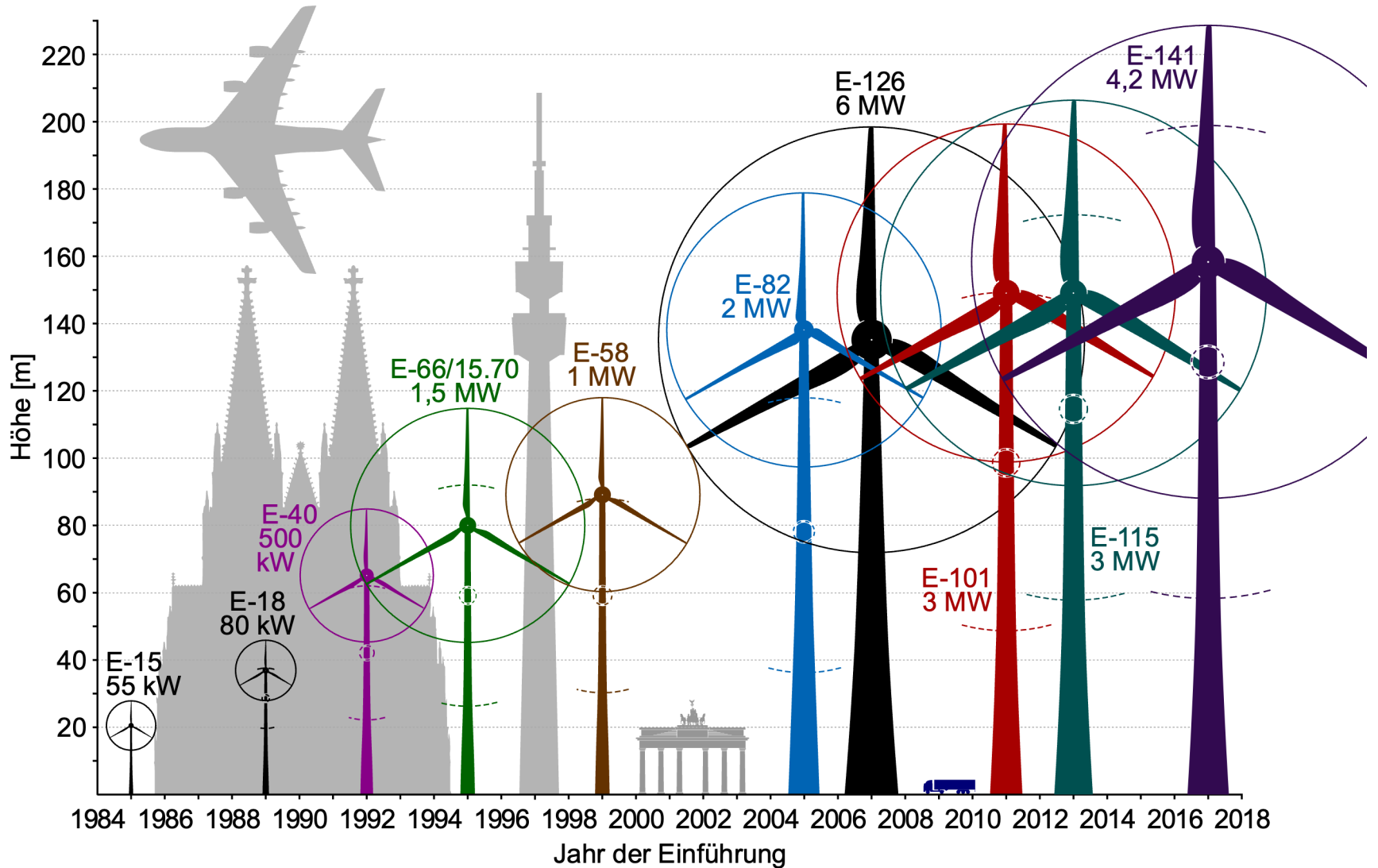


Ringfundament

- Durchmesser 19m, Kernfläche mit einer
- Durchmesser von 10m ausgespart

Strukturbelastungen

Anlagengröße ... bis 6 MW !



1cm = 1 Jahr