



EIFER

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

Strukturbelastungen Strukturen

KIT





EIFER

Überblick

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



Strukturbelastungen

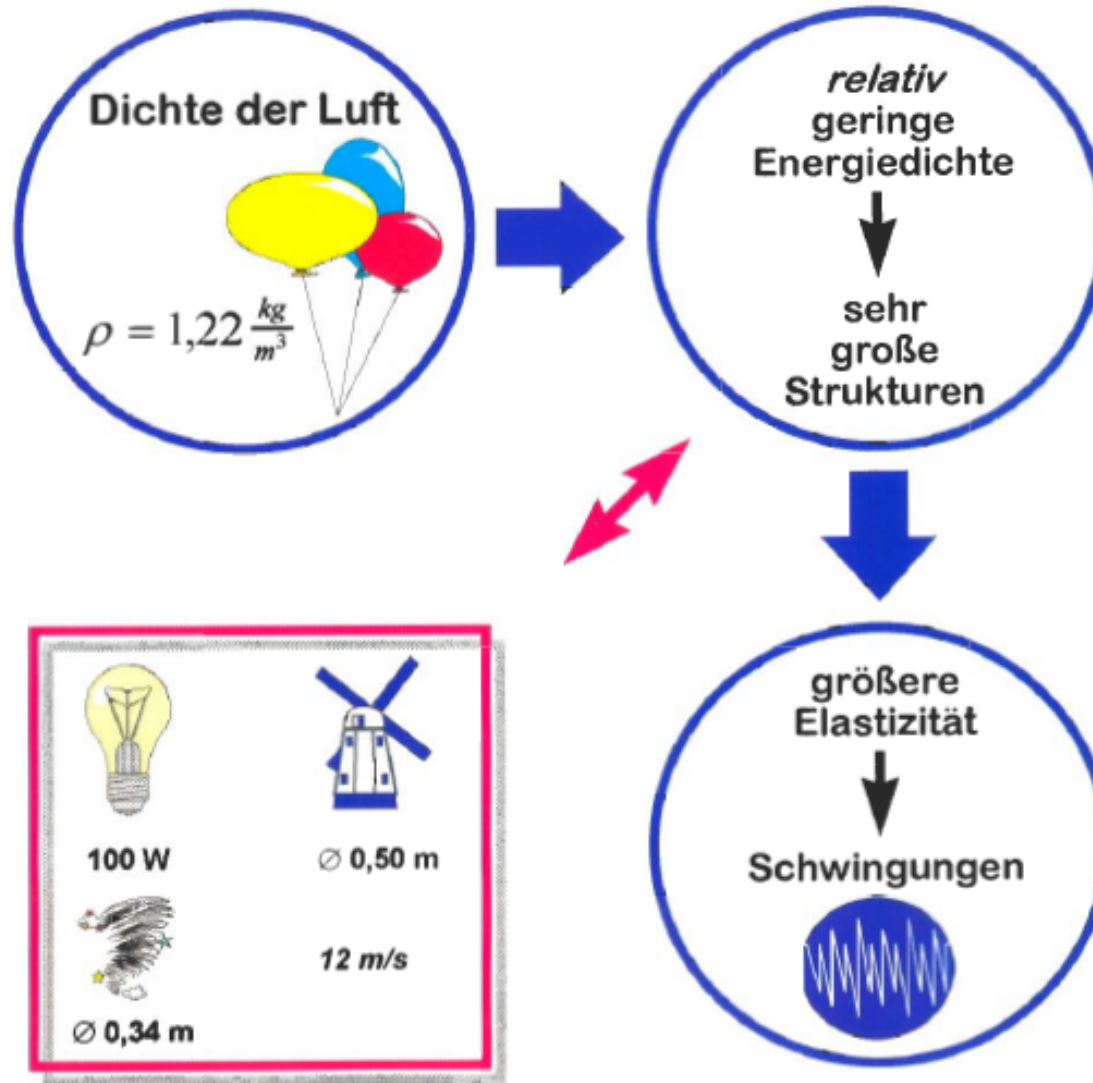
Ursachen - Natur des Windes





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>
	mech. Einwirkung	<i>Tornado etc. außerhalb der Berechnung</i>
Störung	Winkelregelung	<i>aerodynamischen Belastungen</i>
	Nachführregelung	<i>extreme Schräganströmung - hohe Giermomente</i>
	Generatorkurzschluß	<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	Turmumströmung	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*
- Biegelastizität
 - *zu viele Freiheitsgrade*

Drehzahlnachgiebigkeit

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

Drehzahlelastizität

- 80-120% Drehzahlvariabel
 - *Frequenzumrichter*



EIFER

Strukturbelastungen

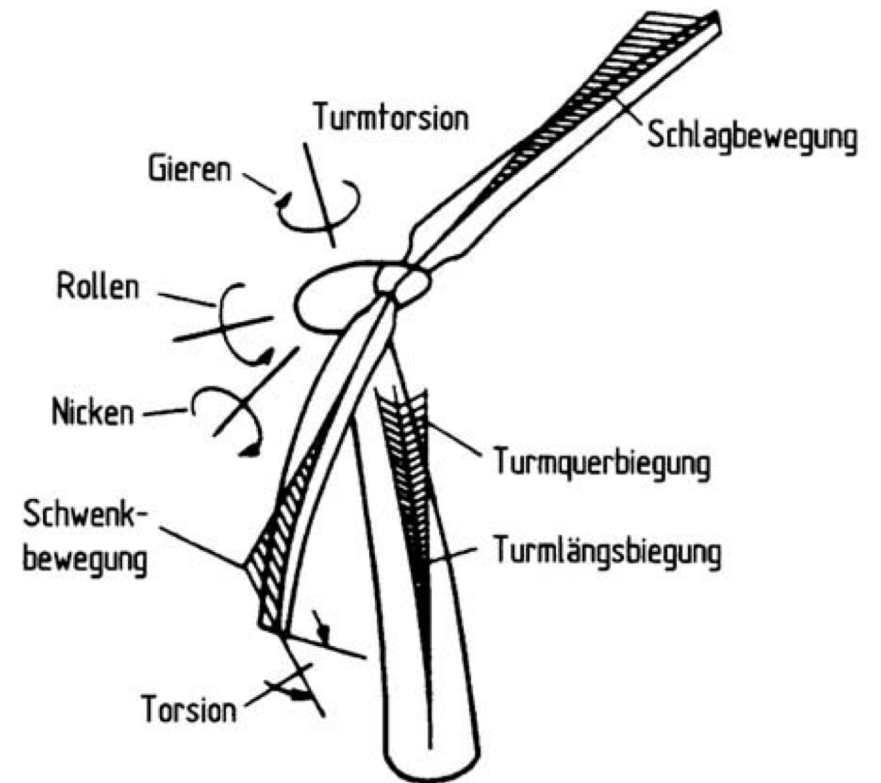
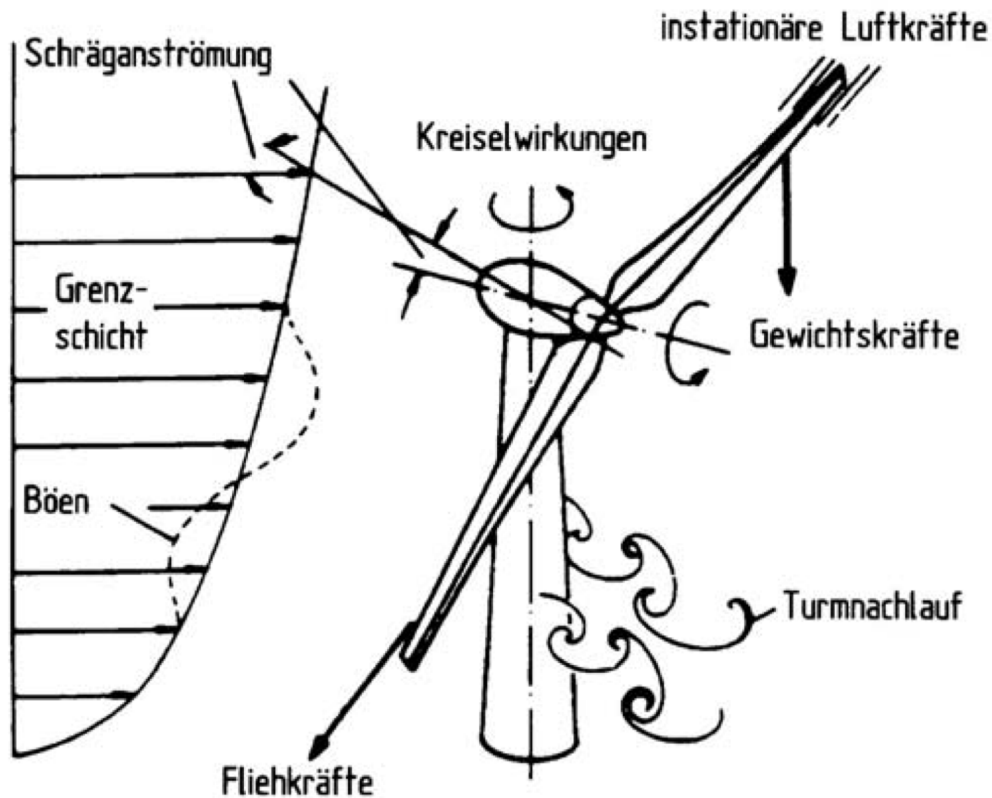
Entwurfslasten - Massenkräfte

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

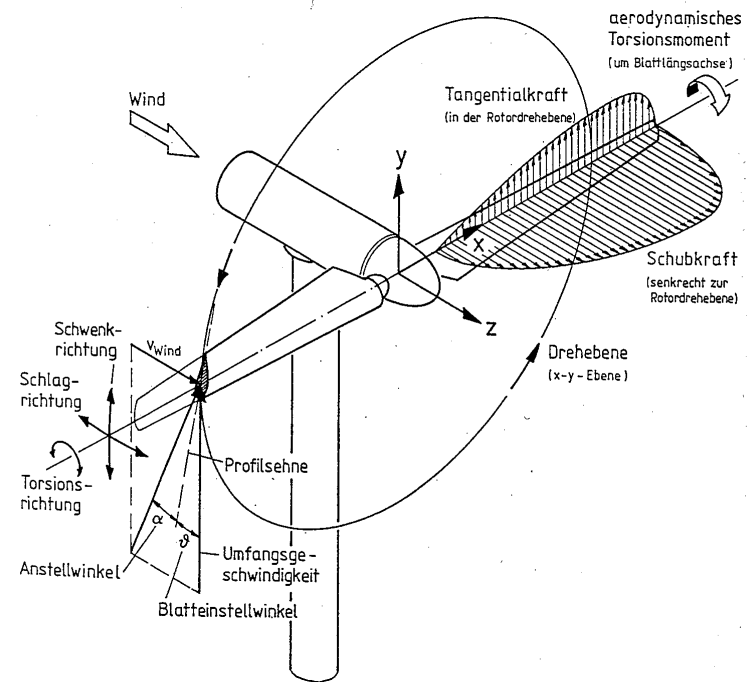




Strukturbelastungen

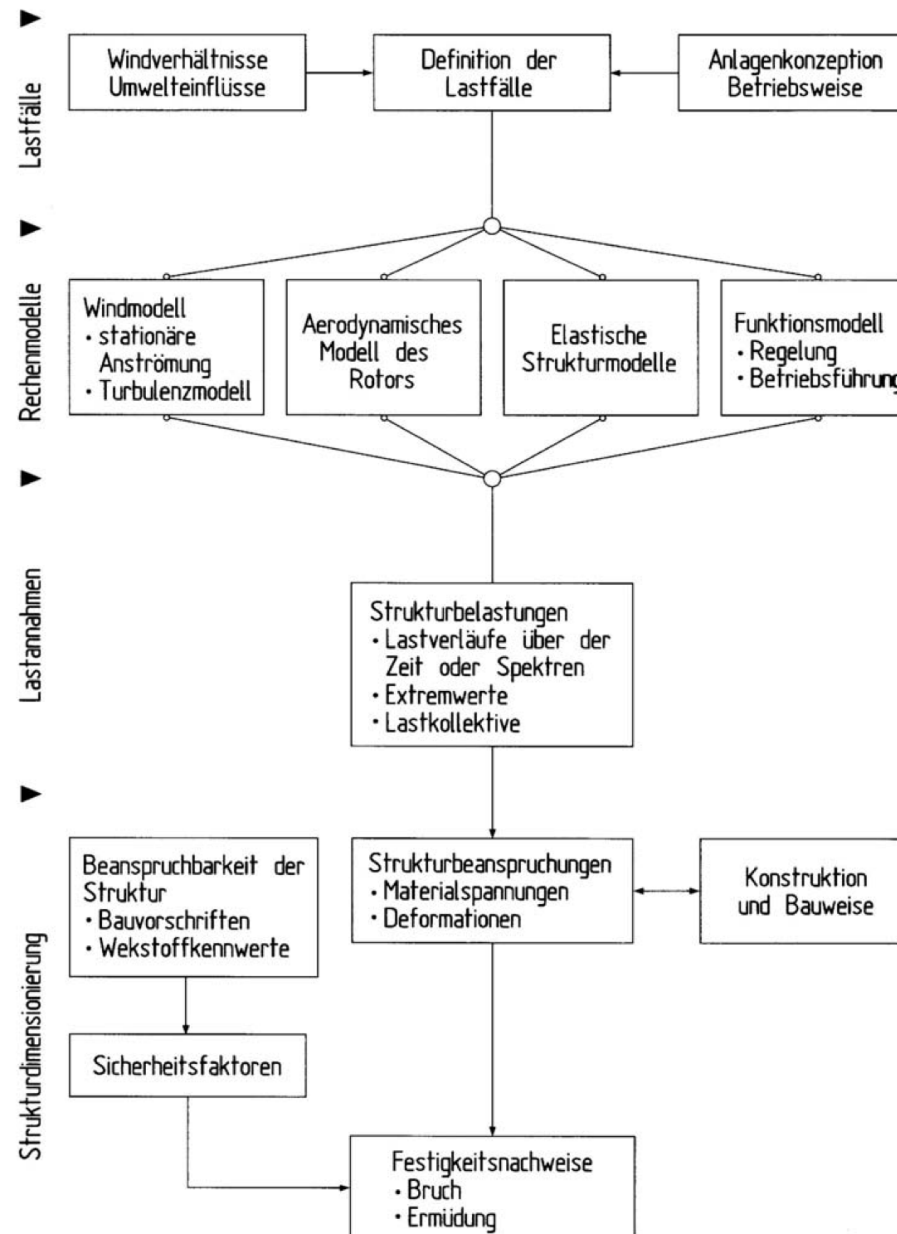
Krafteinteilung

durch:	Luftkräfte	Massenkräfte
Stationäre Belastungen	<p>mittlere Windgeschwindigkeit</p>	<p>Fliehkräfte</p>
Instationäre Belastungen mit der Drehzahl periodisch wechselnde Belastungen	<p>Höhenprofil der Windgeschwindigkeit</p> <p>Turmschatten beim leeseitigen Rotor</p>	<p>Gewichtskräfte</p> <p>Kreisel- und Corioliskräfte</p>
	<p>Schräganströmung</p> <p>Turmvorstau beim luvseitigen Rotor</p>	
nicht periodische, stochastische Belastungen	<p>Winturbulenzen</p>	



Strukturbelastungen

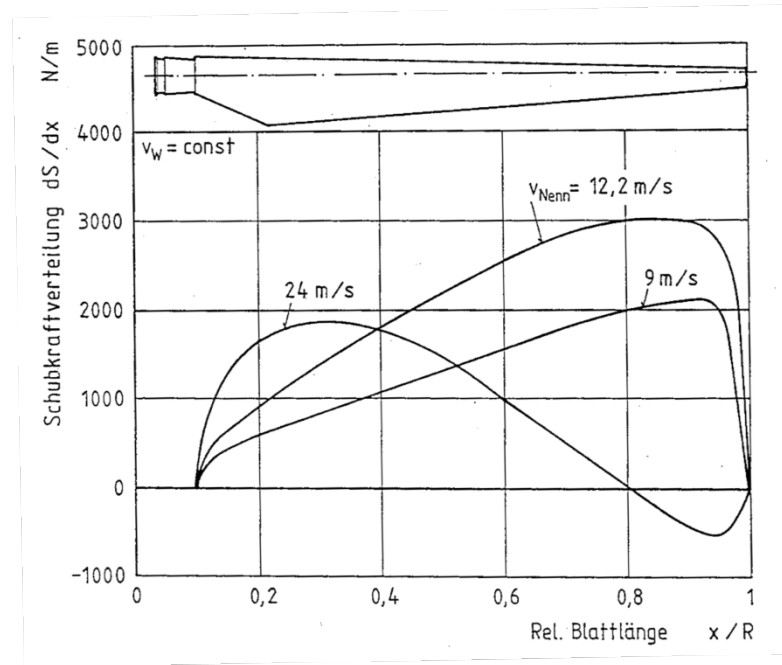
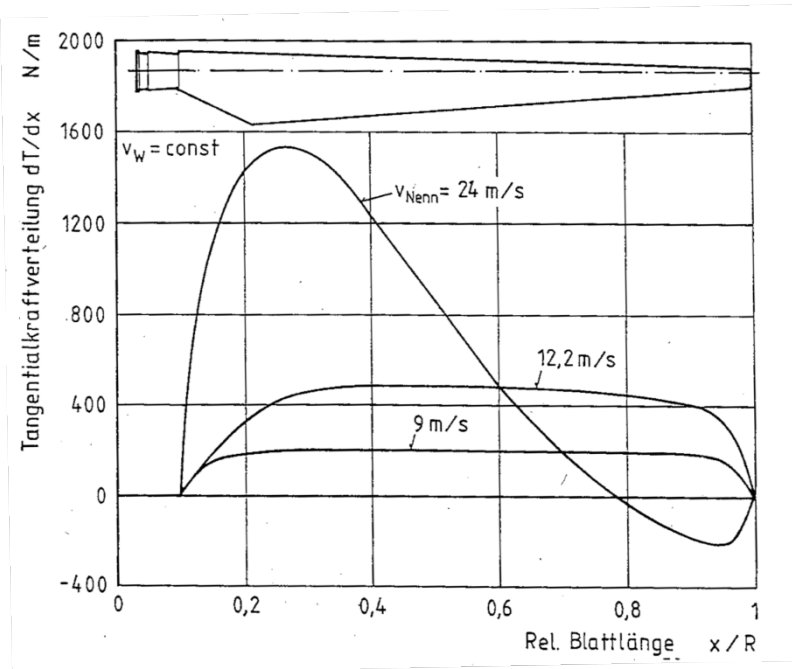
Struktogramm des Vorgehens





Strukturbelastungen

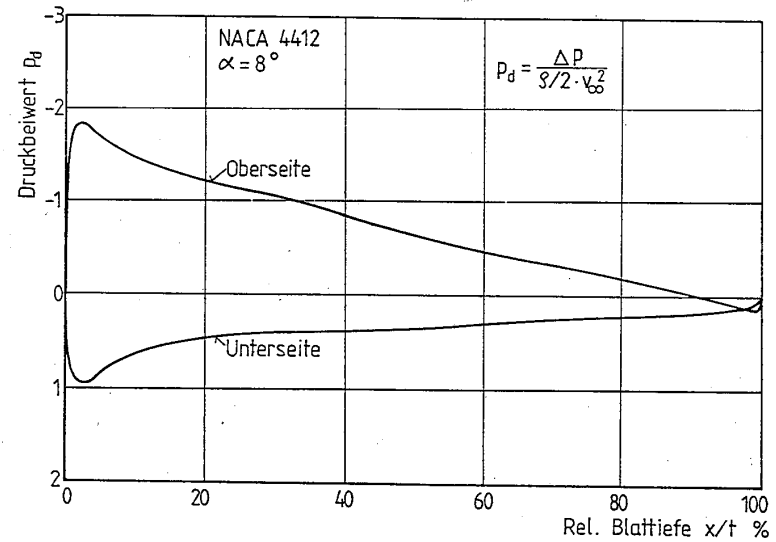
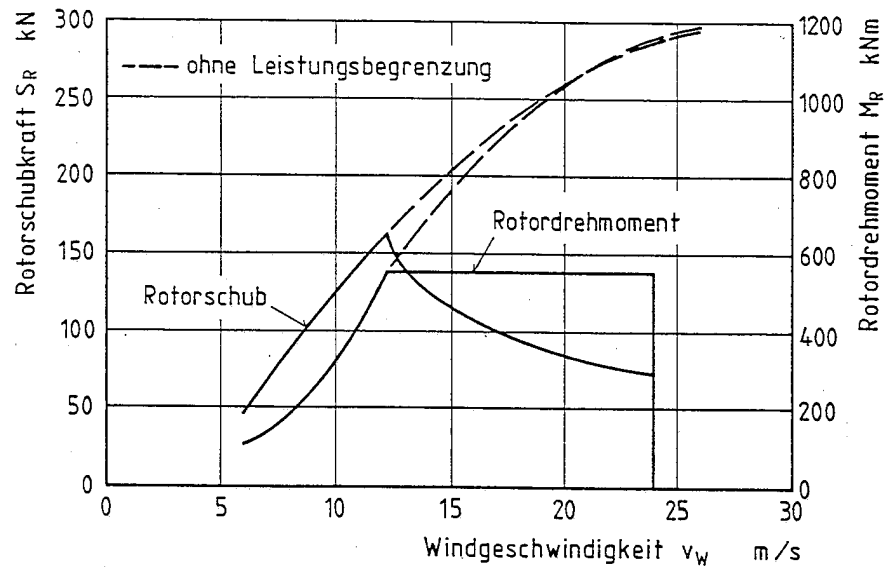
Tangentialkraft - Schubkraft





Strukturbelastungen

Rotorschub und Rotordrehmoment / Druckverteilung

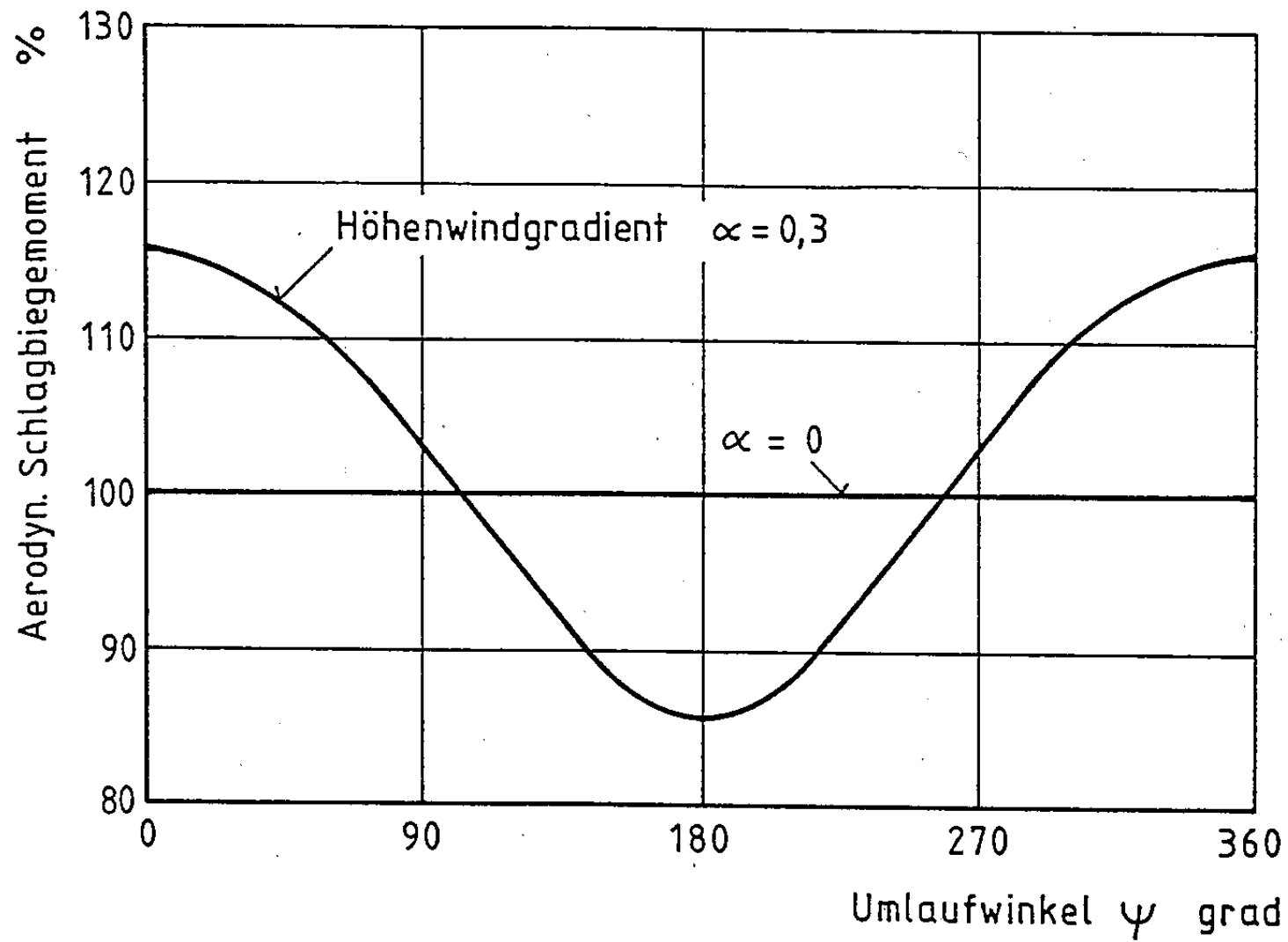


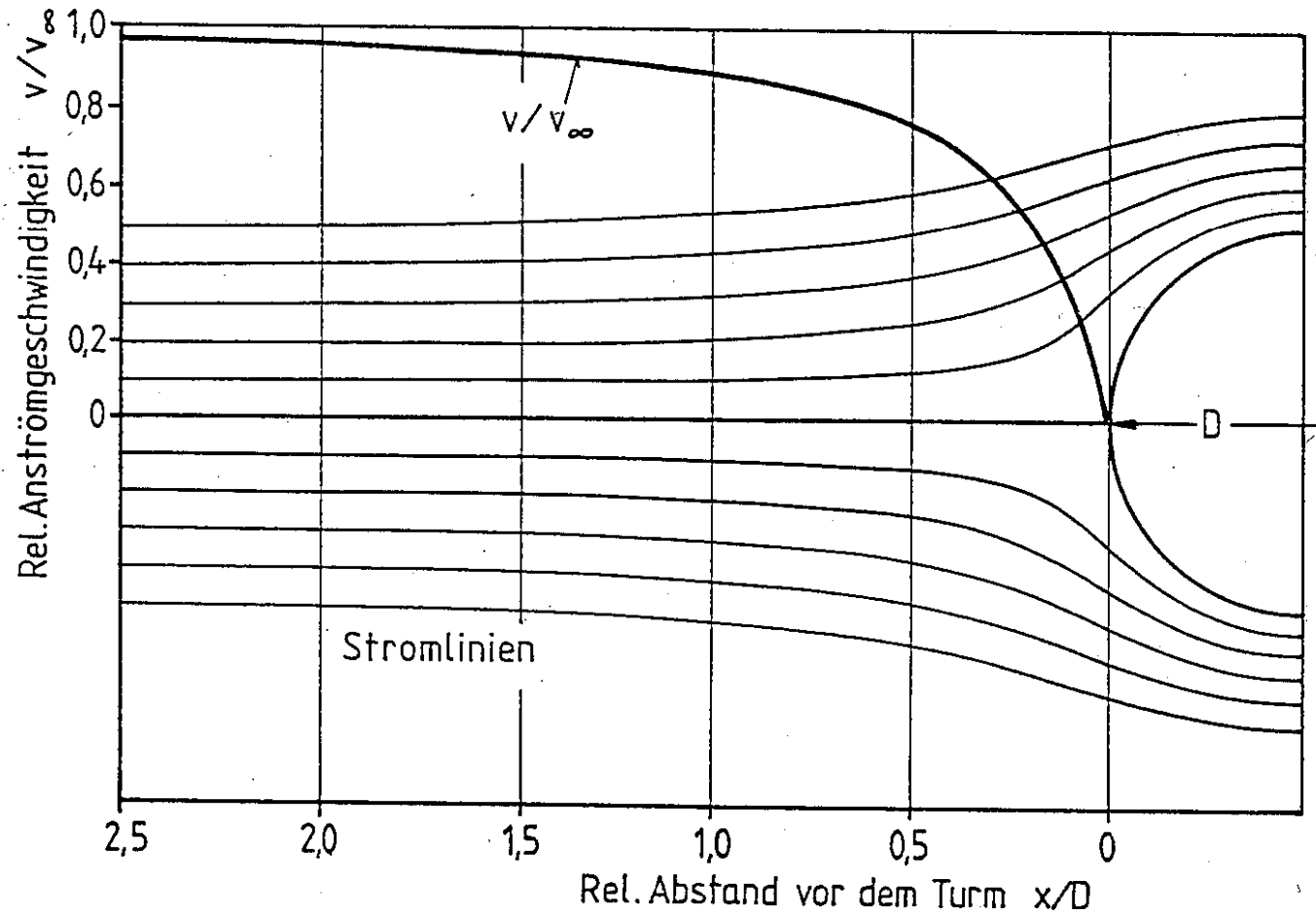


EIFER

Strukturbelastung

Umlaufperiodisches Schlagbiegemoment

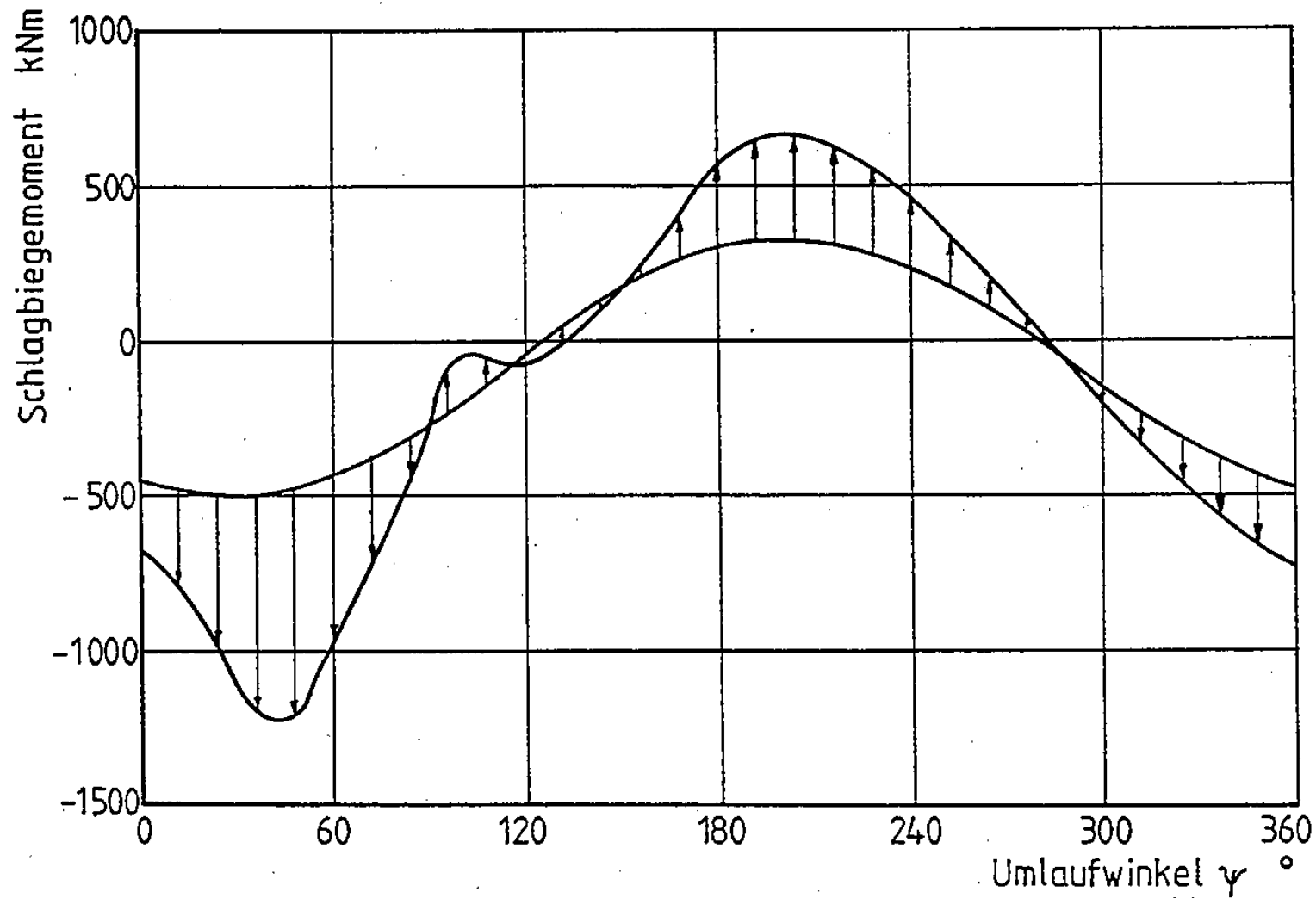






Strukturbelastungen

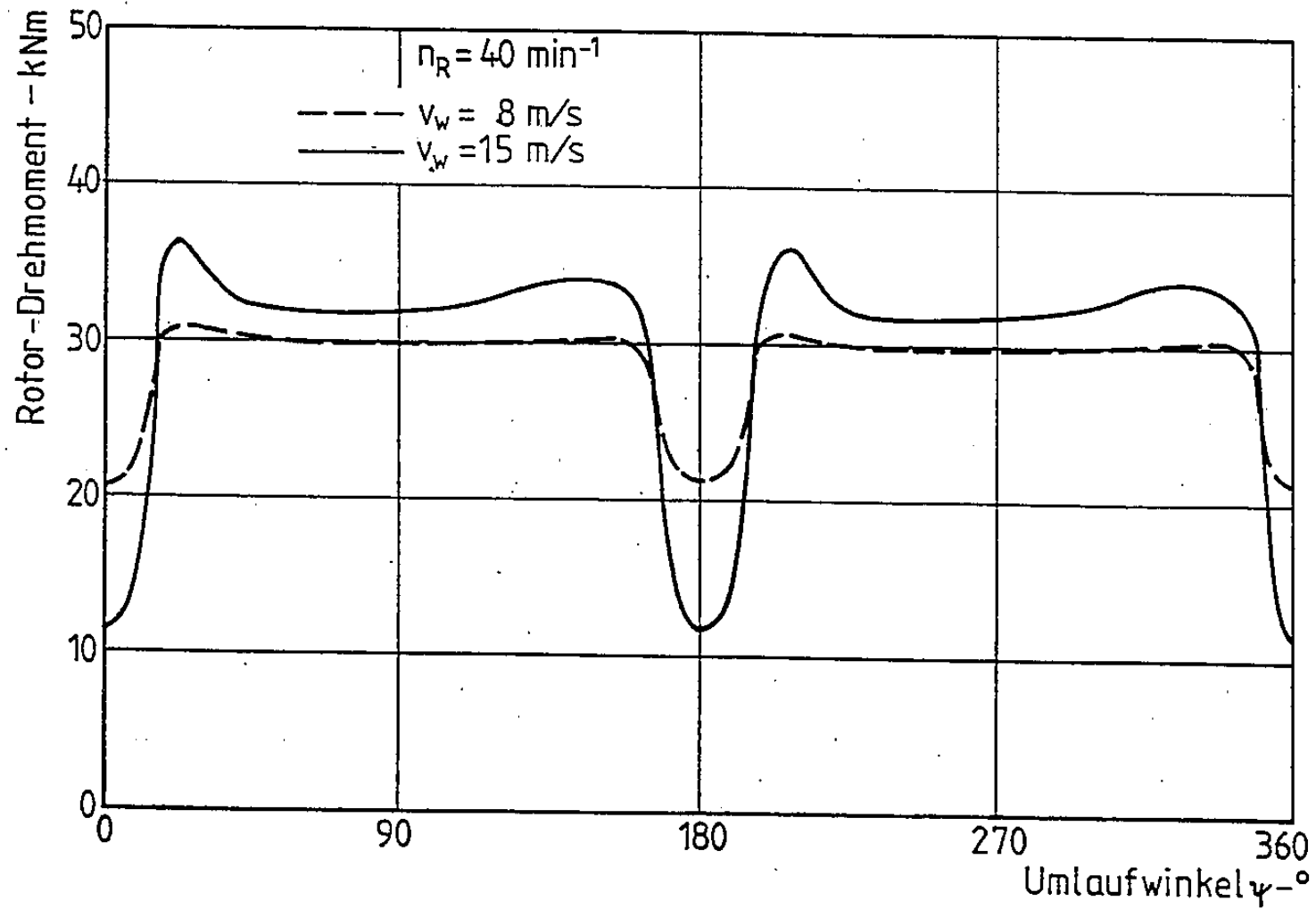
Turmschatten – Growian (1-Blatt - LEE)





Strukturbelastungen

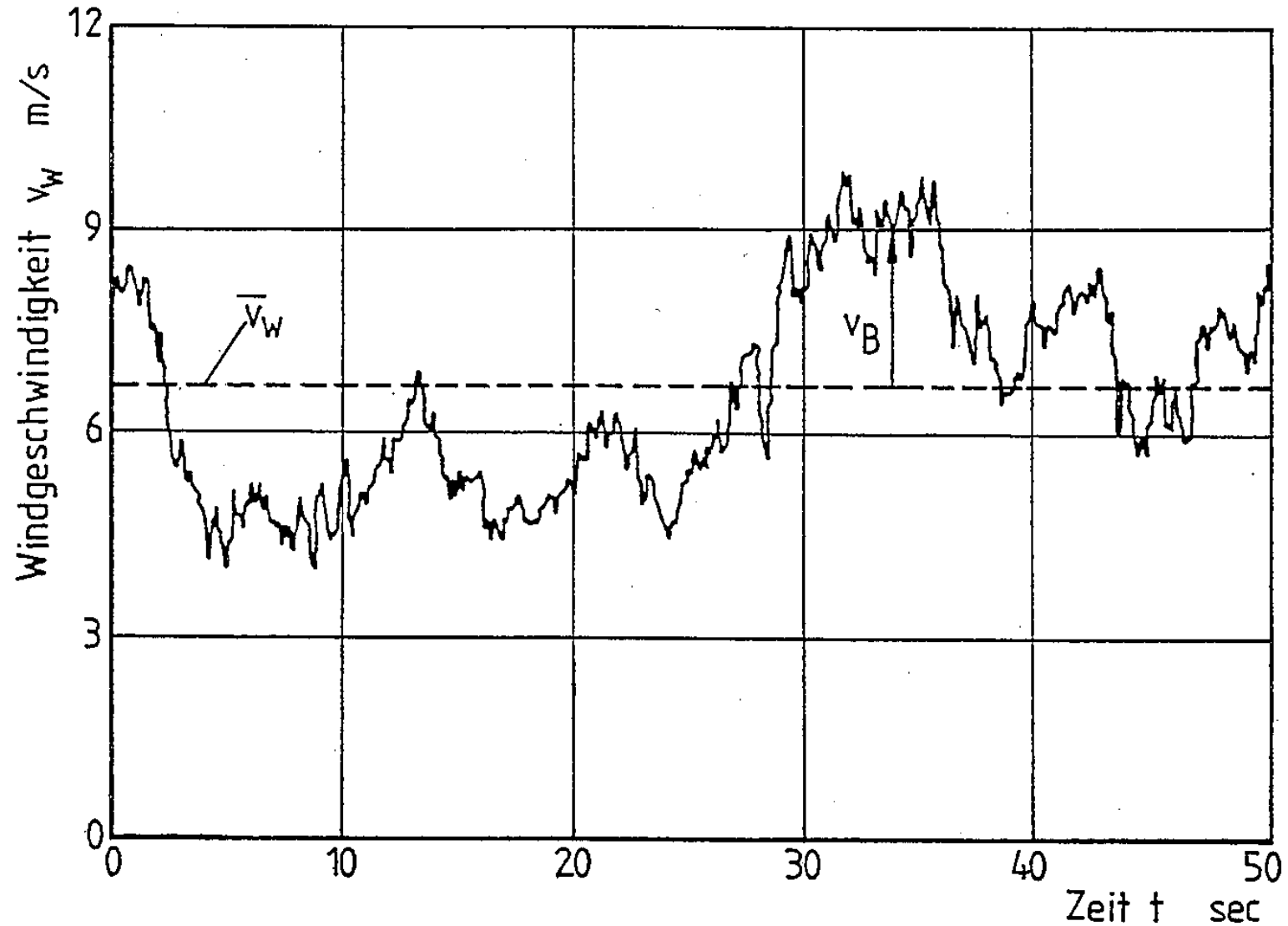
Turmschatten – MOD0 (2-Blatt – LEE)

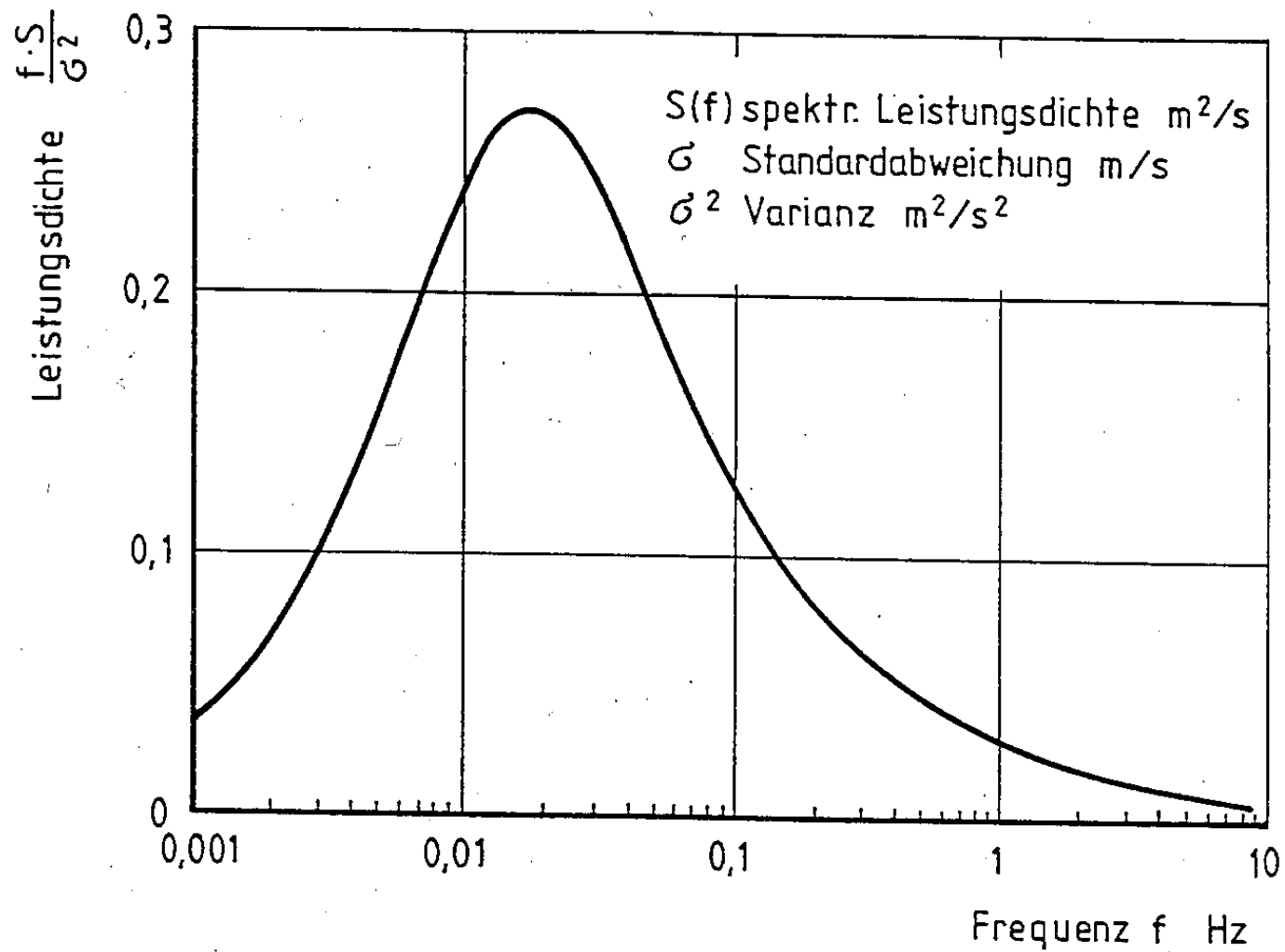




Strukturbelastungen

Windgeschwindigkeit hochaufgelöst



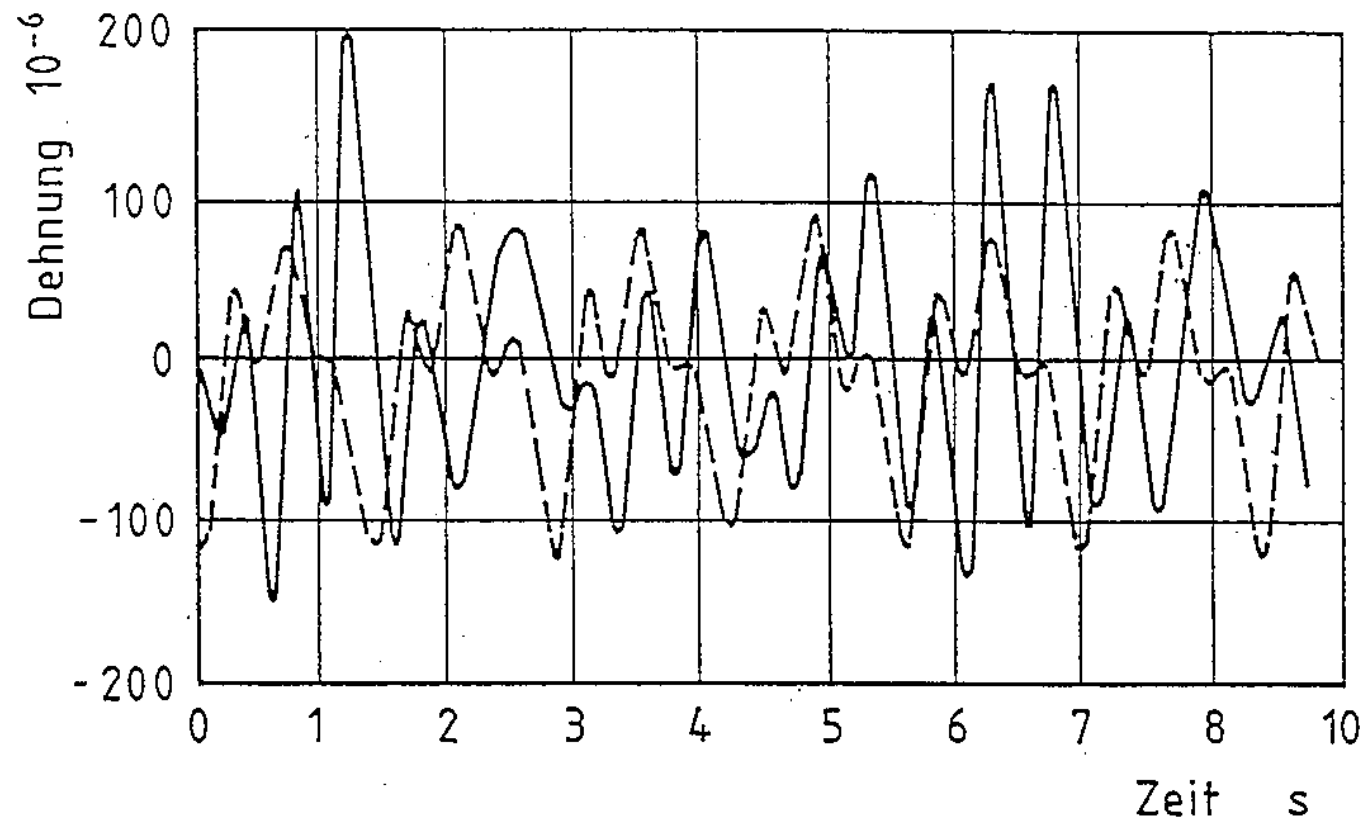




EIFER

Strukturbelastungen

Dehnung HPW300

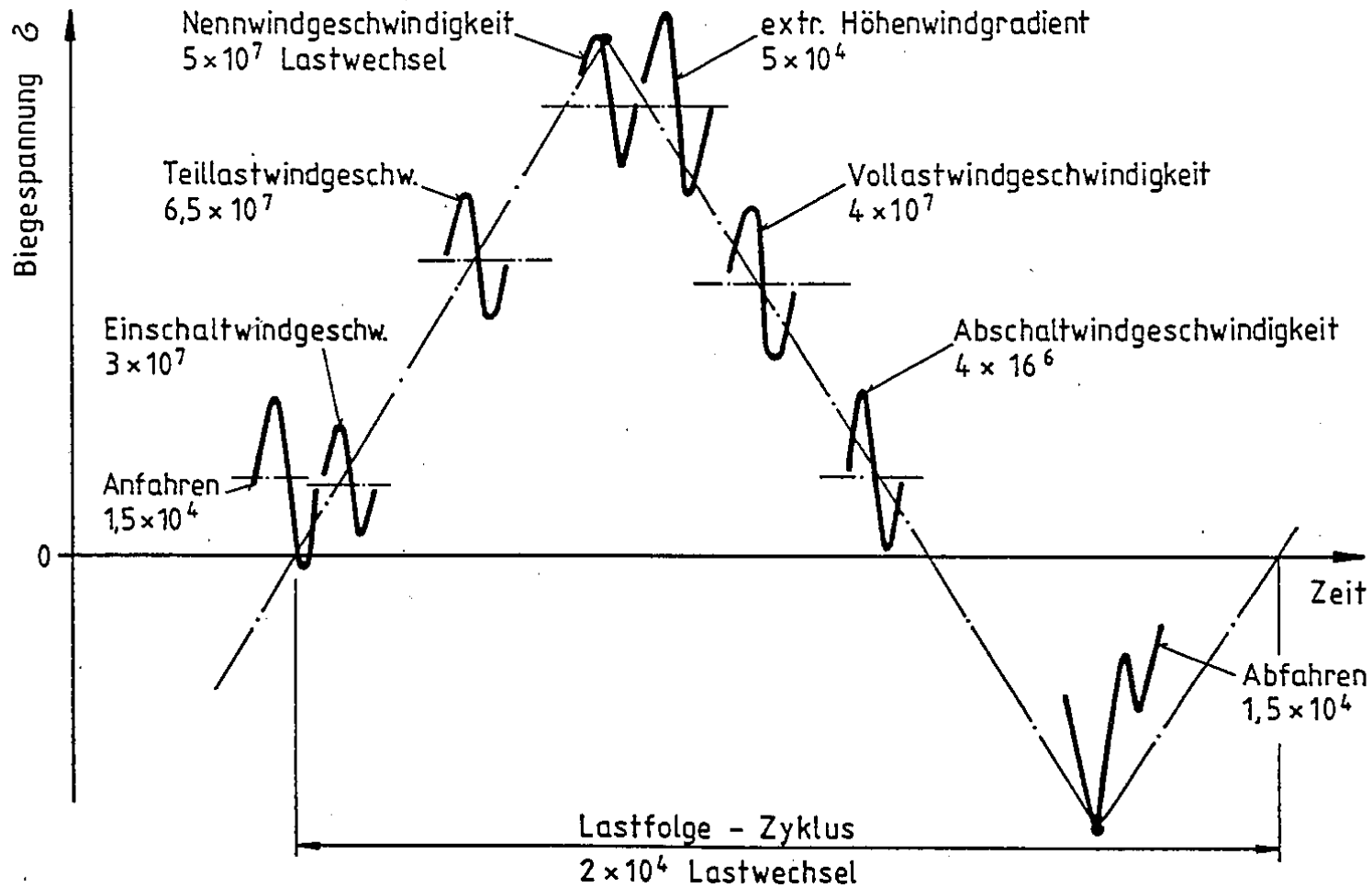


- nur unter dem Einfluß umlaufperiodischer Störungen der Anströmung
- mit Berücksichtigung der Windturbulenz



Strukturbelastungen

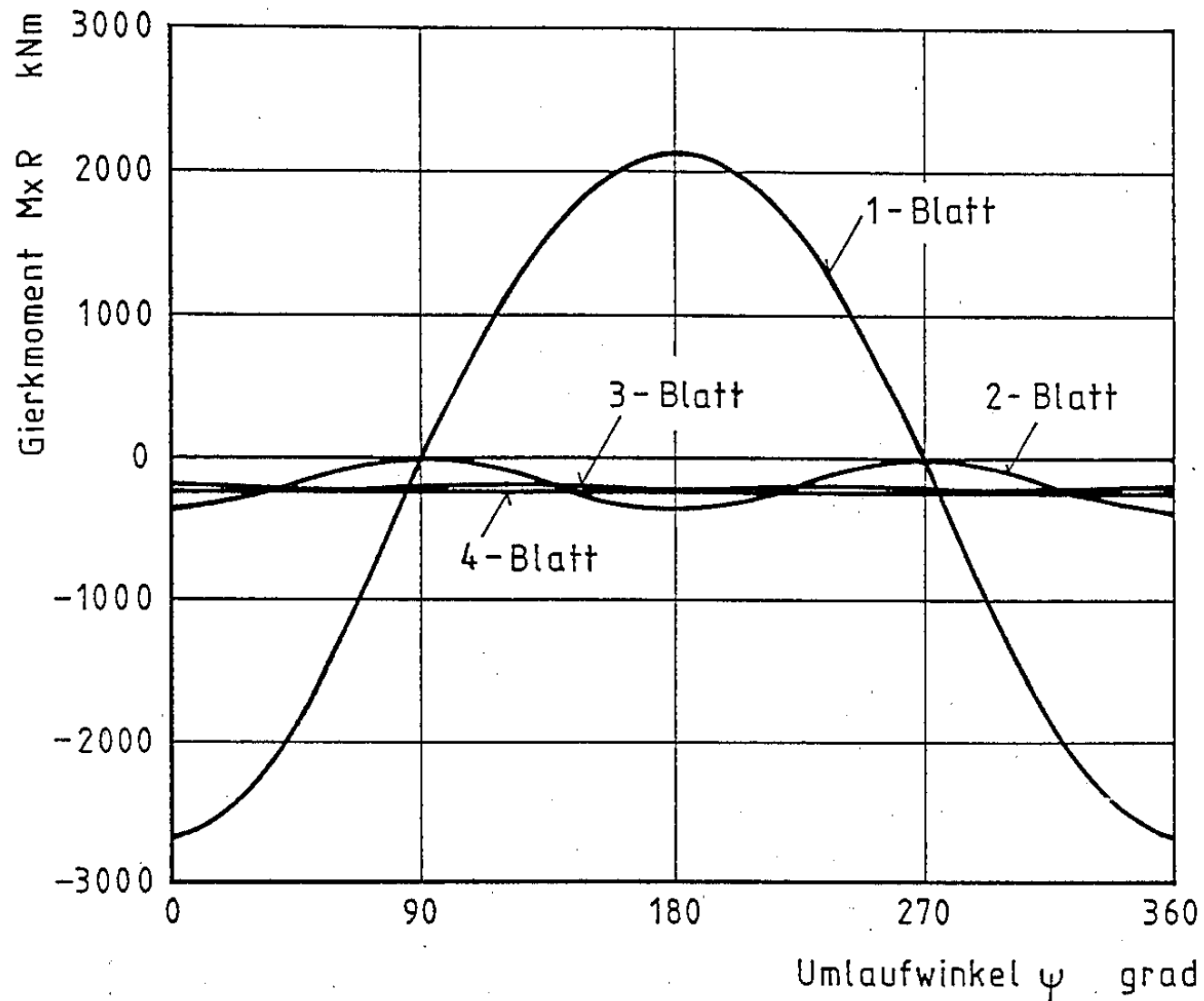
Idealisierte Lastfolge





Strukturbelastungen

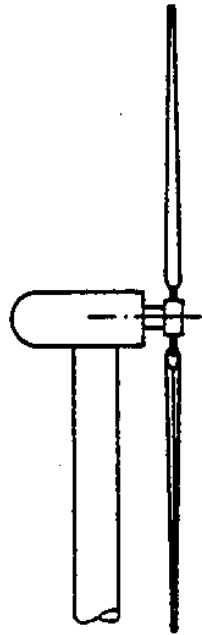
Unsymmetrische Anströmung - Giermoment



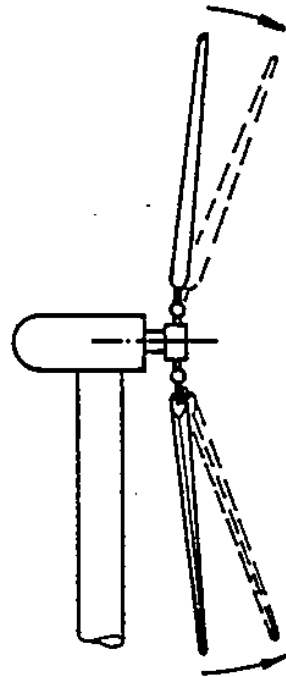


Strukturbelastungen

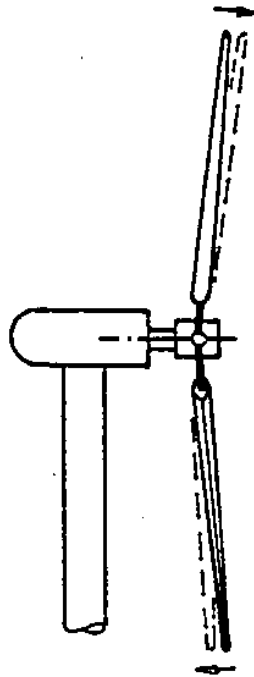
Rotornabengelenke



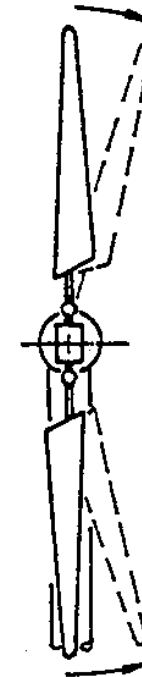
Gelenkloser Rotor



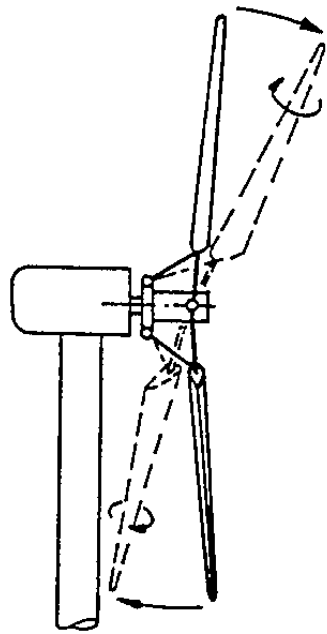
Blattschlag -
gelenke



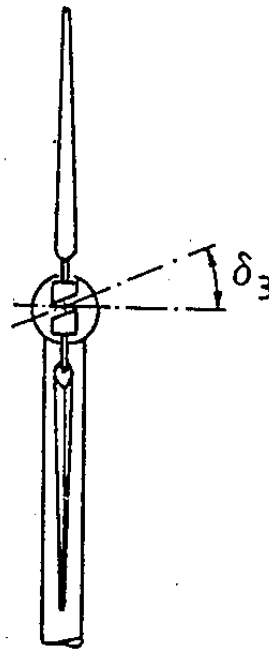
Pendelrotor



Blattschwenk-
gelenke



a.



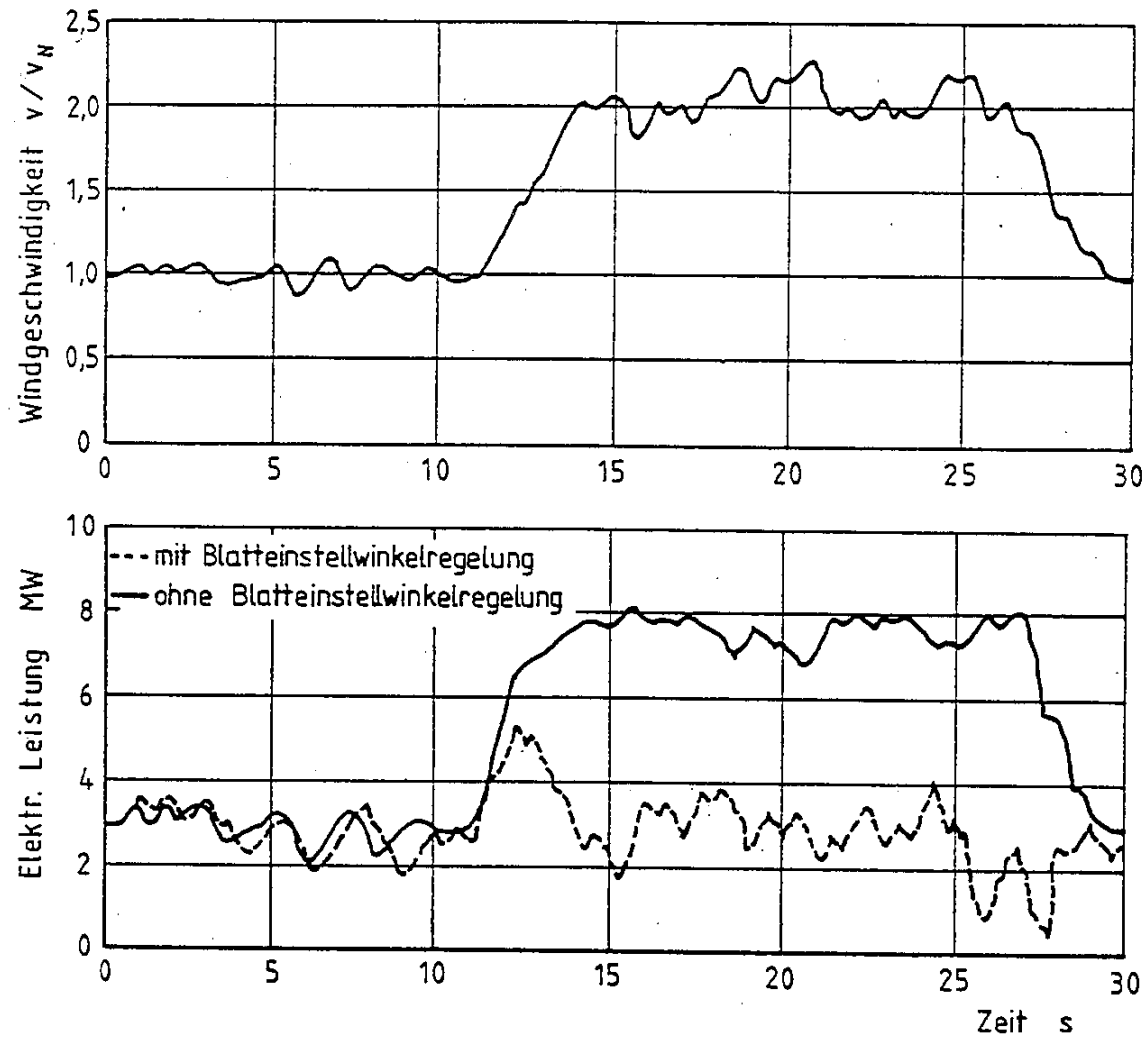
b.

Bild 6.26. Blattwinkelrücksteuerung beim Pendelrotor
a) über ein mechanisches Gestänge
b) mit einer Schrägstellung der Pendelachse (δ_3 -Winkel)



Strukturbelastungen

Blattwinkelrücksteuerung - Auswirkungen

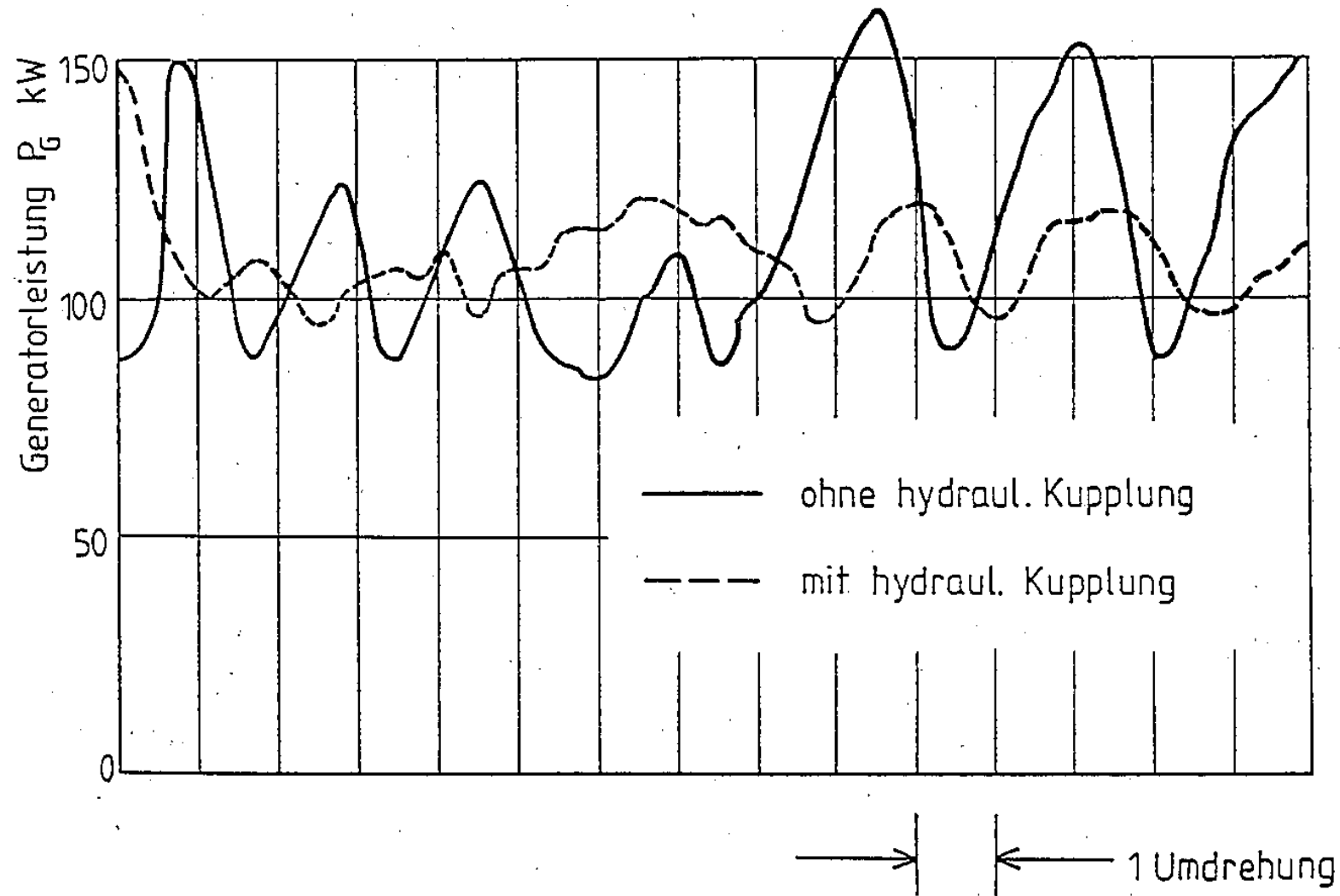




EIFER

Strukturbelastungen

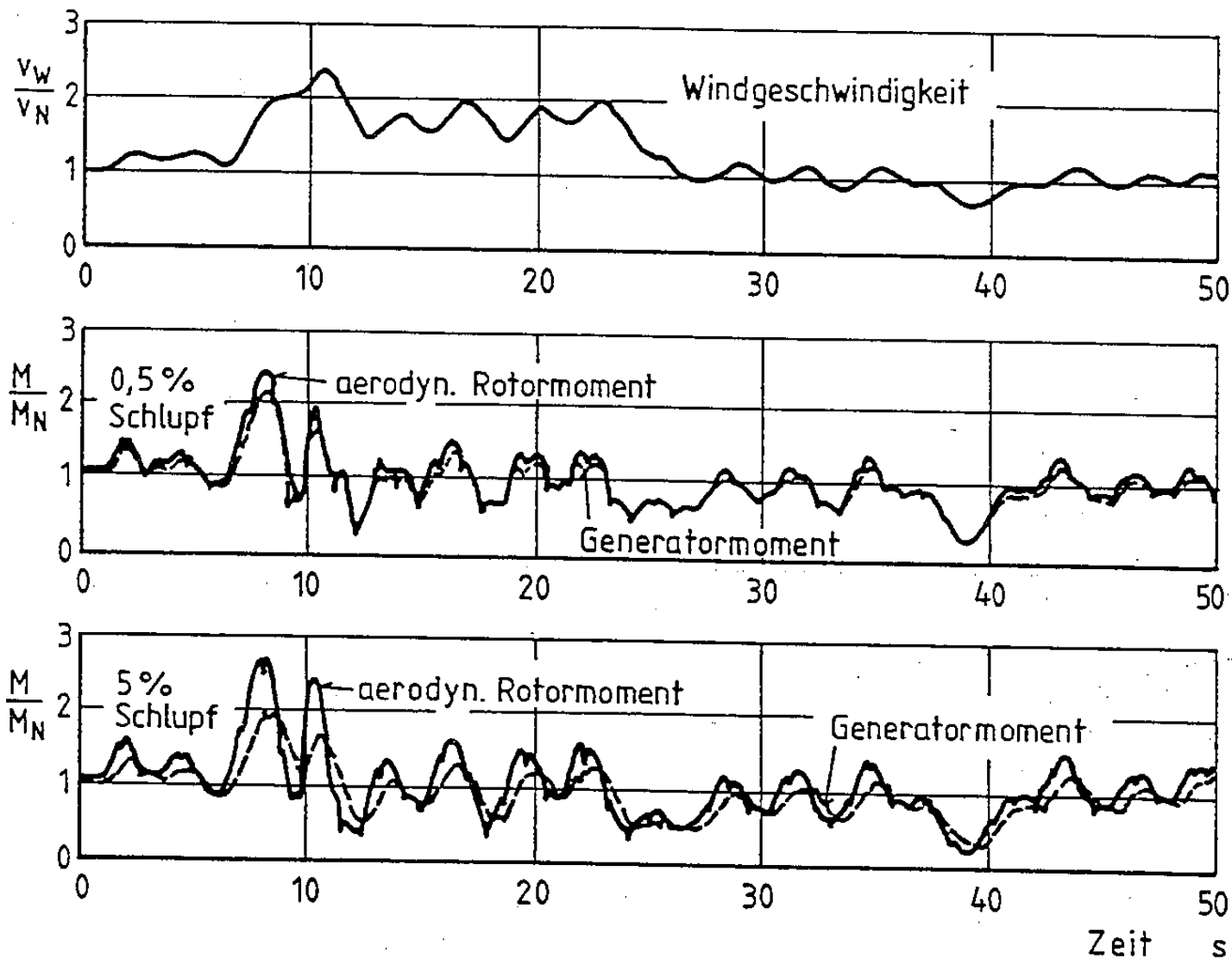
Hydraulische Kupplung





Strukturbelastungen

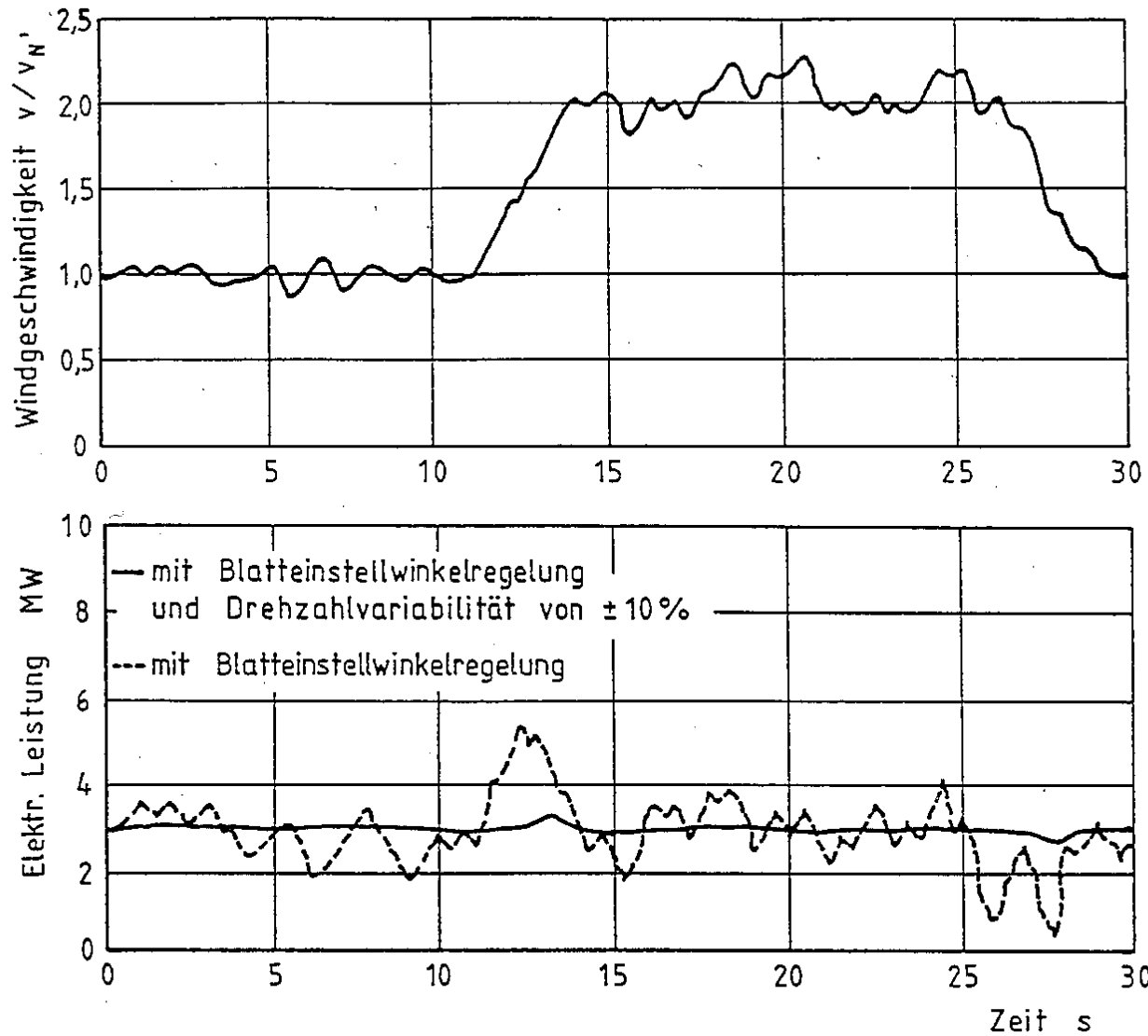
Asynchrongenerator





Strukturbelastungen

Drehzahlvariabler Synchrongenerator mit Frequenzumrichter

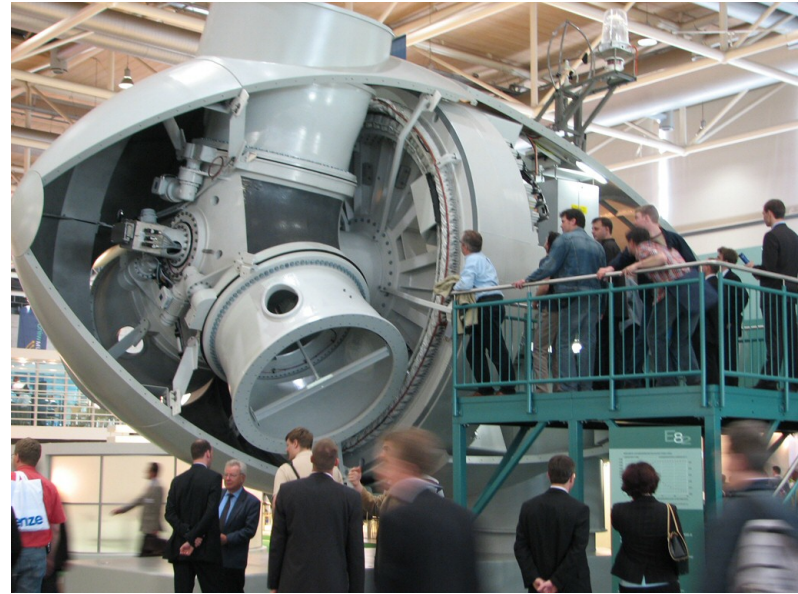




Strukturbelastungen

Rotornabe, Rotorblätter

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

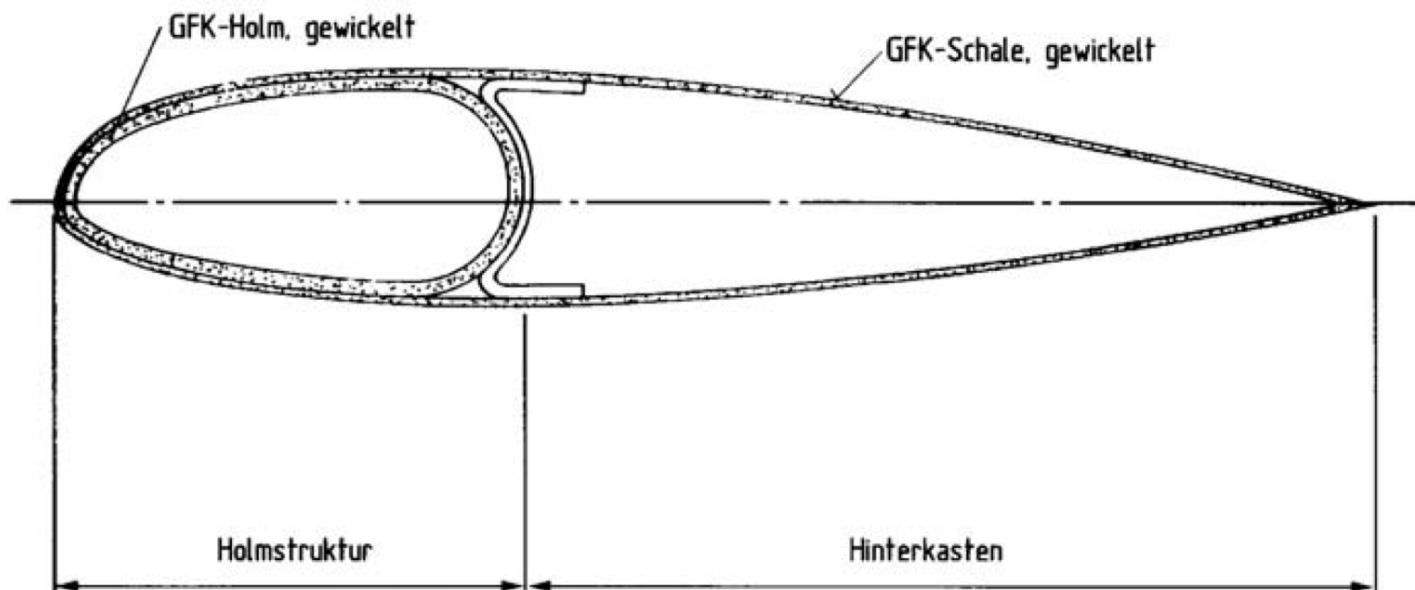
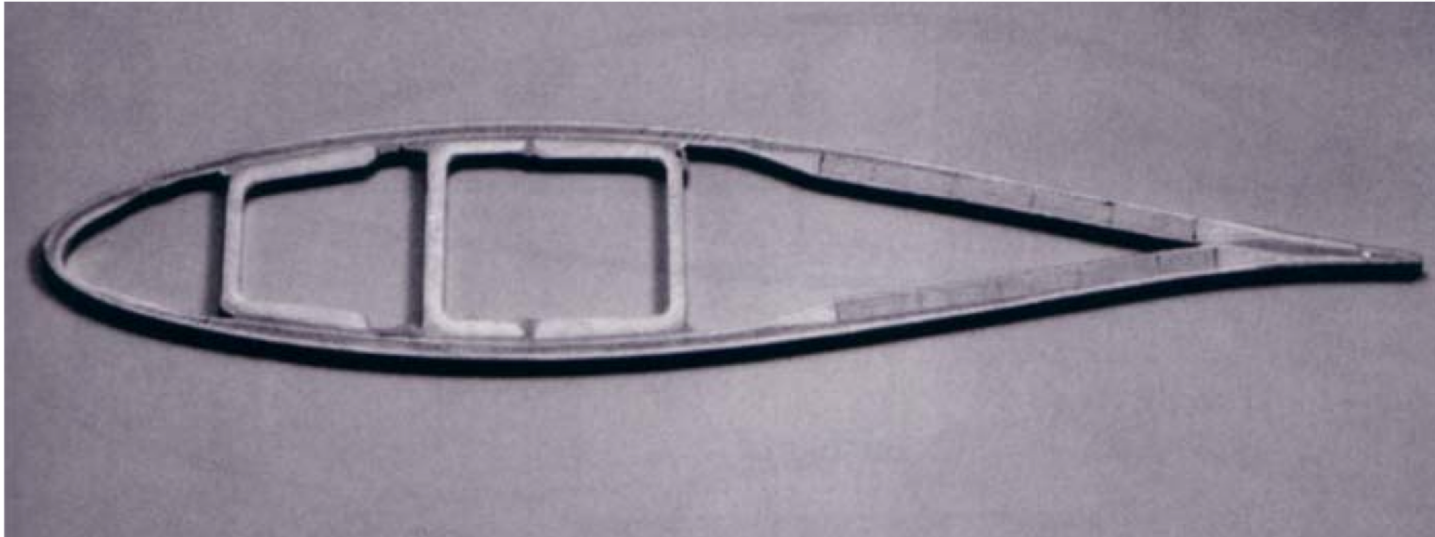




EIFER

Strukturbelastungen

Rotorblatt GFK

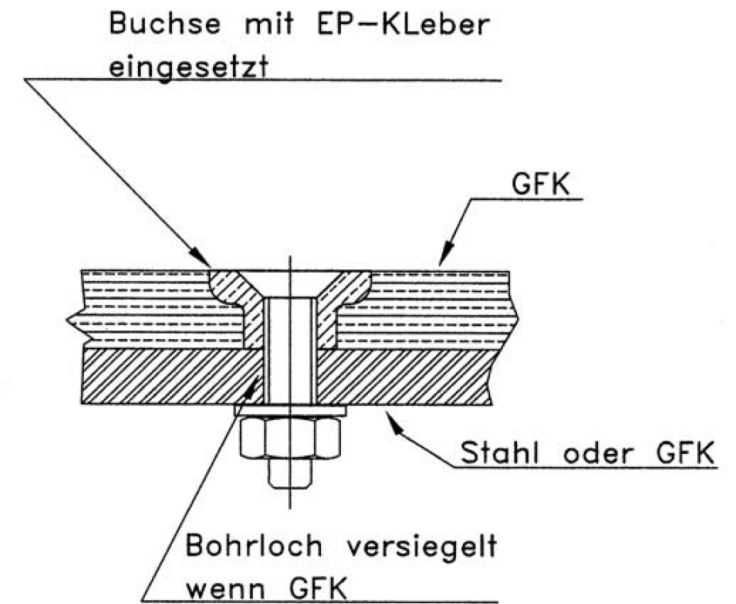
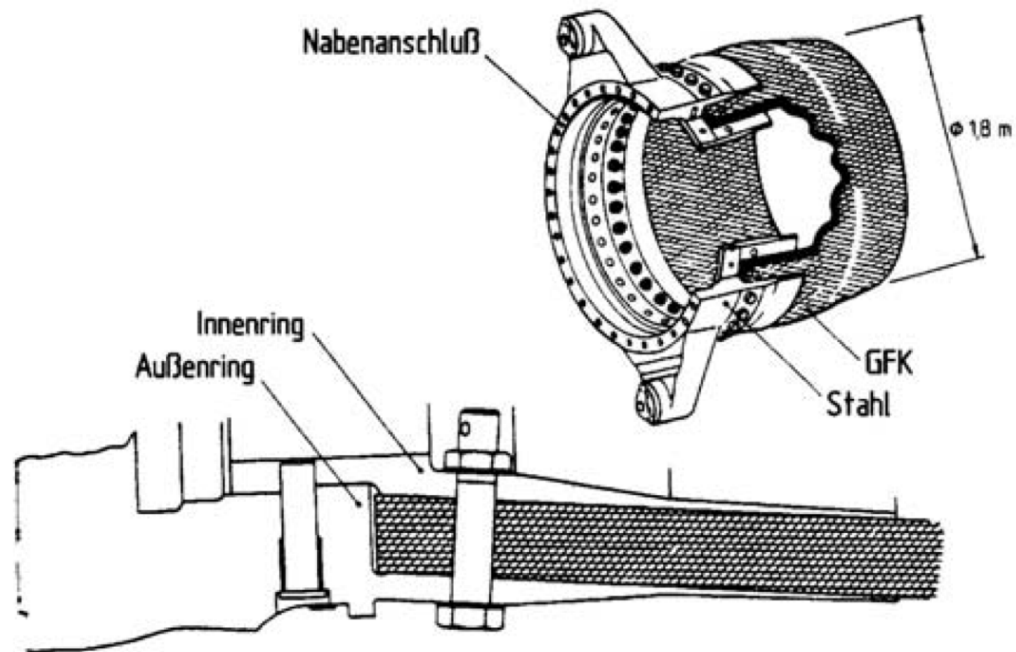




EIFER

Strukturbelastungen

Nabenverbindung

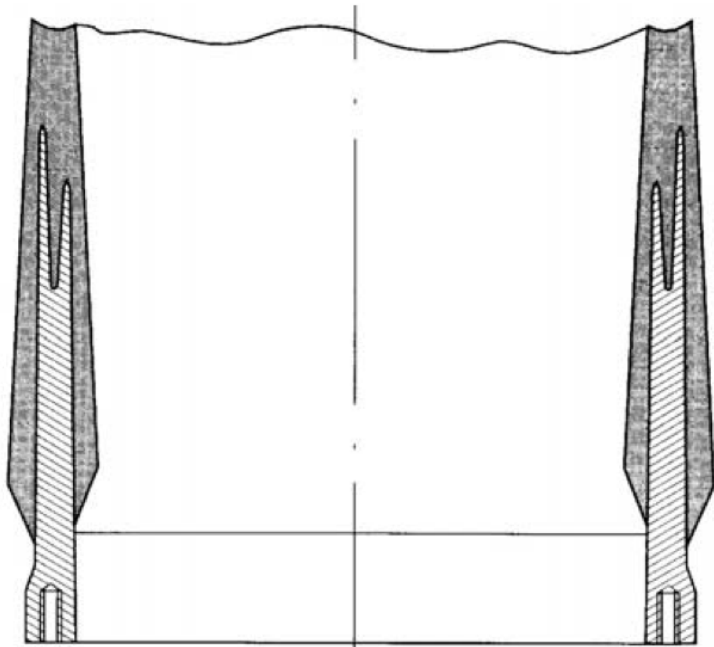




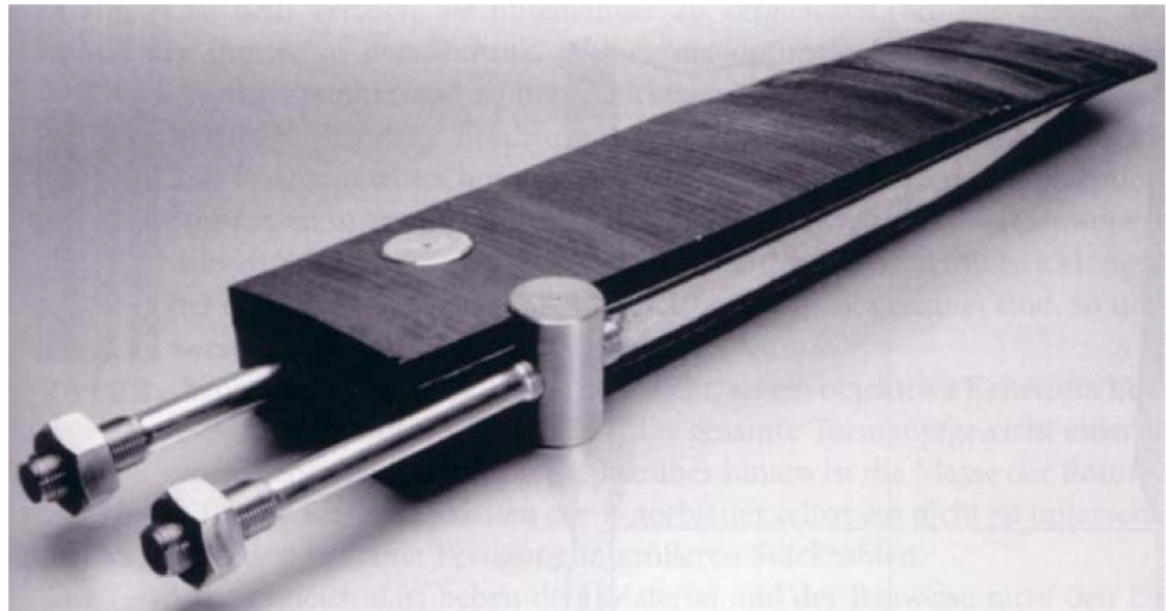
EIFER

Strukturbelastungen

Nabenverbindung II



Leichtbaufansch

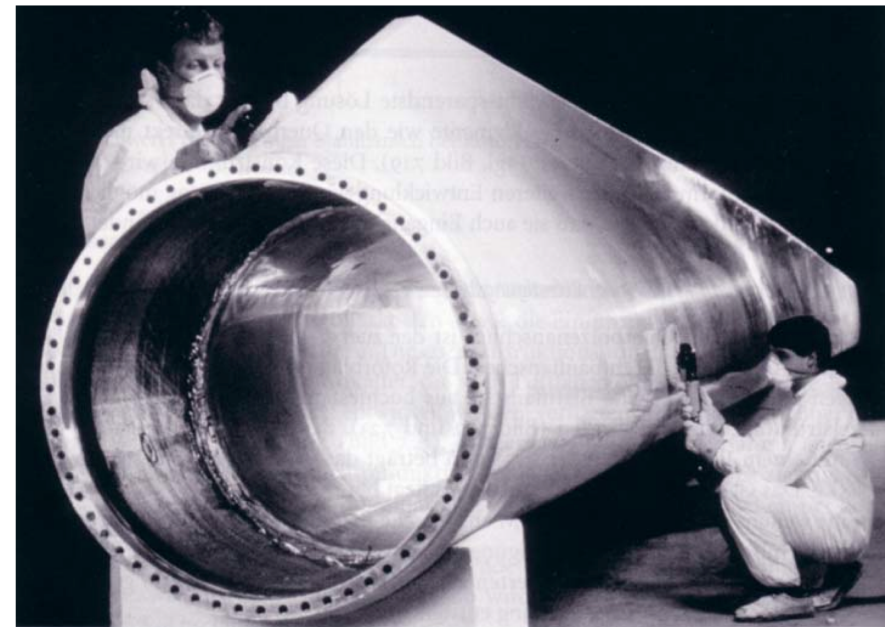
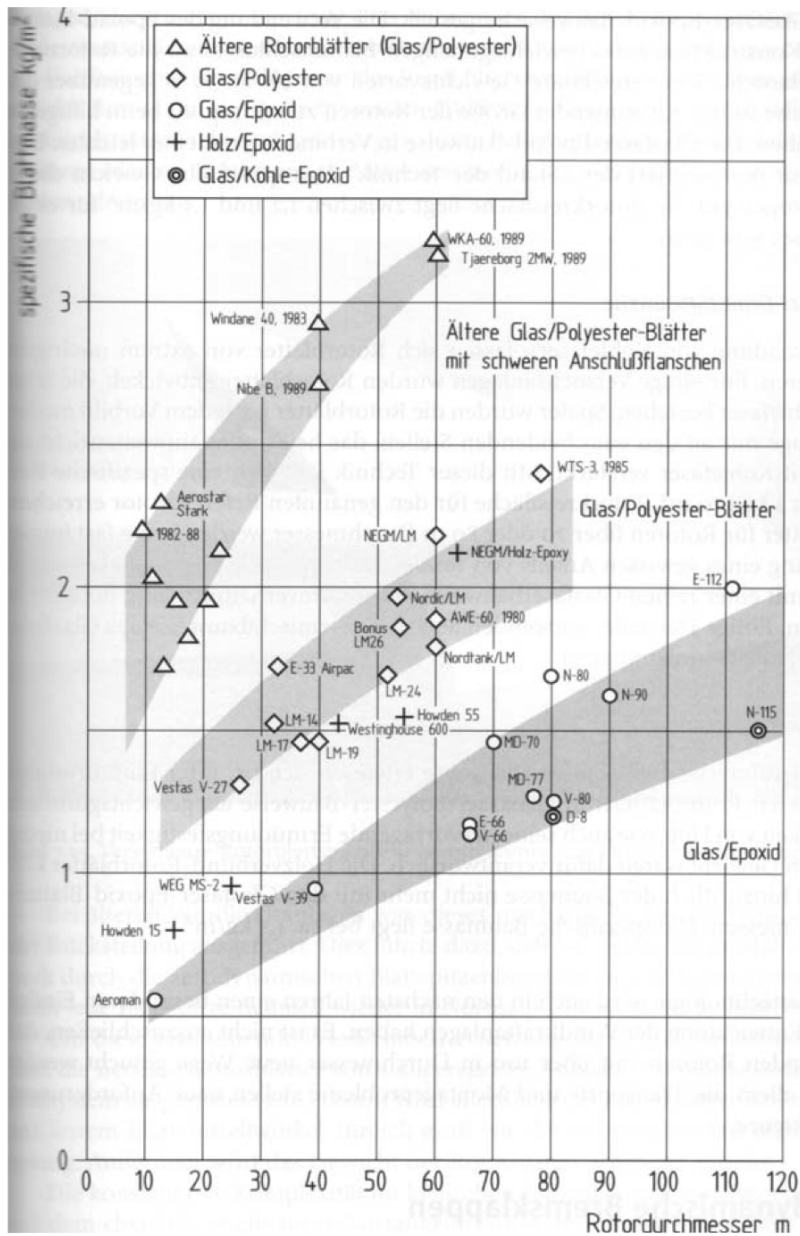


Querbolzen (Ikea-Anschluss)



Strukturbelastungen

Rotorblatt Fertigung / Gewicht





Strukturbelastungen

Turmkonzepte

- 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

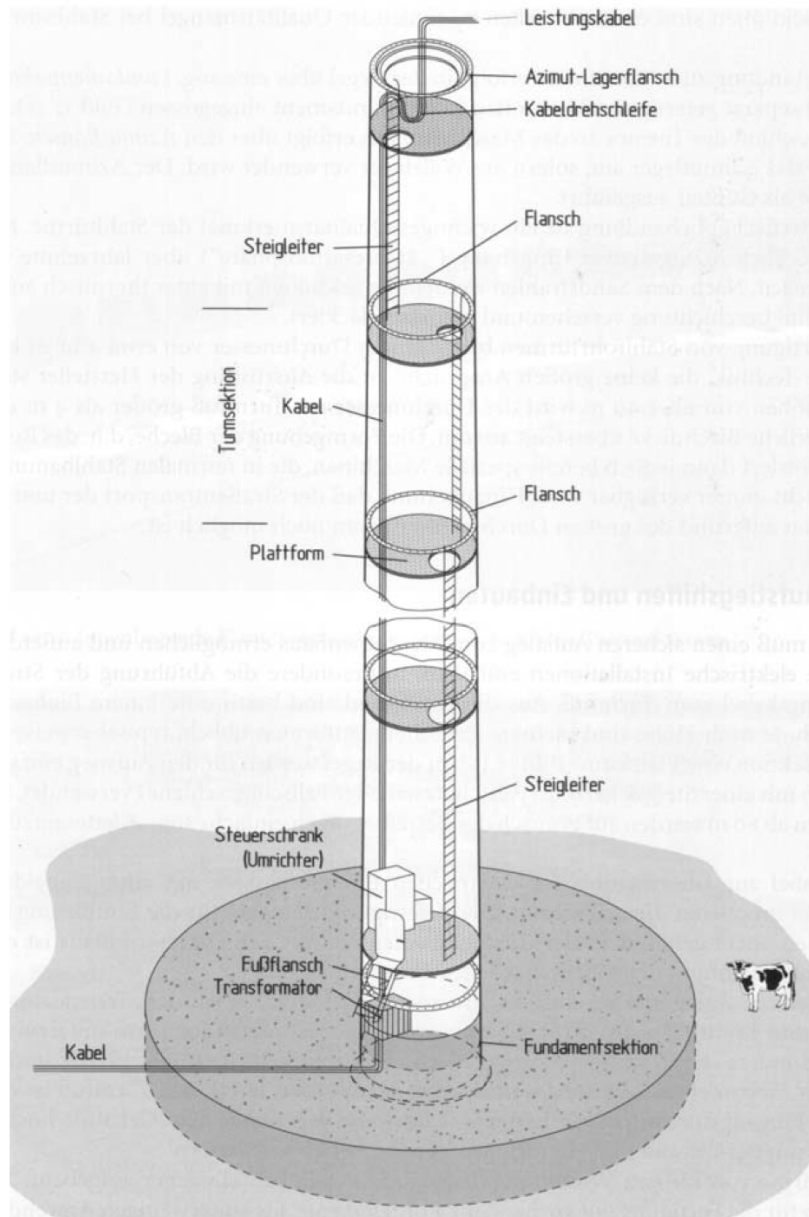
¹⁾ inkl. Aussteifungen und Anschlussflansche

²⁾ inkl. Einbauten



Strukturbelastungen

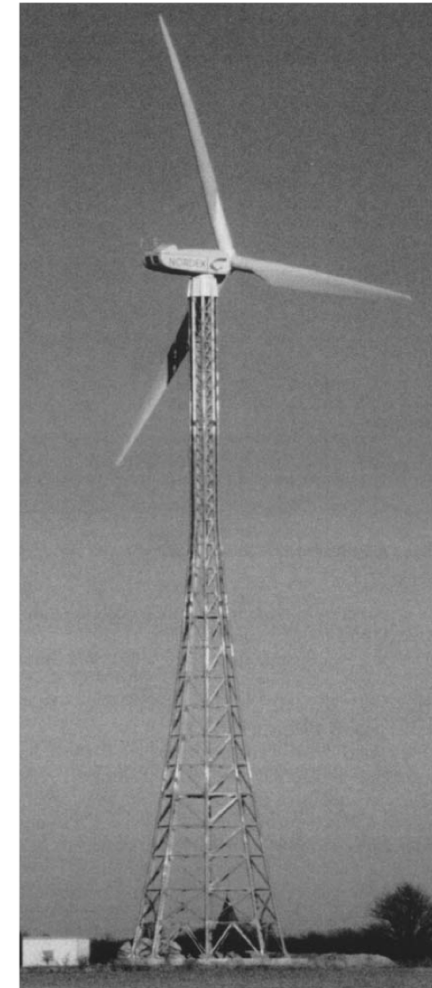
Turmkonzepte II



Growian



Stahlbeton
konisch





EIFER

Strukturbelastungen

Turmkonstruktionen





EIFER

Strukturbelastungen

Turmgrößen





EIFER

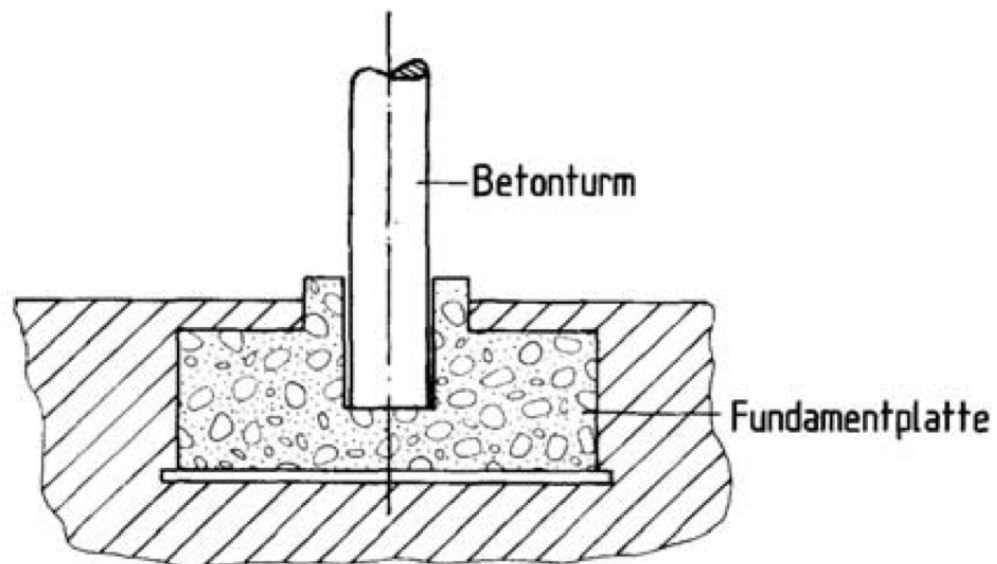
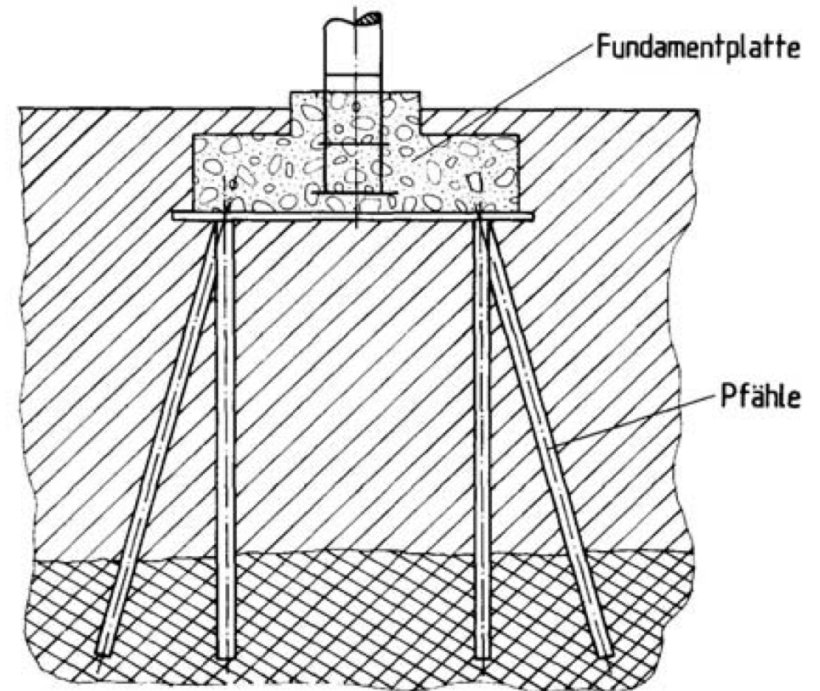
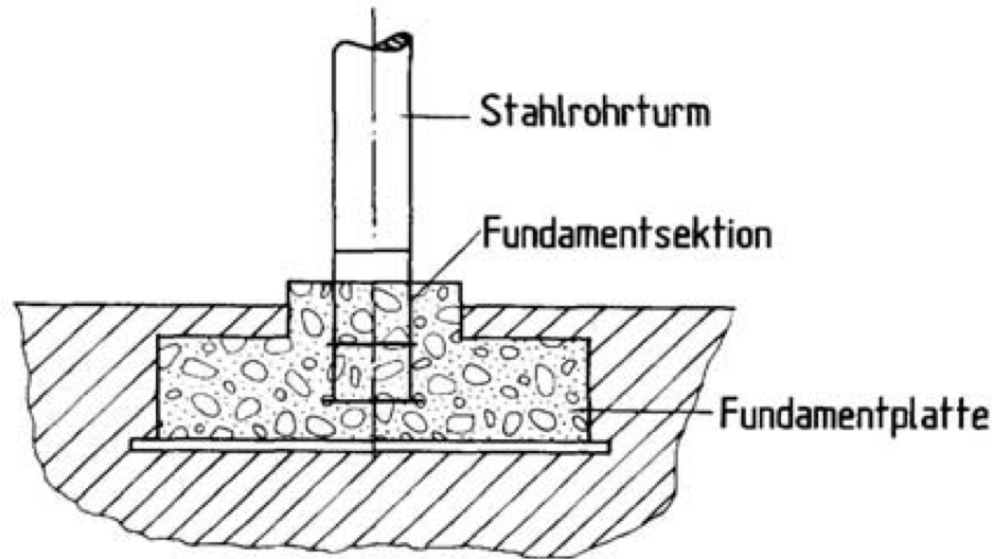
Strukturbelastungen Konstruktion





Strukturbelastungen

Fundamente





EIFER

Strukturbelastungen

Fundamente II





EIFER

Strukturbelastungen

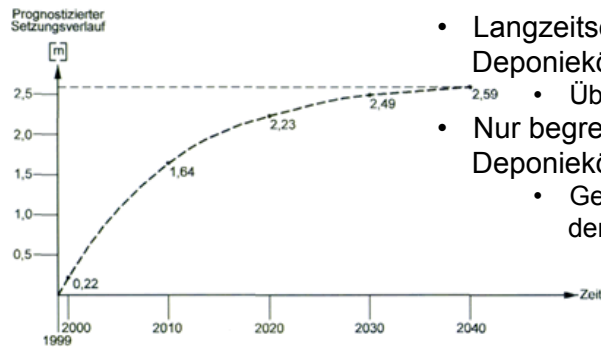
Fundamente III



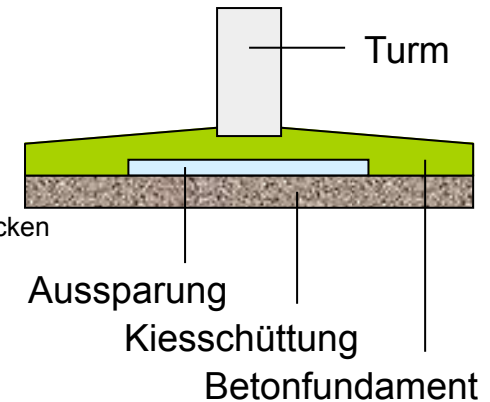


Strukturbelastungen

Fundament Windmühlberg 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 Aussparung
- Durchmesser von 10m ausgespart