



EIFER

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

# Aerodynamik

Strukturbelastungen

KIT





# Strukturbelastungen

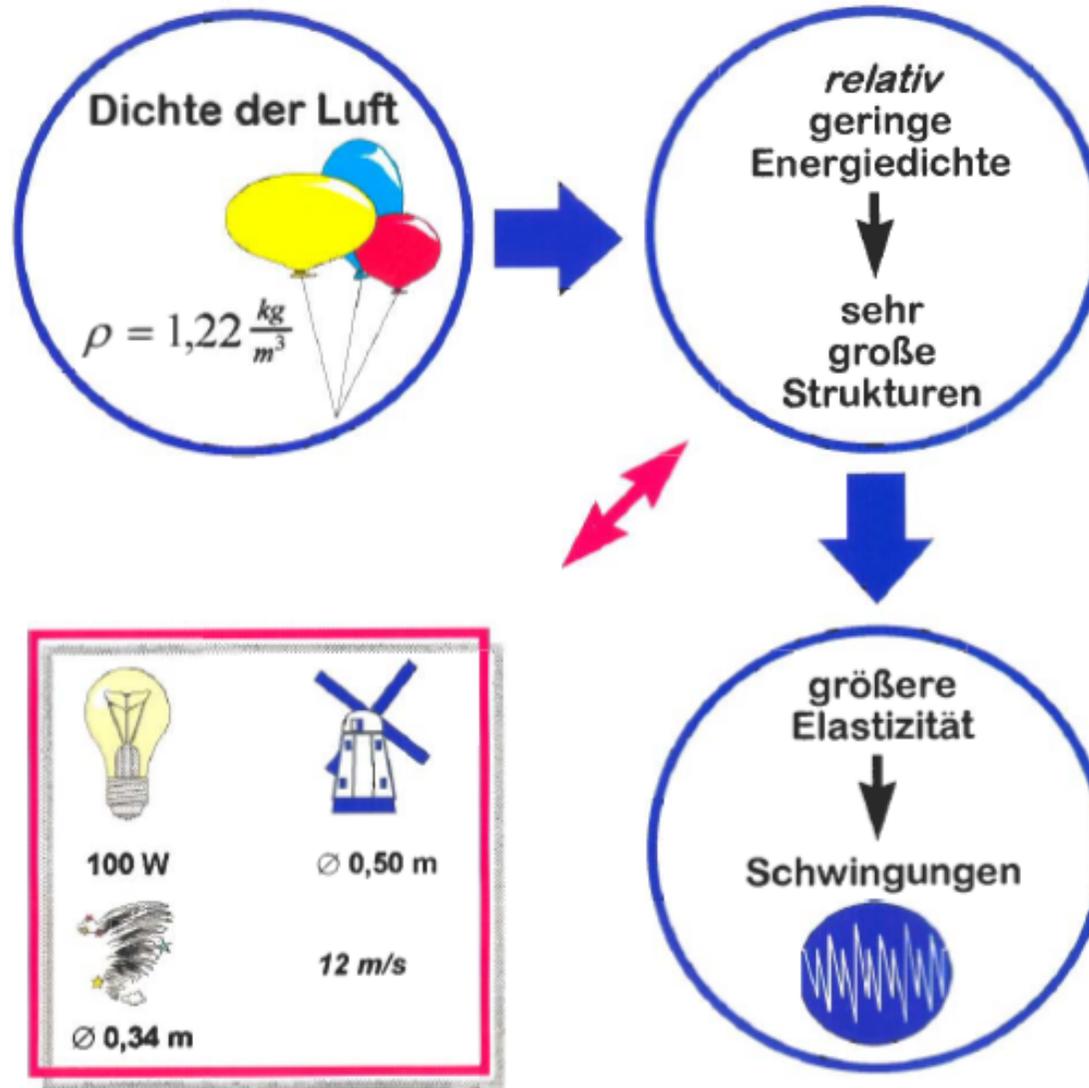
Ursachen - Natur des Windes





# Strukturbelastungen

Ursachen – Dichte der Luft



 100 W	 Ø 0,50 m
 Ø 0,34 m	12 m/s



# 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 <b>Drehzahlnachgiebigkeit</b>
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*



EIFER

# Strukturbelastungen

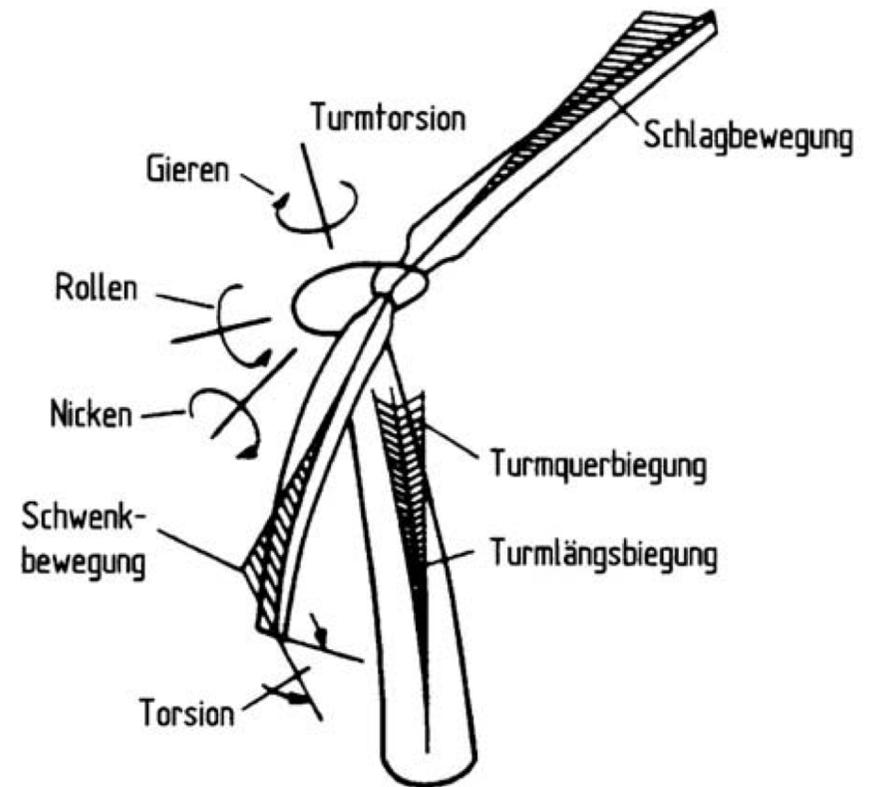
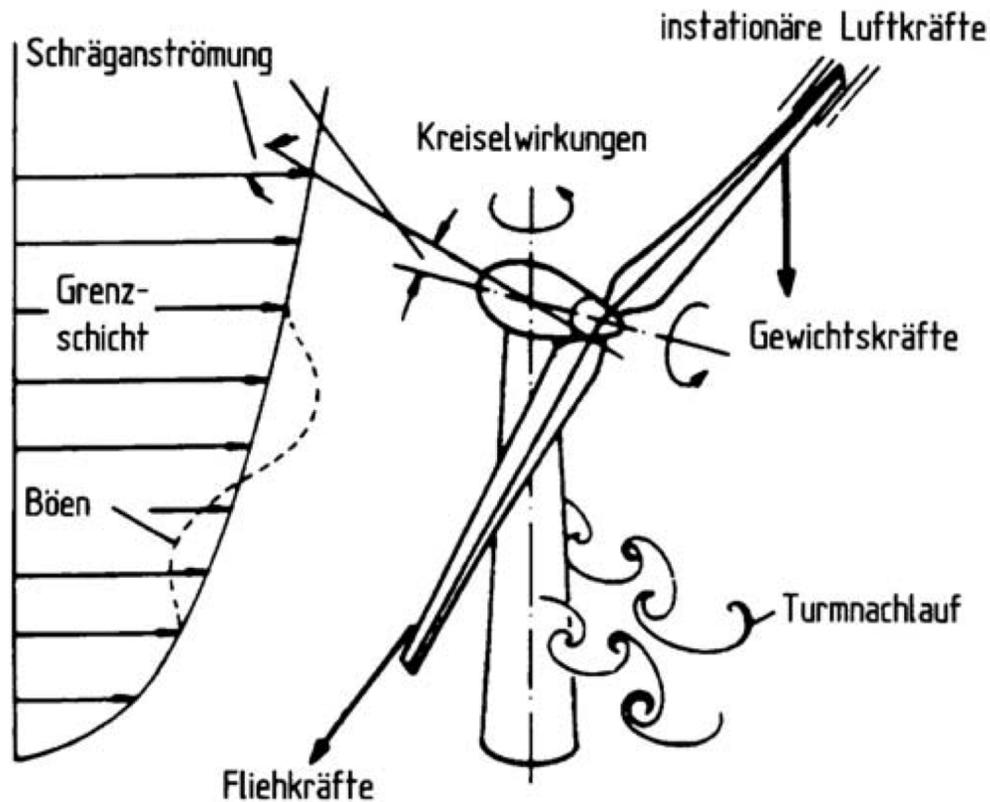
## Entwurfslasten - Massenkräfte

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



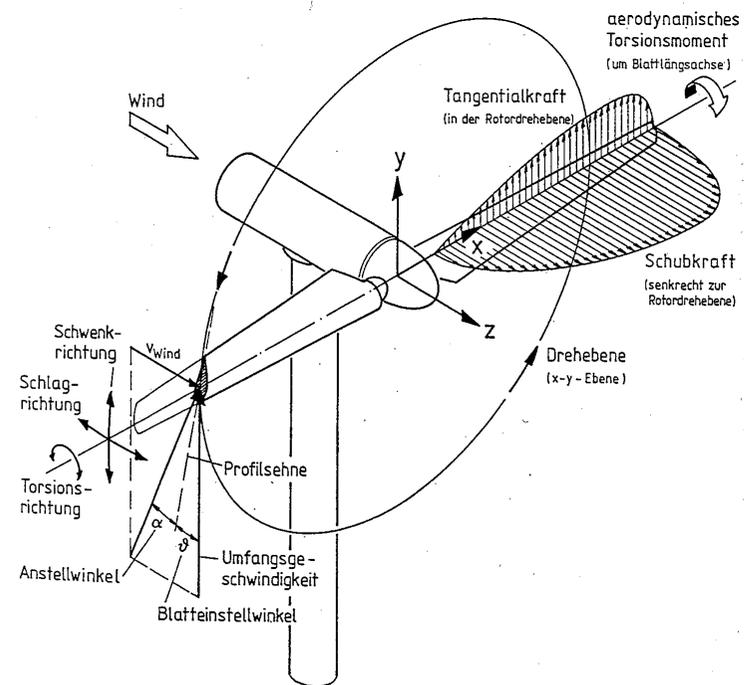


EIFER

# Strukturbelastungen

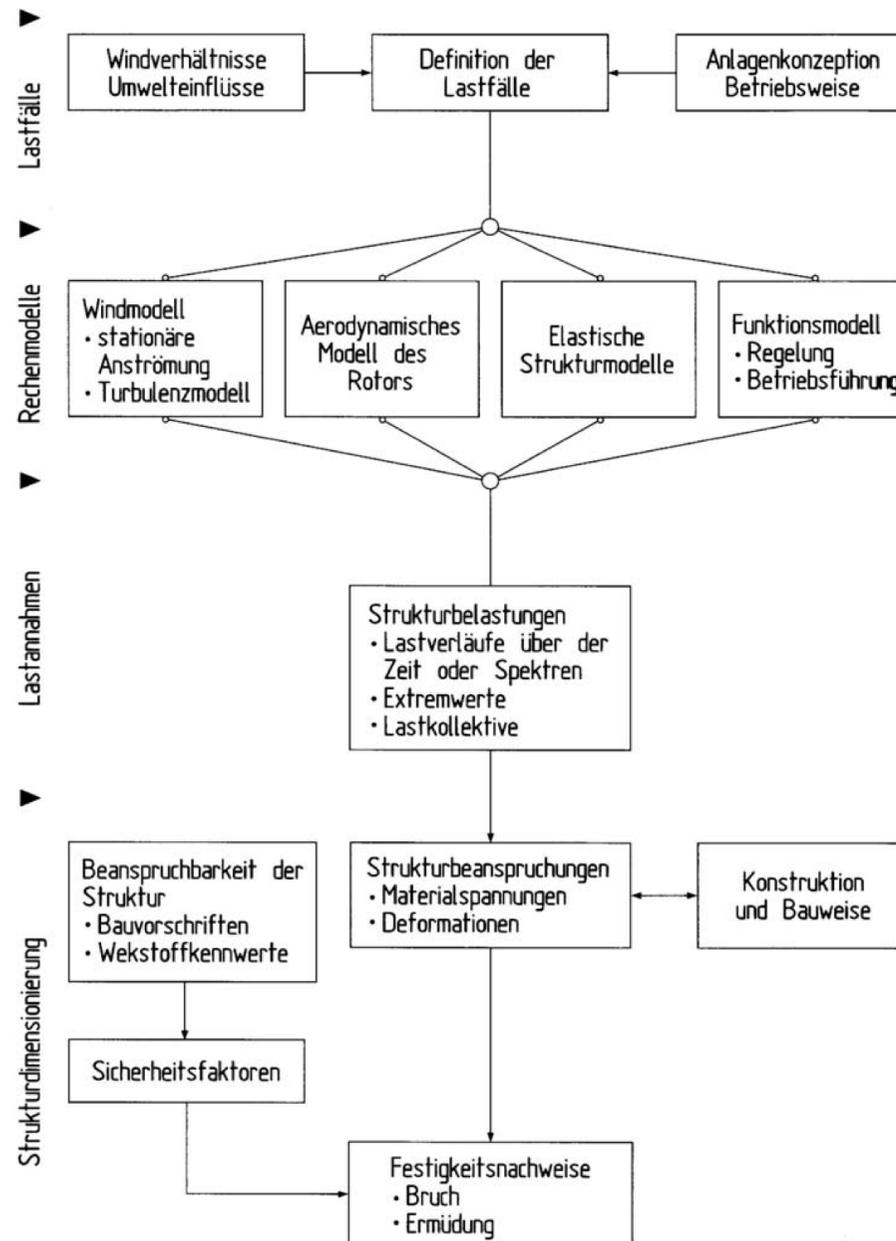
## Krafteinteilung

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>Turmvorstoß beim luvseitigen Rotor</p>	
nicht periodische, stochastische Belastungen	<p>Windturbulenzen</p>	



# Strukturbelastungen

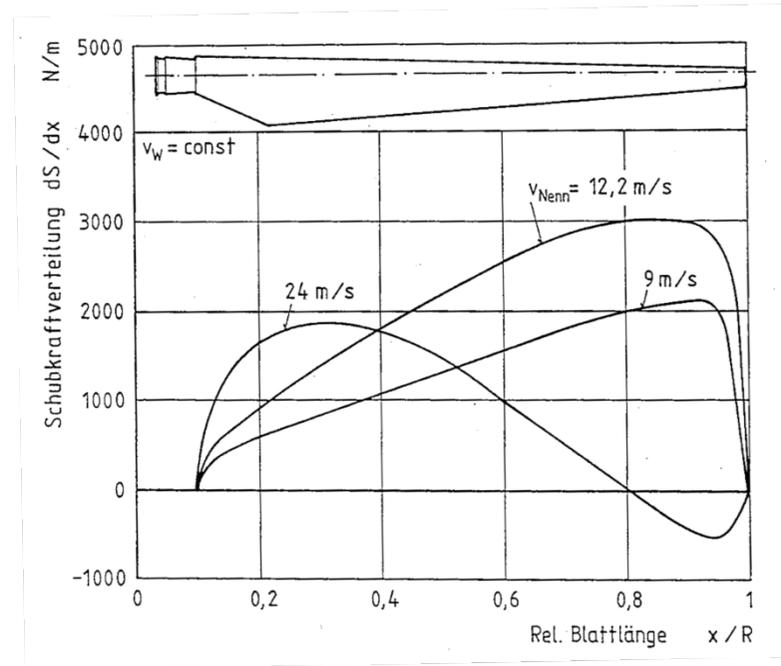
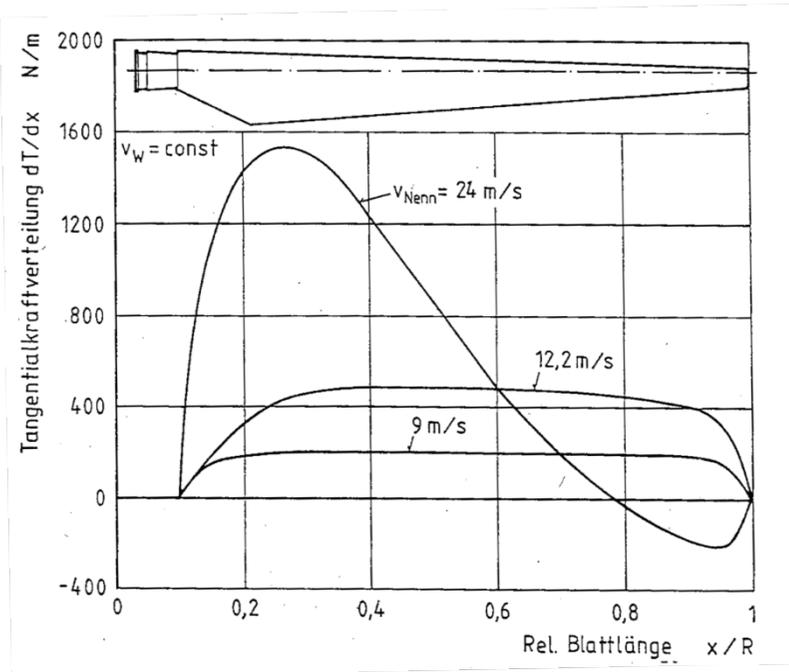
## Struktogramm des Vorgehens





# Strukturbelastungen

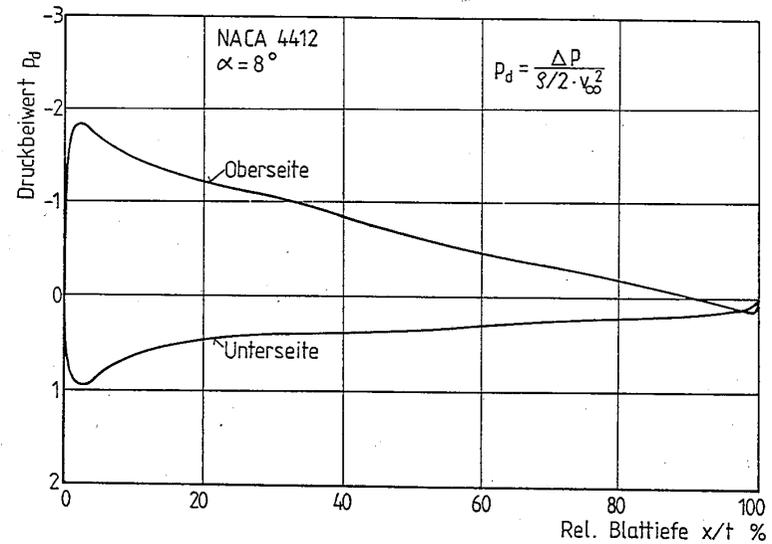
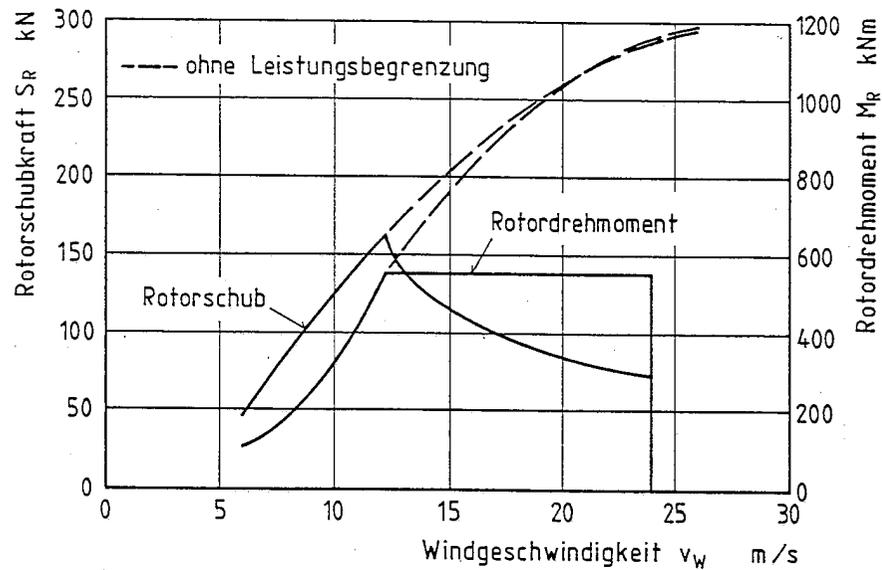
## Tangentialkraft - Schubkraft





# Strukturbelastungen

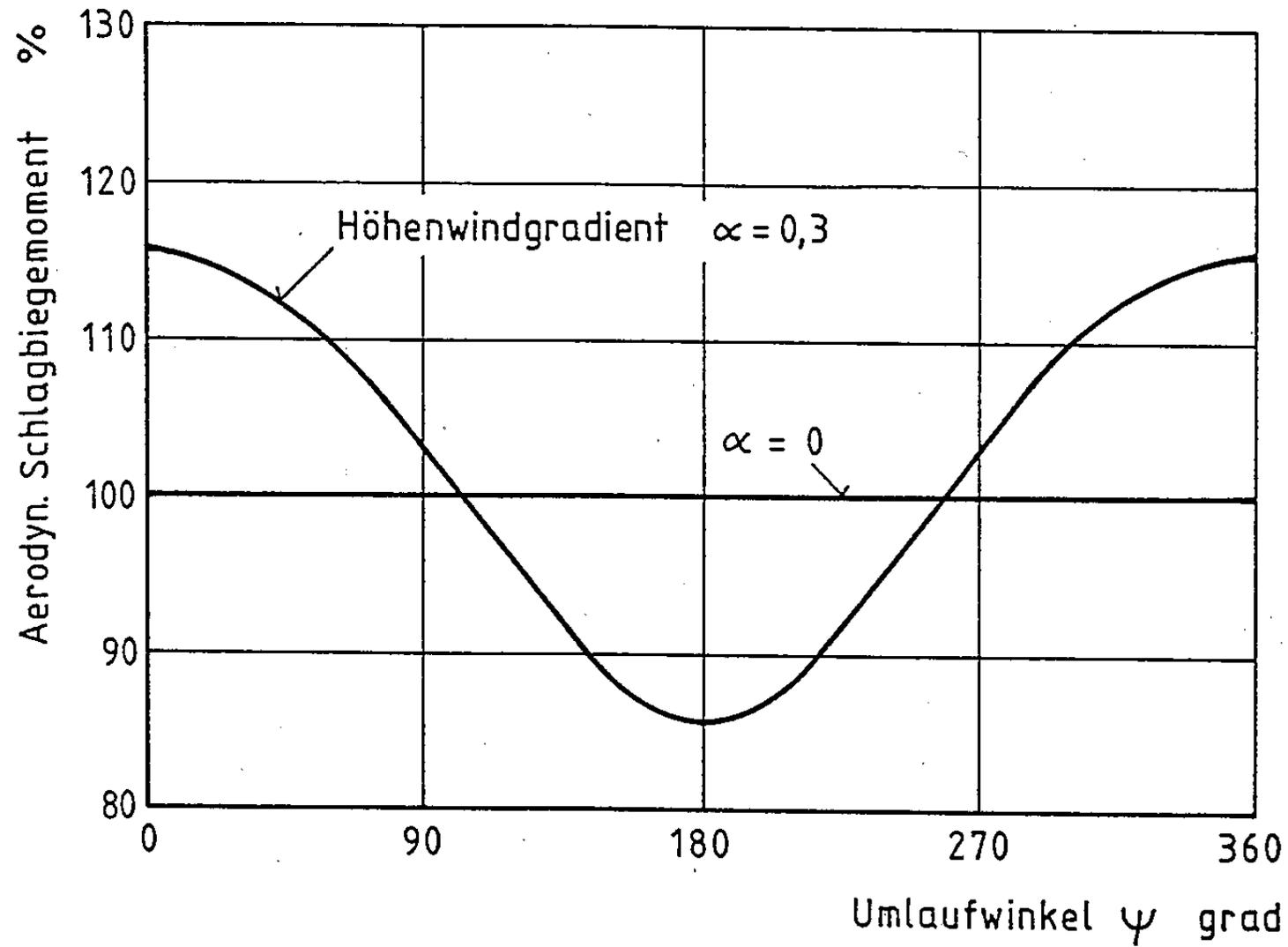
## Rotorschub und Rotordrehmoment / Druckverteilung

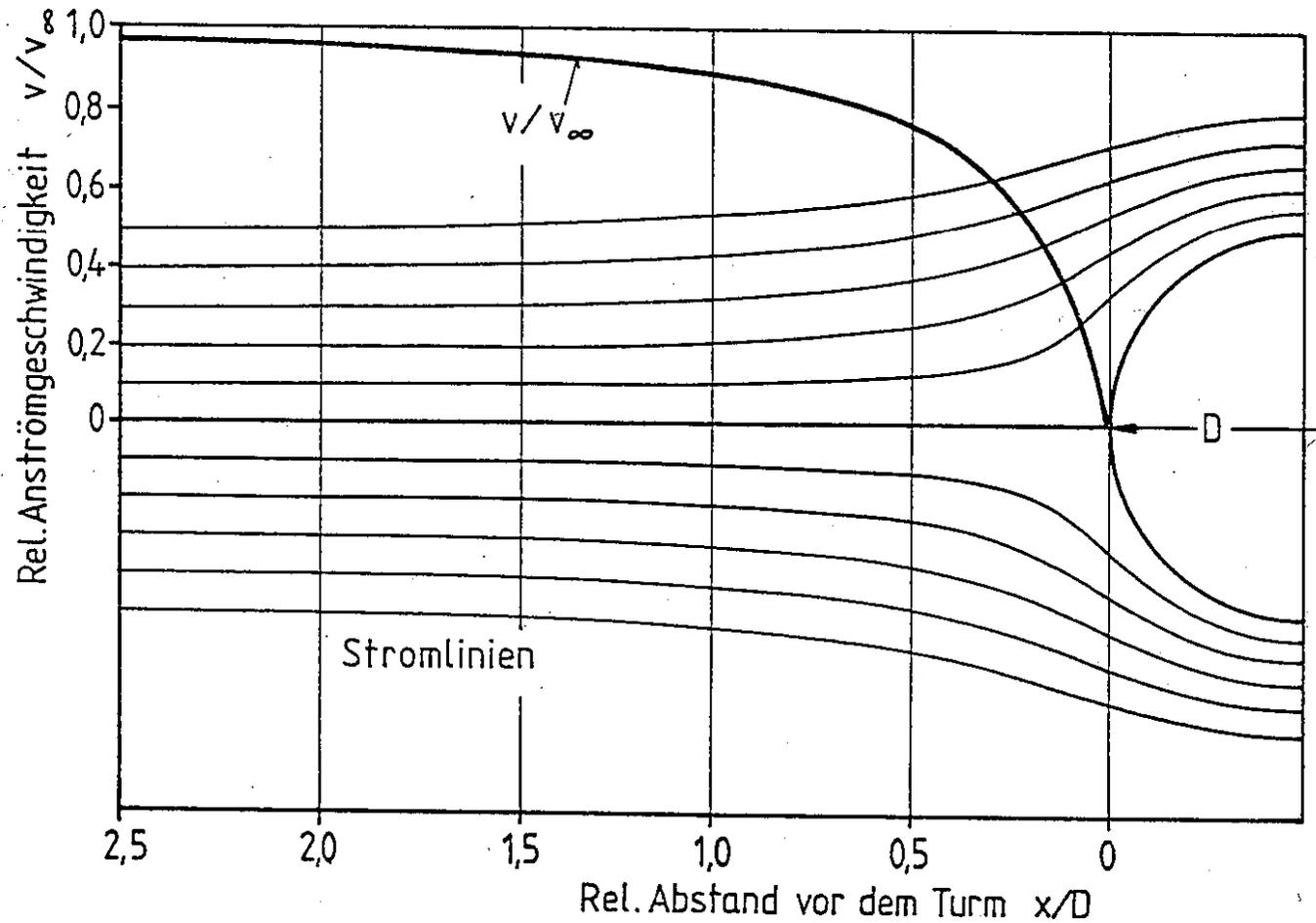




# Strukturbelastung

## Umlaufperiodisches Schlagbiegemoment

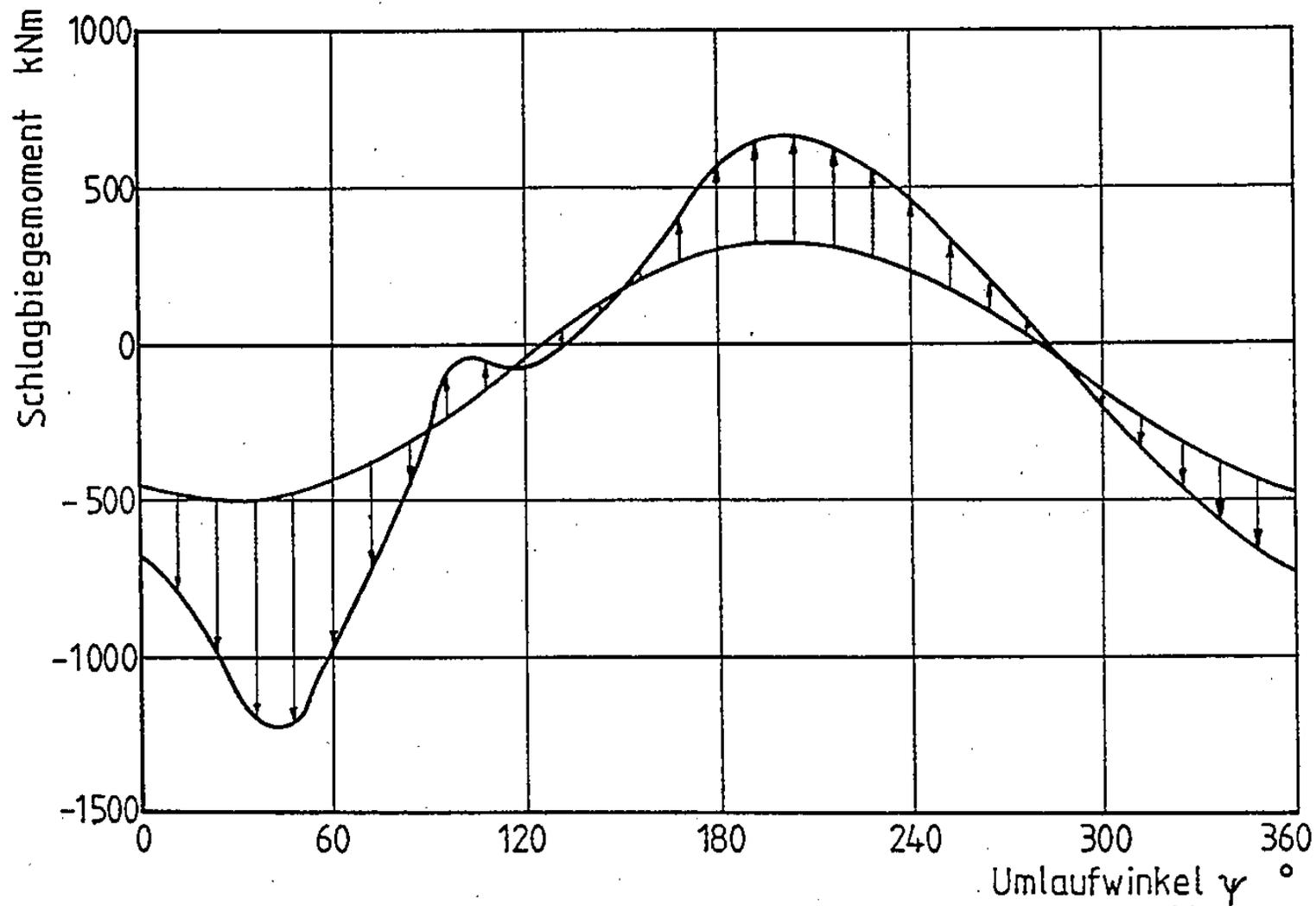






# Strukturbelastungen

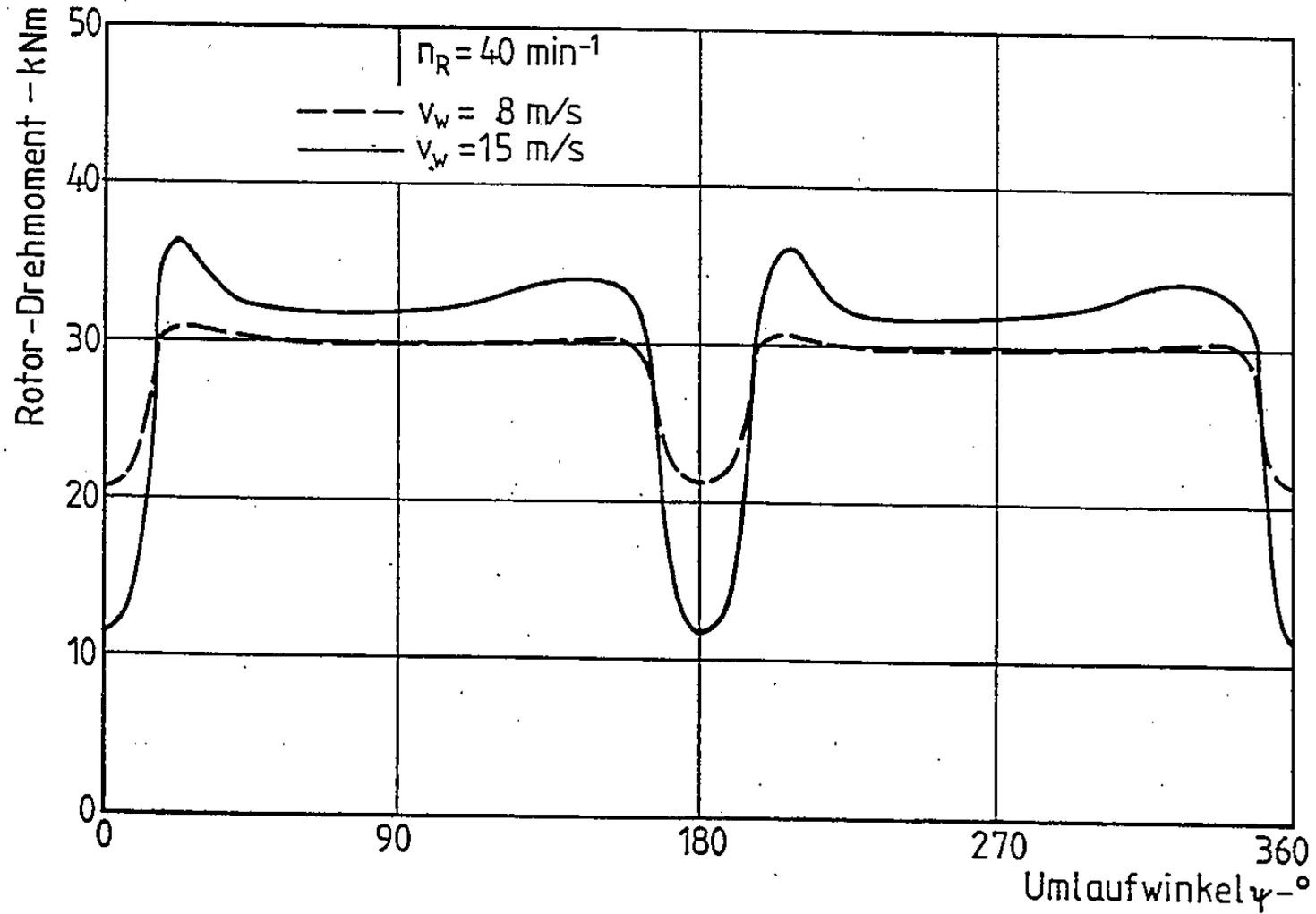
Turmschatten – Growian (1-Blatt - LEE)





# Strukturbelastungen

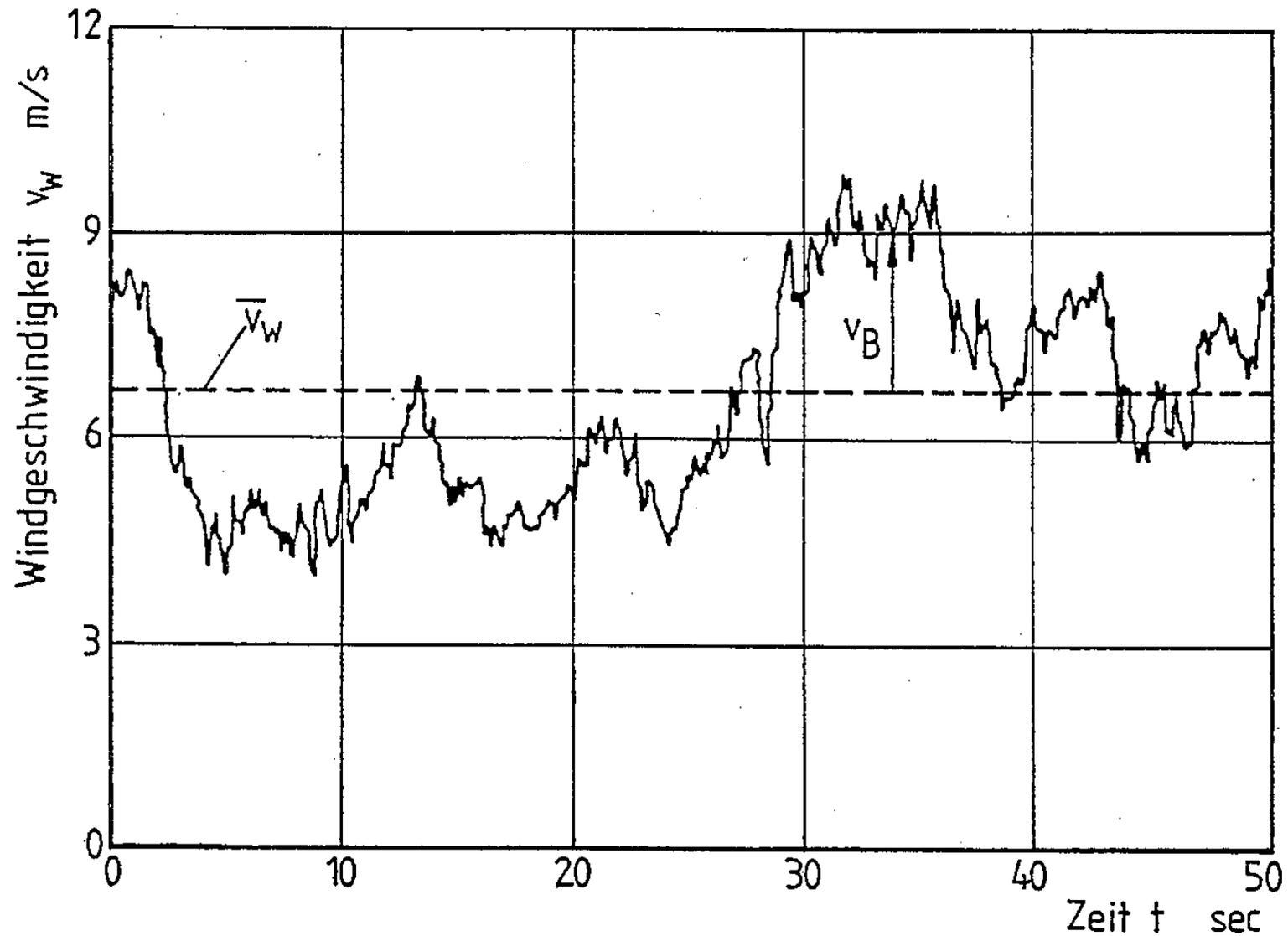
Turmschatten – MOD0 (2-Blatt – LEE)





# Strukturbelastungen

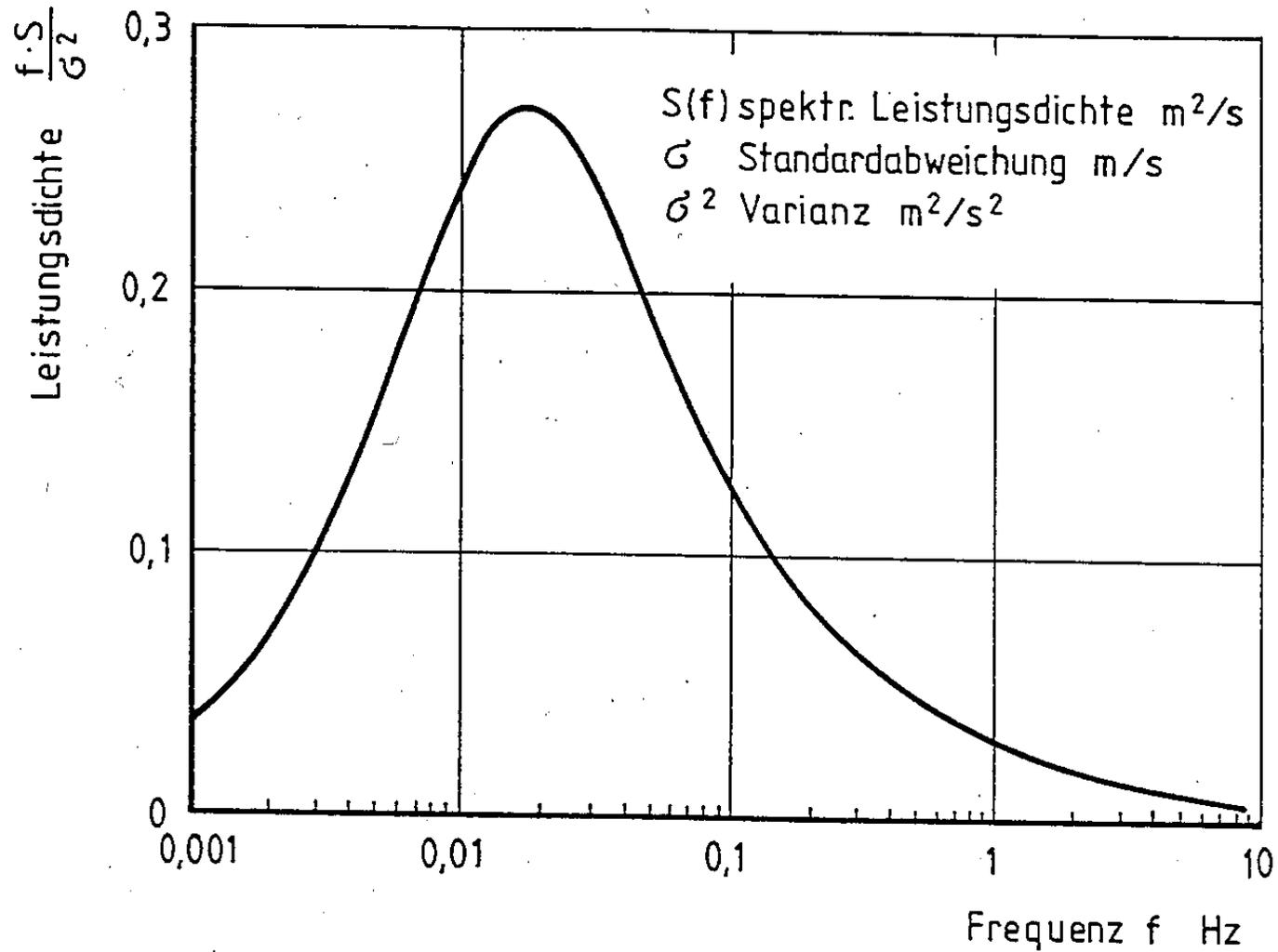
## Windgeschwindigkeit hochaufgelöst





# Strukturbelastungen

## Turbulenzspektrum

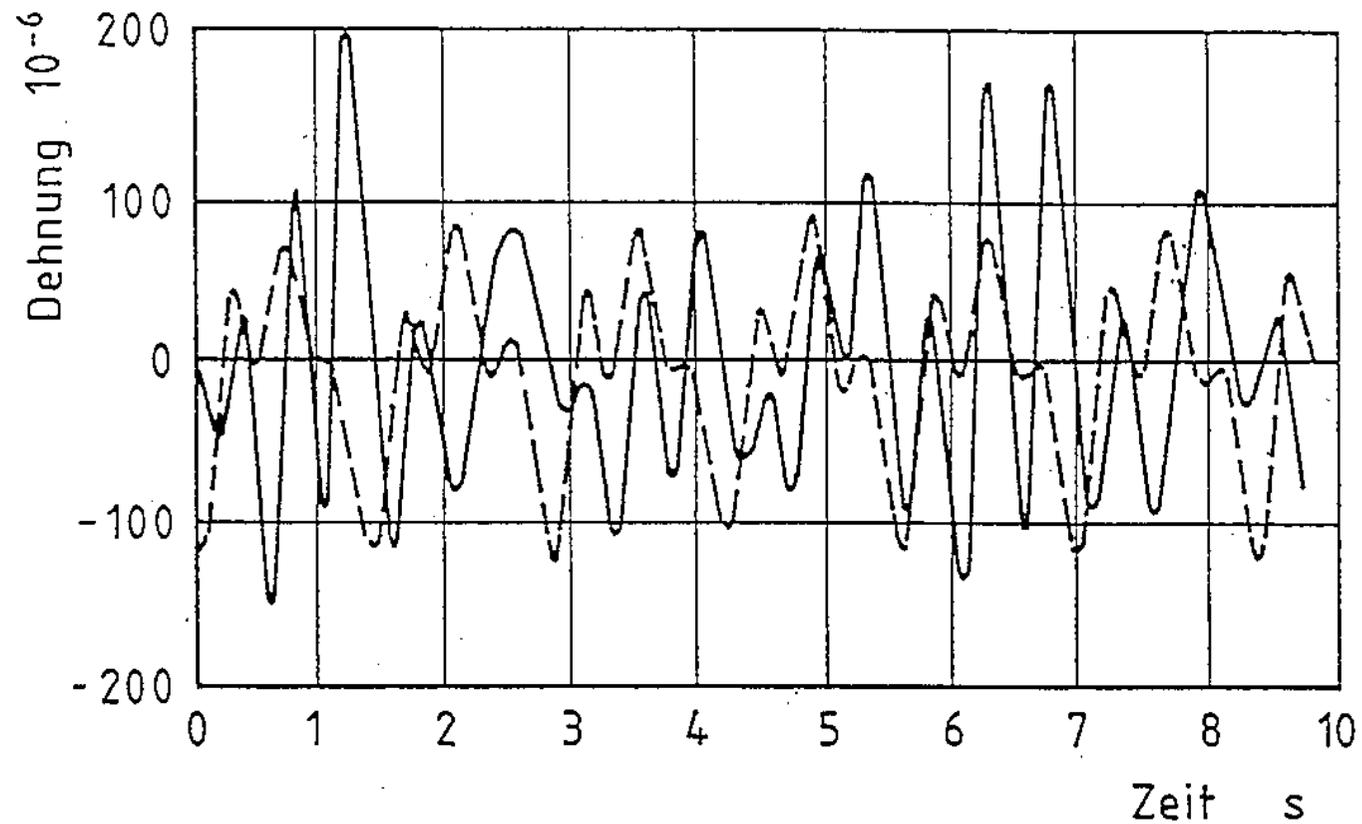




EIFER

# Strukturbelastungen

Dehnung HPW300

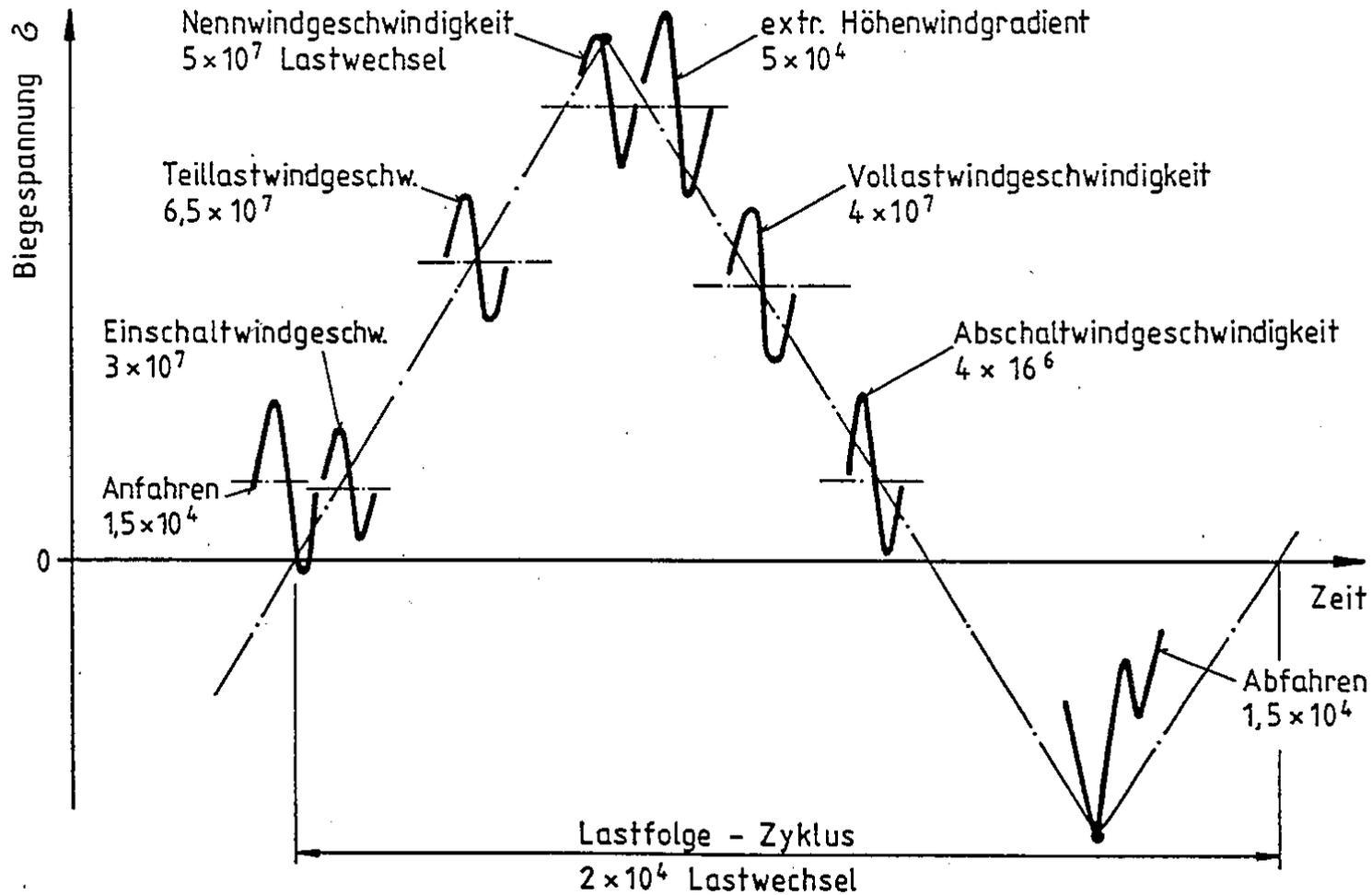


- nur unter dem Einfluß umlaufperiodischer Störungen der Anströmung
- mit Berücksichtigung der Windturbulenz



# Strukturbelastungen

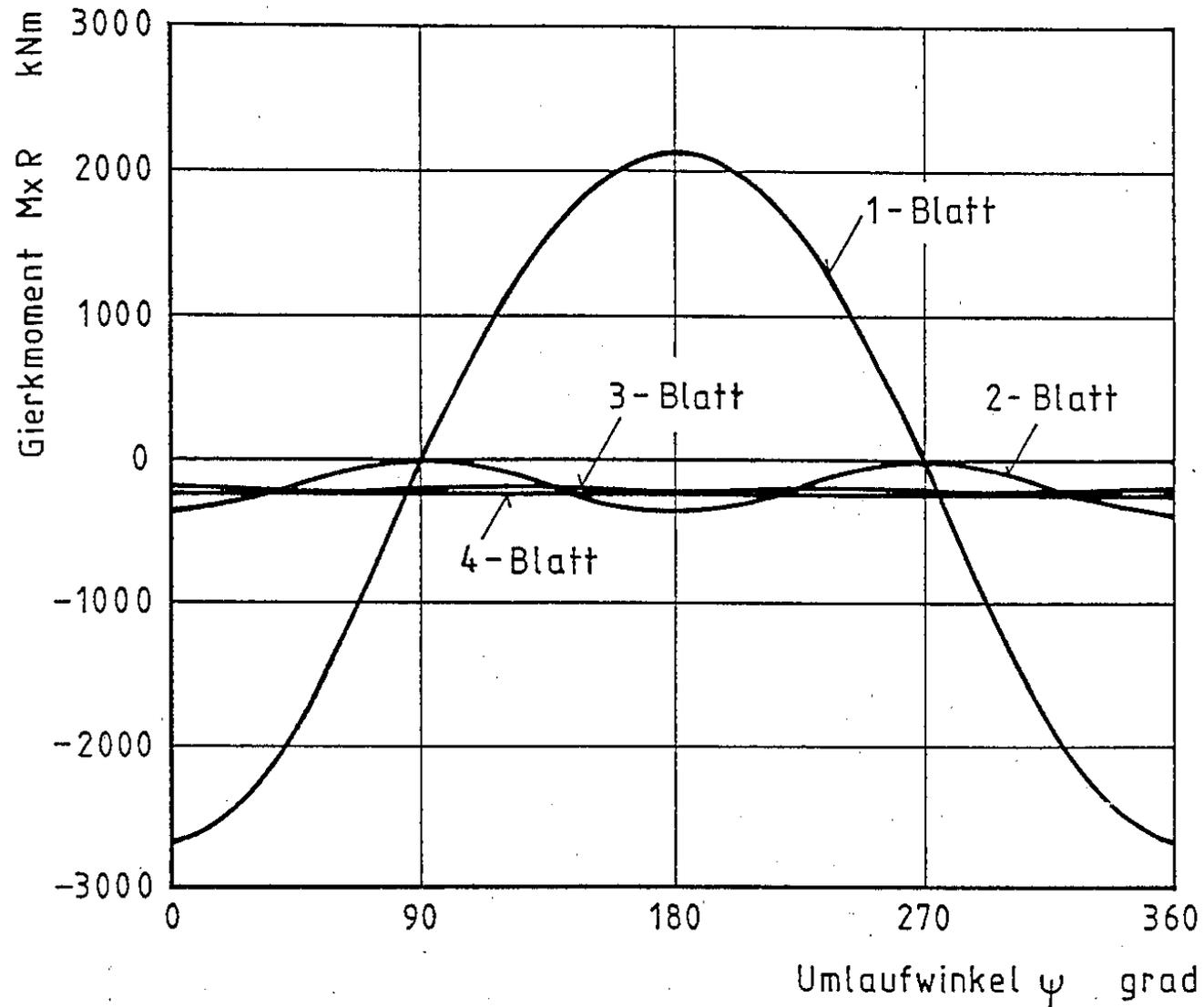
## Idealisierte Lastfolge





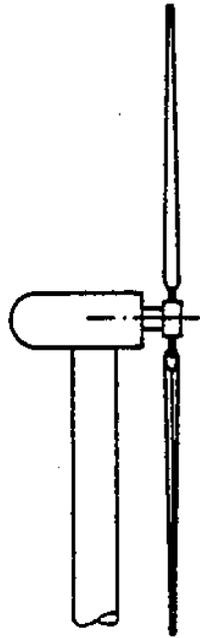
# Strukturbelastungen

## Unsymmetrische Anströmung - Giermoment

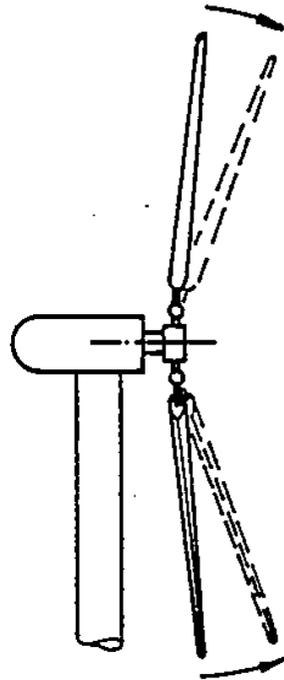


# Strukturbelastungen

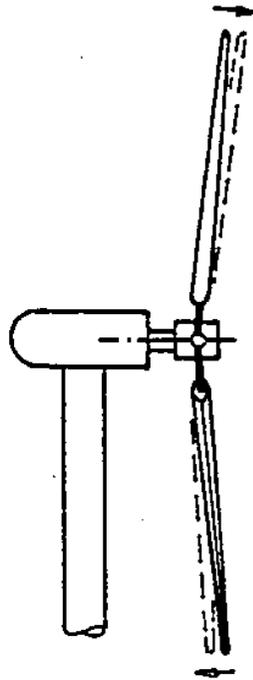
## Rotornabengelenke



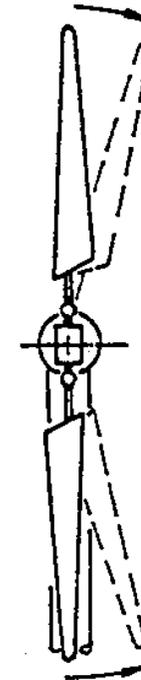
Gelenkloser Rotor



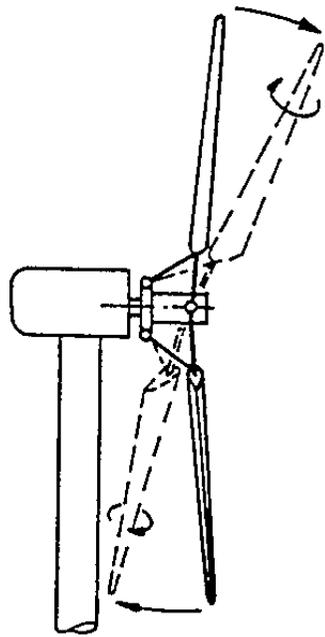
Blattschlag -  
gelenke



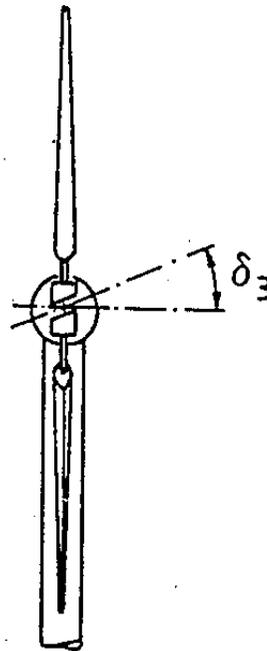
Pendelrotor



Blattschwenk-  
gelenke



a.



b.

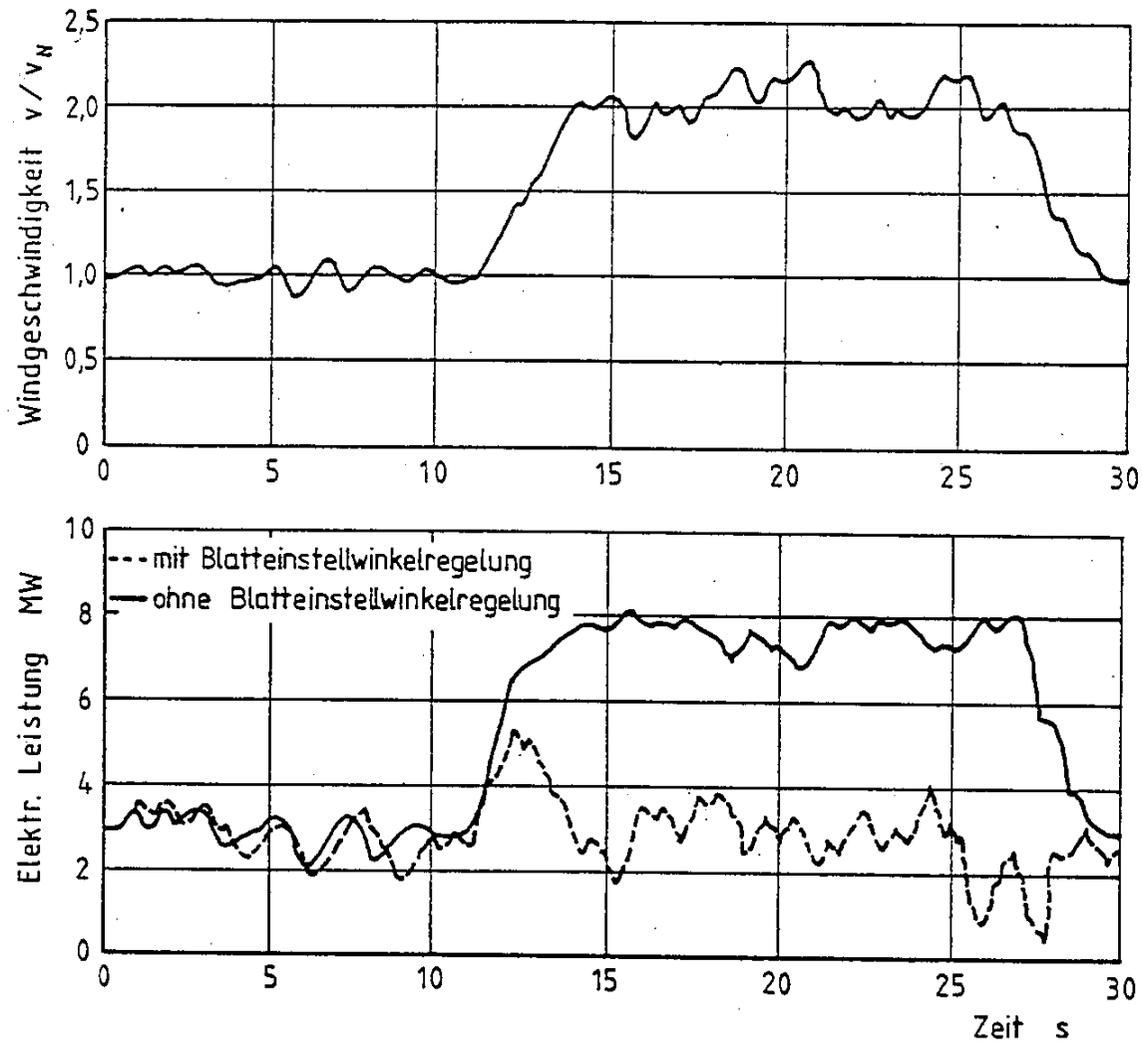
**Bild 6.26.** Blattwinkelrücksteuerung beim Pendelrotor  
a) über ein mechanisches Gestänge  
b) mit einer Schrägstellung der Pendelachse ( $\delta_3$ -Winkel)



EIFER

# Strukturbelastungen

## Blattwinkelrücksteuerung - Auswirkungen

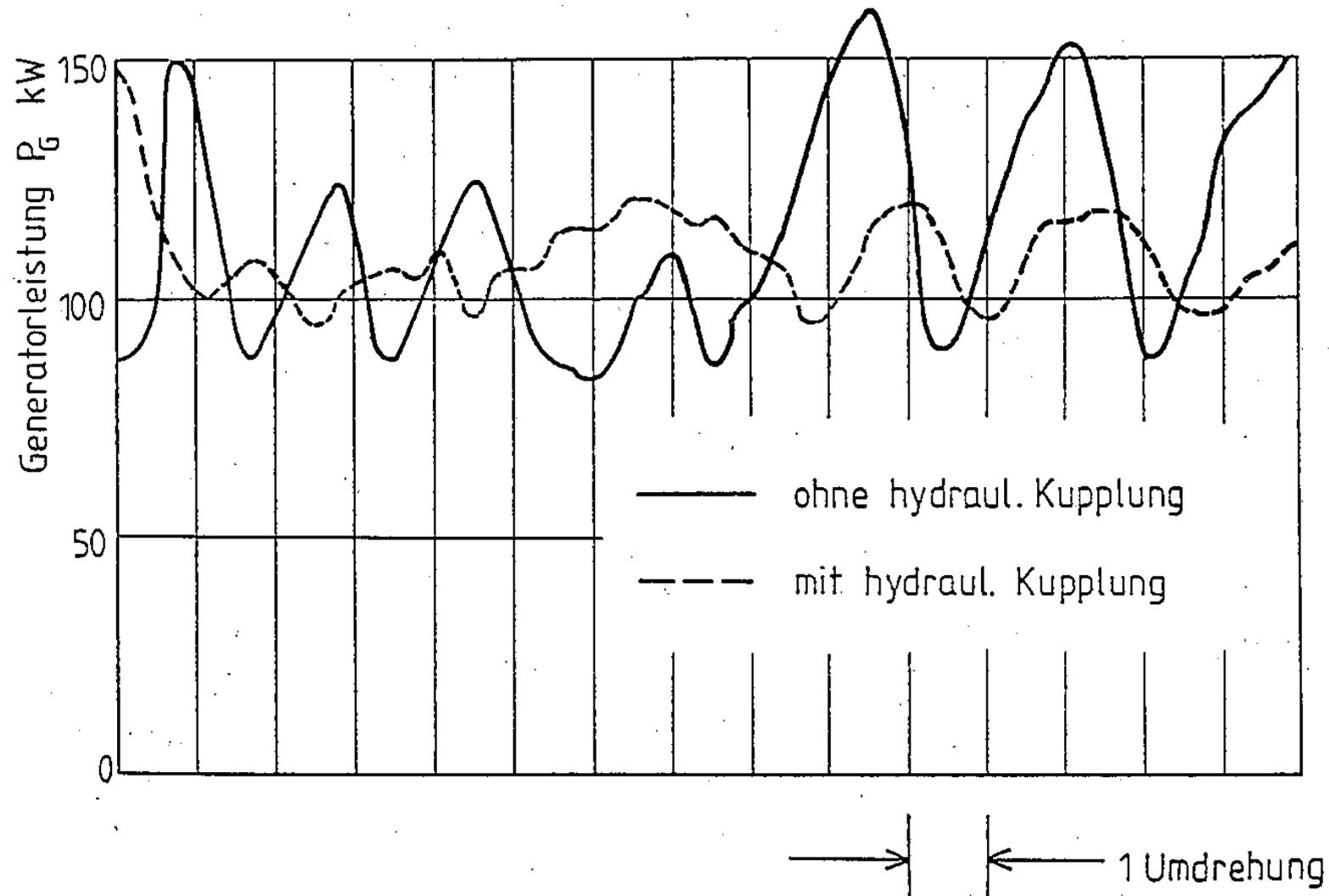




EIFER

# Strukturbelastungen

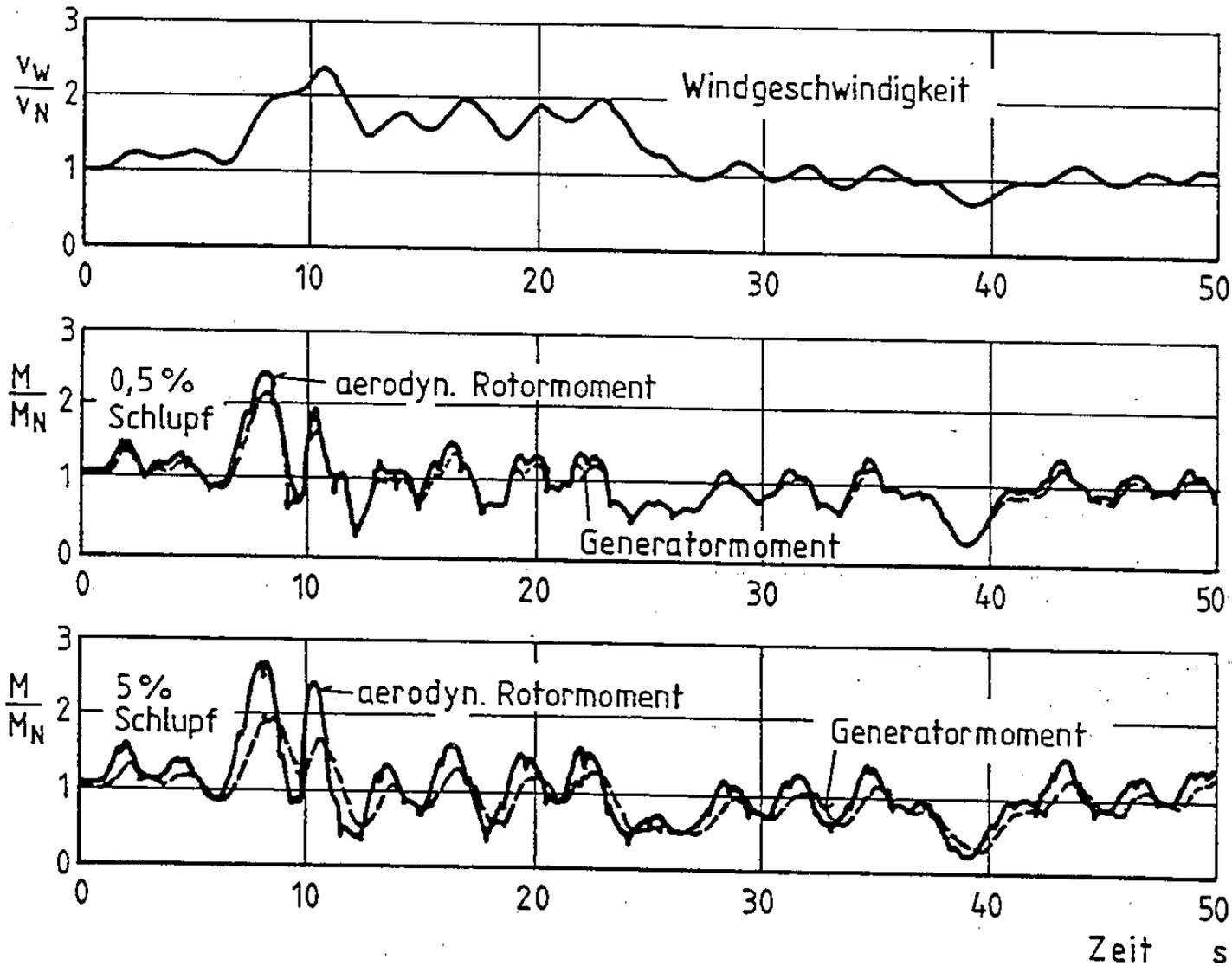
## Hydraulische Kupplung





# Strukturbelastungen

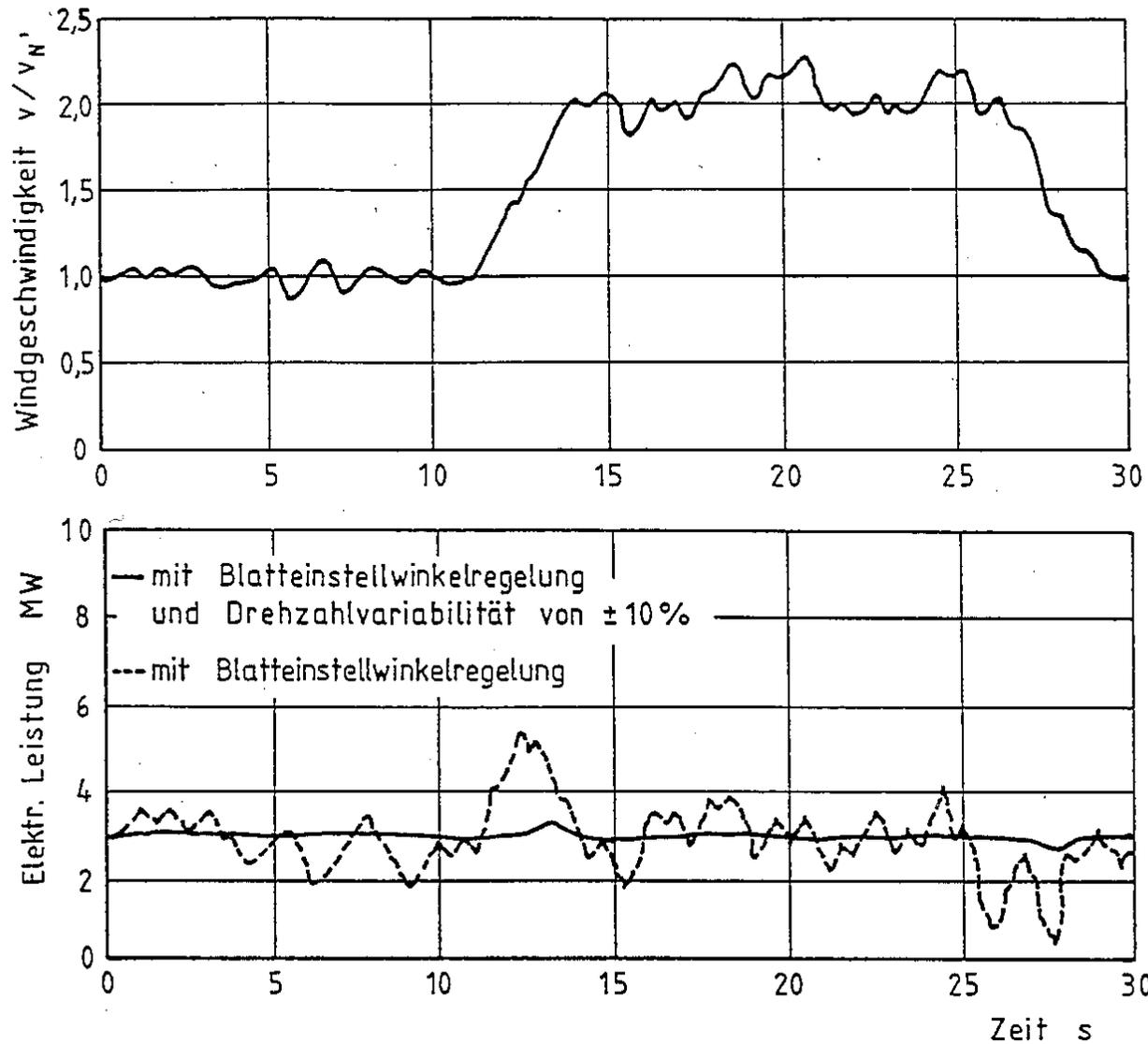
## Asynchrongenerator





# Strukturbelastungen

## Drehzahlvariabler Synchrongenerator mit Frequenzumrichter

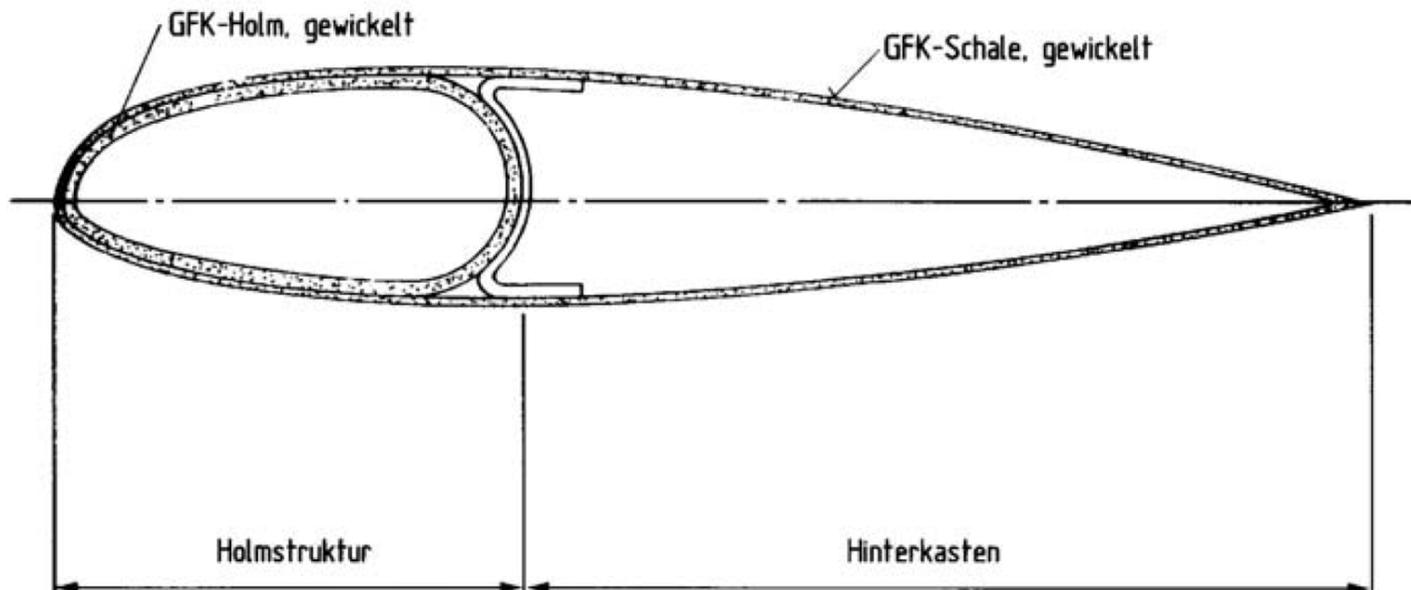
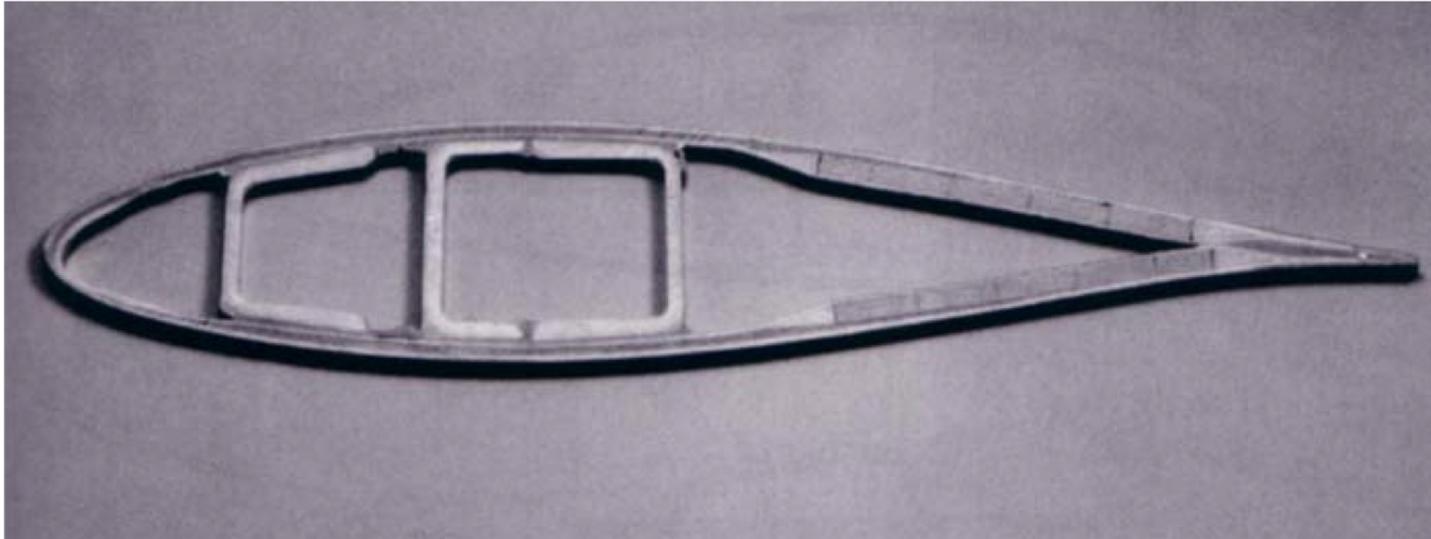




EIFER

# Strukturbelastungen

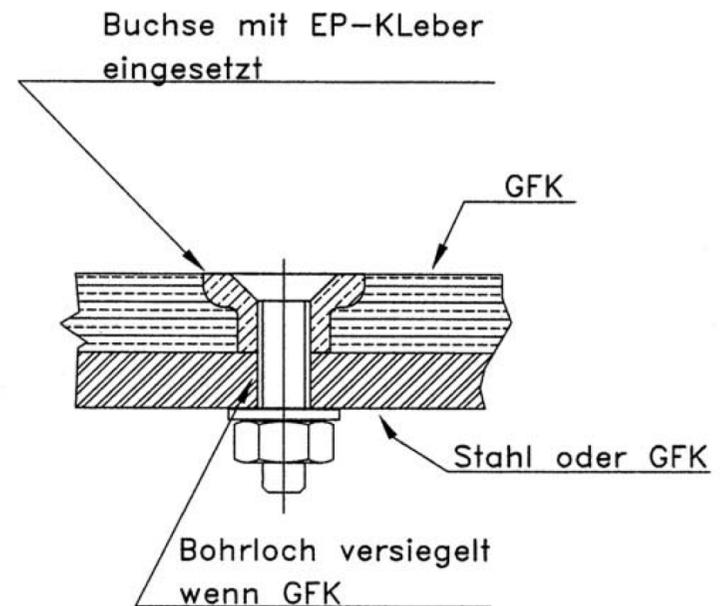
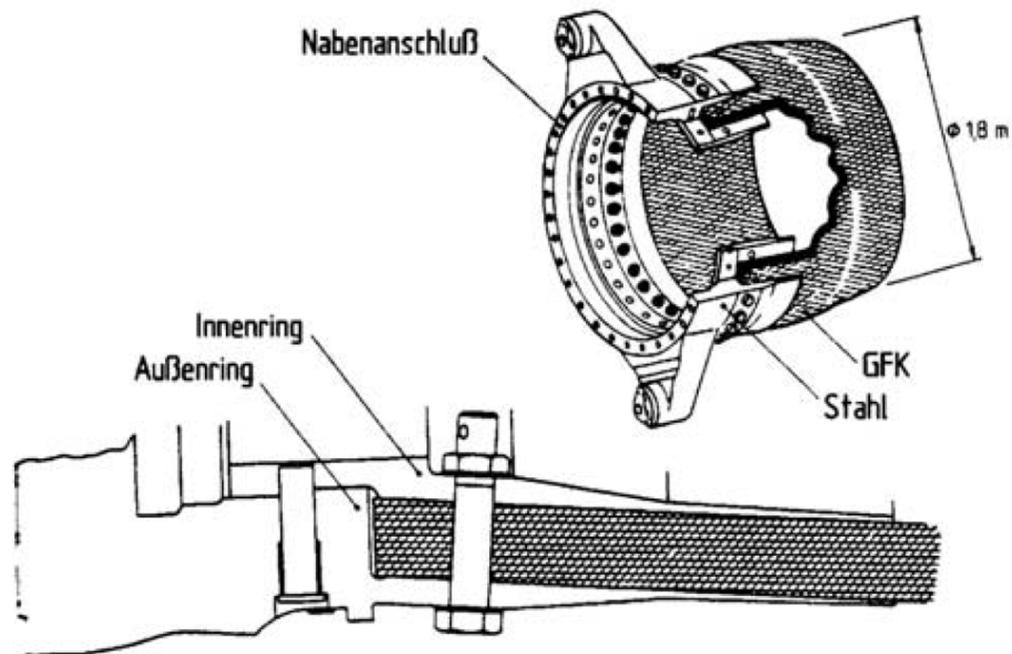
## Rotorblatt GFK





# Strukturbelastungen

## Nabenverbindung

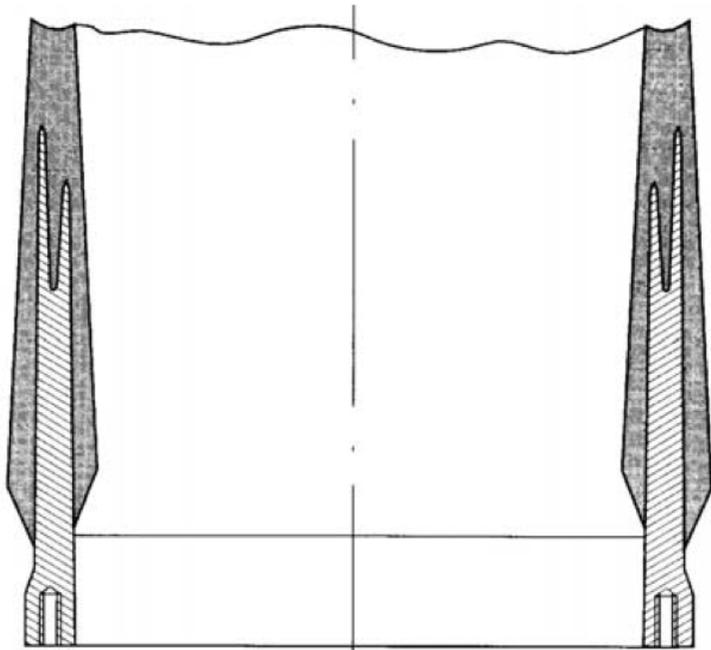




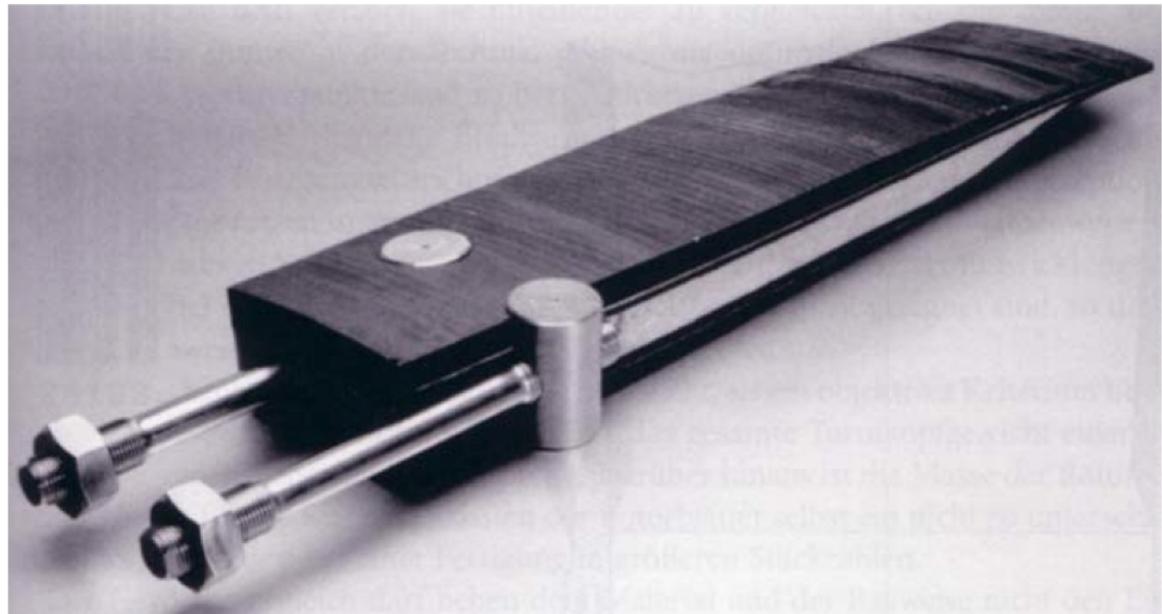
EIFER

# Strukturbelastungen

## Nabenverbindung II



Leichtbaufansch

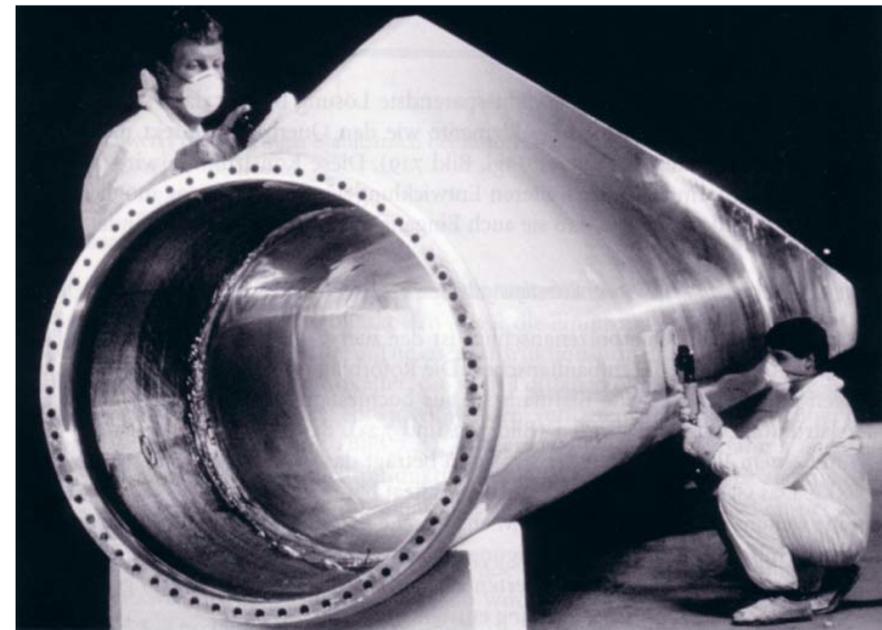
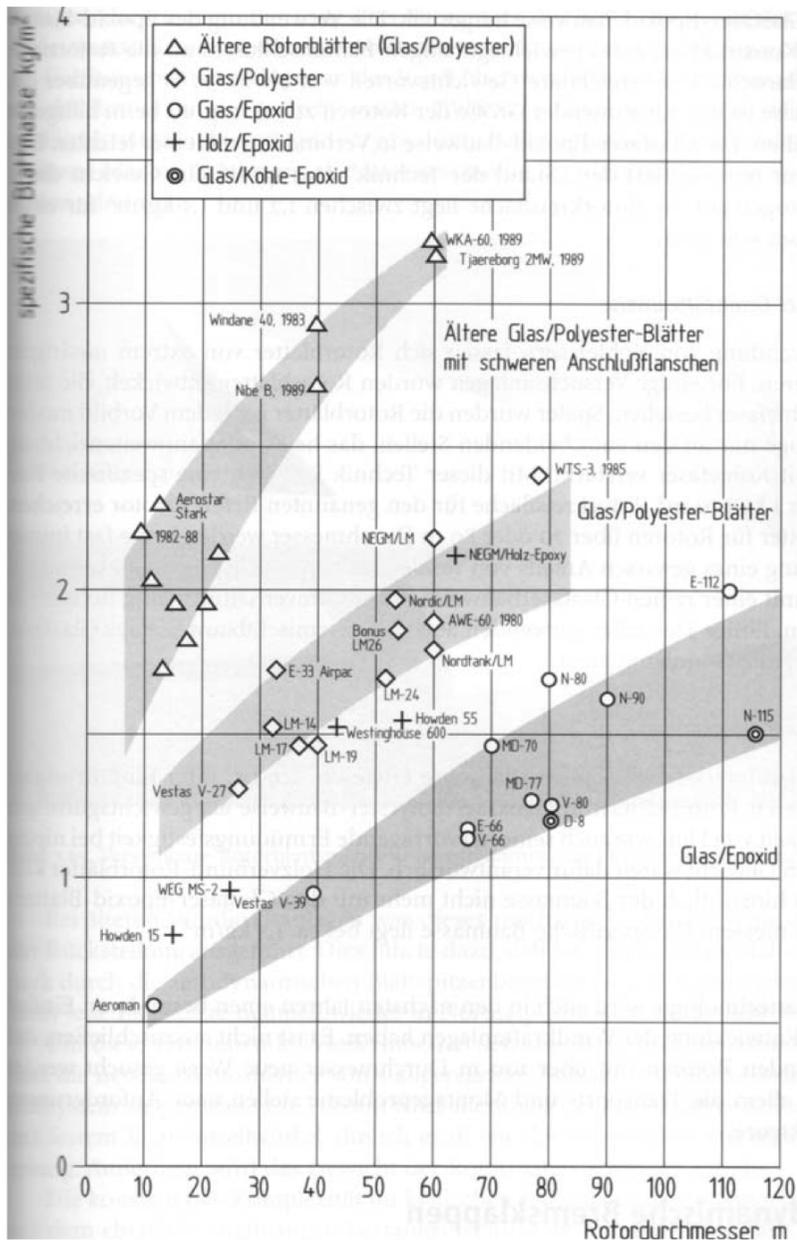


Querbolzen (Ikea-Anschluss)



# Strukturbelastungen

## Rotorblatt Fertigung / Gewicht





# Strukturbelastungen

## Turmkonzepte

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 <sup>1)</sup> [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 <sup>2)</sup> [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

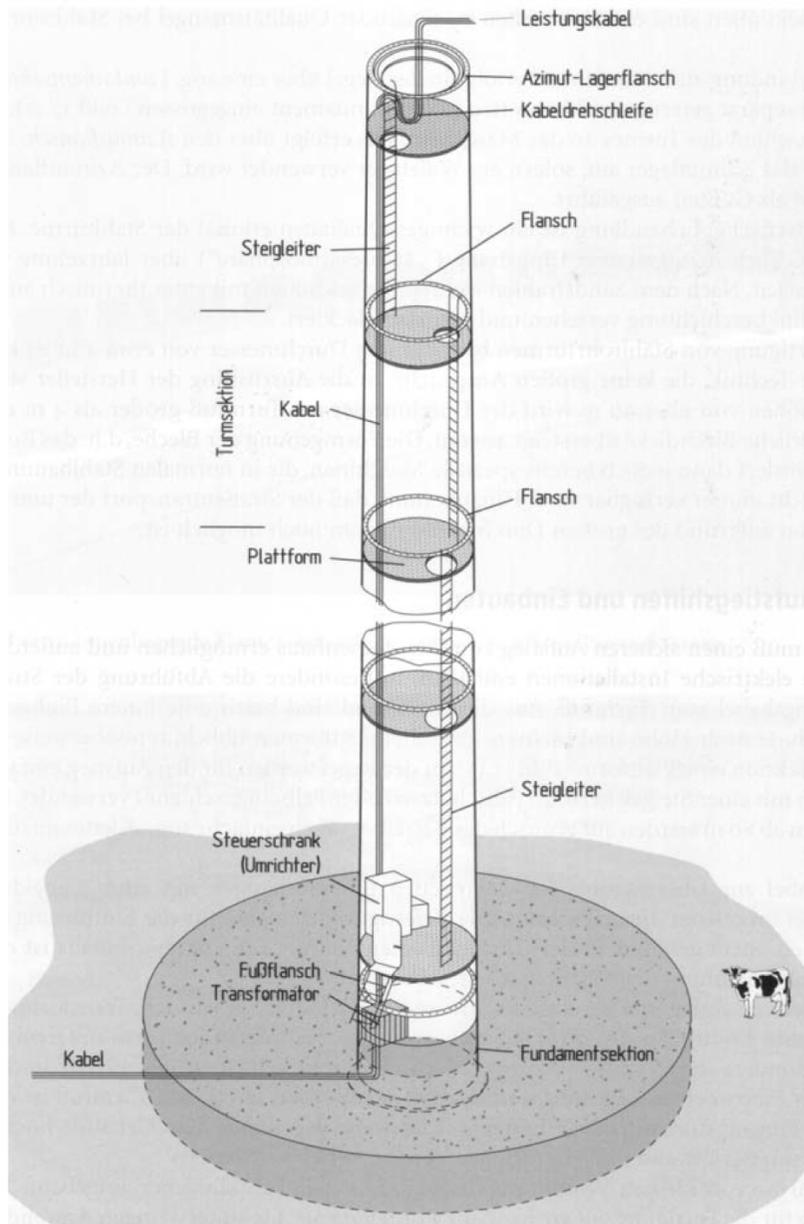
<sup>1)</sup> inkl. Aussteifungen und Anschlussflansche

<sup>2)</sup> inkl. Einbauten



# Strukturbelastungen

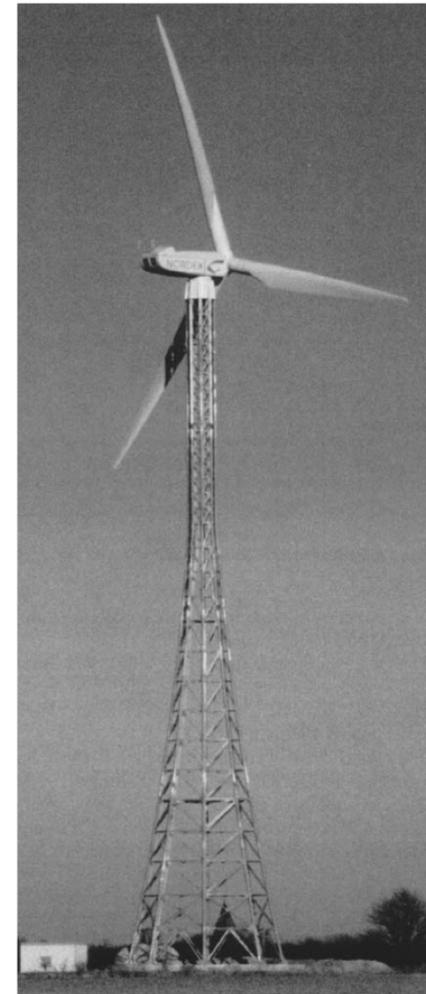
## Turmkonzepte II



Growian



Stahlbeton  
konisch





EIFER

# Strukturbelastungen

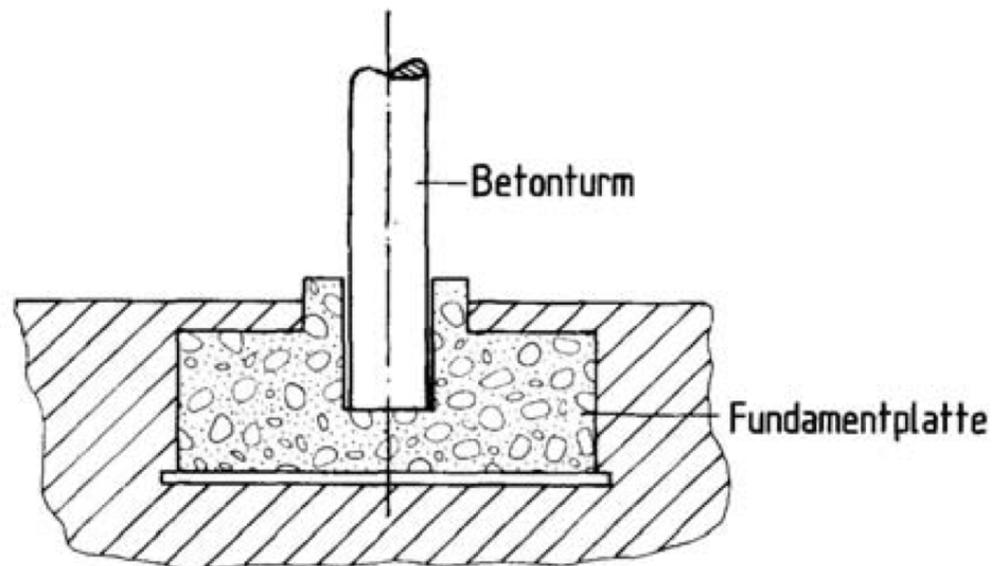
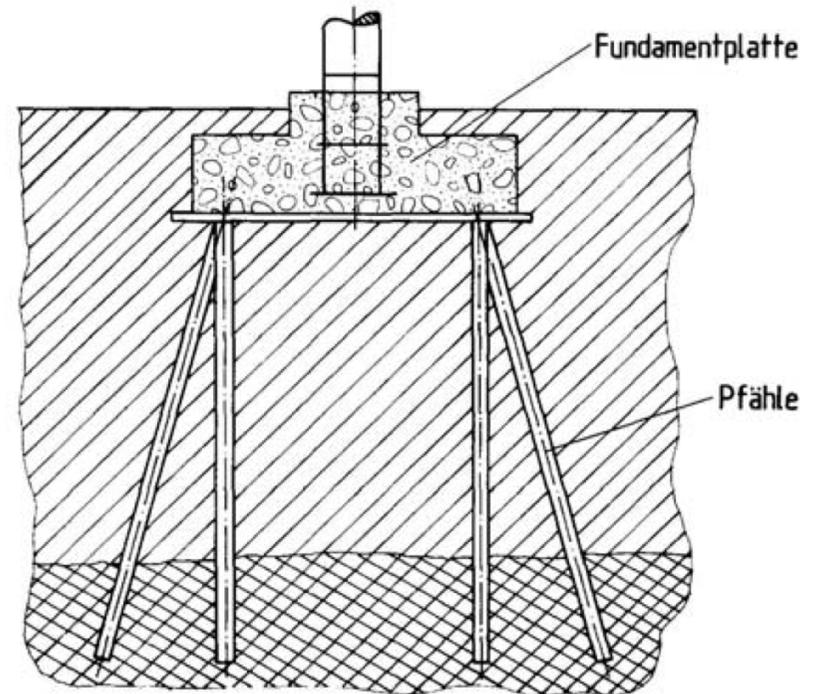
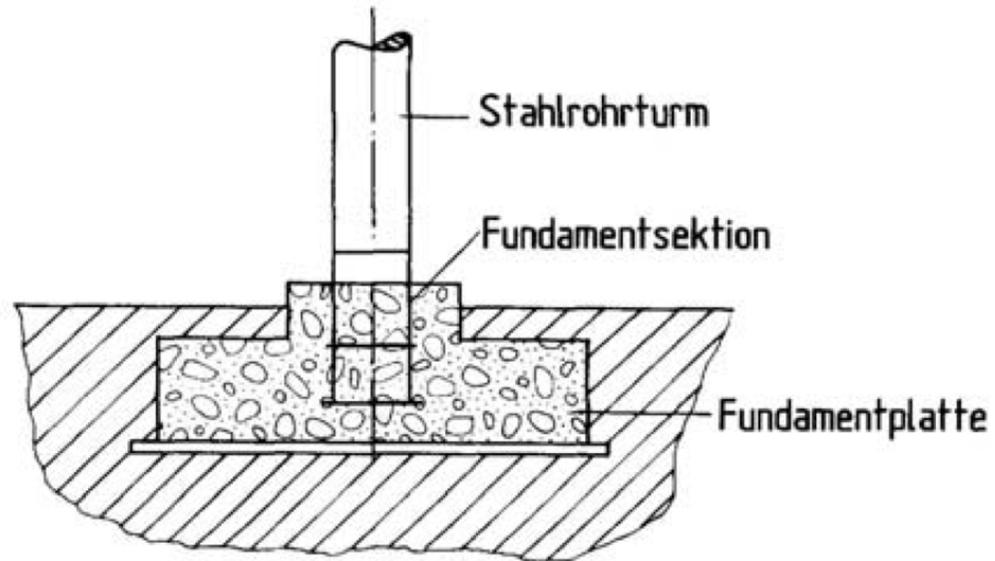
## Turmkonstruktionen





# Strukturbelastungen

## Fundamente





# Strukturbelastungen

## Fundamente II

