

Türme – Träger für Windräder und Antennen

Hermann Schulte

1. Einführung

Die im 19. Jahrhundert entwickelte Funktechnik erforderte den Bau von hohen Turmbauwerken aus Stahl. Das wohl bekannteste Beispiel ist der zur Weltausstellung 1889 erbaute 301 m hohe Eiffelturm in Paris, in Anlehnung daran wurde 1926 der Funkturm in Berlin gebaut. Viele andere Turm- und Mastbauwerke aus Stahl folgten, wenn auch namentlich nicht so bekannt, davon einige mit noch größeren Bauhöhen. Die Höhe wird benötigt, um die Reichweite für die Sendeantennen zu erreichen. Die neuere Anwendung für Türme als Träger für Windenergieanlagen erfordert ebenfalls große Höhen zur Ausnutzung der Windenergie.

2. Antennenträger

2.1 Bauarten - Es lassen sich im wesentlichen drei Konstruktionsweisen von hohen Antennenträgern aus Stahl unterscheiden:

- Freistehende Türme als Fachwerk- oder Rohrtürme
- Abgespannte Maste
- Drehbare Antennenträger (Sonderkonstruktionen)



Bild 1: Santa Palomba, Italien

2.2 Aufgaben der Antennenträger

Ein kurzer Überblick über die Funktechnik veranschaulicht die Aufgaben der Antennenträger für die zugehörigen Antennen. Für die Wellenlänge der Funkwellen gilt prinzipiell: Je kleiner die Antenne, desto höher die Frequenz, ähnlich wie die Tonhöhe bei einer Klavierseite.

Richtfunk wird im Gigaherzbereich betrieben. Die Antenne besteht aus einem Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 50 cm bis zu ca. 10m. Diese Antenne muß einen Empfänger oder eine andere Empfangsantenne direkt anstrahlen können (Sichtverbindung). Aufgrund der Erdkrümmung beträgt die mögliche Entfernung zwischen zwei hundert Meter hohen Türmen dann ca. 60 km unter Berücksichtigung eines Freiraumes für Hindernisse auf der Erdoberfläche, z.B. Bebauungen. Die Richtfunkverbindung (RF) wird für Telefonverbindungen eingesetzt und erfordert verformungsarme Turmkonstruktionen.

Die **Rundfunkantennen** für Radio und Fernsehen sind Ultrakurzwellensender (UKW) und bestehen wegen der Rundumstrahlung in der Regel aus mehreren kastenförmigen auf allen vier Seiten einer Turmspitze angeordneten Einzelantennen, deren Strahlungsdiagramm stark vom Abstand der Einzelantennen beeinflusst wird. Dieser Abstand bestimmt die Dimensionen der Turm bzw. Mastspitze. Die Reichweite ist ähnlich wie beim Richtfunk.

KW (Kurzwellen)-Antenne .Eine großflächige, senkrecht stehende Antenne aus vertikal und horizontal gespannten Drähten mit einem dahinter parallel gespannten Reflektor gleicher Abmessungen. (Siehe Bilder 6,7,8). Die Größe kann z. B. die Fläche von zwei Fußballfeldern einnehmen. Die Antenne ist entweder zwischen mehreren Türmen gespannt oder in neuer Bauart als drehbare Antenne (Drehstand) ausgeführt. Die Antennensignale werden in der Ionosphäre reflektiert und folgen der Erdkrümmung. Unter günstigen Witterungsverhältnissen ist eine weltweiter Empfang mit Kurzwellenempfängern möglich. Auf der Sonnenabgewandten Seite (nachts) ist die Funkübertragung generell besser als tagsüber.

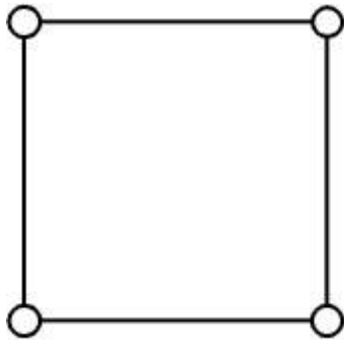
MW (Mittelwelle) – Antenne. Eine großflächige kegelförmig Antenne aus Drahtseilen mit Höhen bis zu ca. 100 m. Die Antenne steht senkrecht und ist radial in einer Kegelform um eine zentralen Mast angeordnet. Im Boden befindet sich ein Erdnetz. Die Wellenausbreitung erfolgt in einer Bodenwelle mit ca. 200 km Reichweite(radial). Nachts werden die Mittelwellen durch bestimmte Schichten in der Ionosphäre zurückgeworfen, wodurch ein Sender ca. 1500 km weit gehört werden kann. Die neue Entwicklung der digitalen Mittelwelle macht jedoch eine erhebliche Vergrößerung der Reichweite möglich mit einer erheblichen Verbesserung der Klangqualität.

LW (Langwelle) – Antenne. Im englischen LF (Low Frequency) genannt. VLF = very low frequency. Es handelt sich dabei um Antennen mit sehr großer Länge, bis zu mehreren hundert Metern. Die Antenne steht senkrecht. Für die Erzeugung der Langwellen ist der Mast selber die Antenne, steht unter Strom und ist daher zum Erdboden und an den Tragseilen mit Isolatoren bestückt. Die sehr langwelligen Signale (die Masthöhe entspricht der halben Wellenlänge) haben die Eigenschaft am Boden „entlang zu kriechen“, wodurch man mit einem einzigen starken Sender ein ganzes Land mit der Größe Deutschlands versorgen kann. Darüber hinaus haben Langwellen bei sehr niedriger Frequenz (unter 30 khz) als einzige elektromagnetische Wellen die Eigenschaft, in die Wasseroberfläche bis zu einer gewissen Tiefe einzudringen, was die Kommunikation zu U-Booten ermöglicht. Ein Langwellensendemast kann einen rohrförmigen Querschnitt besitzen, aber auch aus einer Fachwerkkonstruktion bestehen.

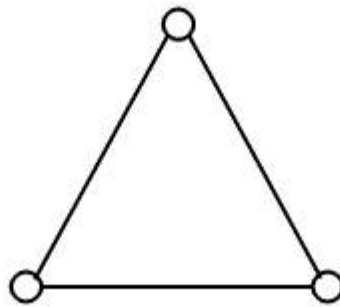
Die Auswahl der Antennenträgerkonstruktion ist nun bestimmt aufgrund der Anforderungen aus der Funktechnik.

Freistehende Türme dienen fast ausschließlich als Träger für Antennen, in der Regel Parabolspiegel oder Fernsehantennen für die Übertragung von Telefongesprächen und/oder Fernsehsendungen und weiterer Funkdienste. Die Ausführung ist als senkrecht stehender Rohrturm oder als Fachwerkturm möglich. Die Fachwerktürme lassen eine bessere Gewichtsoptimierung und eine größere Bauhöhe zu. Für Bauhöhen die 100 m deutlich übersteigen, ist in der Regel eine Mastkonstruktion mit Abspannungen günstiger, verbunden mit dem Nachteil eines großen Platzverbrauches. Die möglichen Grundrissarten der Turm bzw. Mastkonstruktionen sind nachfolgend dargestellt. Der Grundriss wird je nach Anforderungen an die Steifigkeit, Tragfähigkeit und gestalterischen Anforderungen gewählt.

A1 – vierstielig
(Aussteifung mit
Horizontalverbänden)



A2 – dreistielig



A3 - Rohrtürme/ -maste

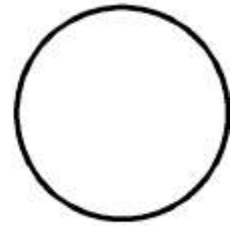


Bild 2: Grundrissarten

Eckstiele aus Winkelprofilen oder Rohren, Ausfachungen aus Winkelprofilen oder Rohren, gemischte Profilwahl möglich.

Querschnitt aus einem großen Stahlrohr, bei Türmen oft konisch.

Fachwerkarten: Die unten dargestellten Ausfachungssysteme werden je nach Abmessung der Turmkonstruktion und in Abhängigkeit der erforderlichen Knickaussteifung gewählt. Siehe hierzu Bild 4

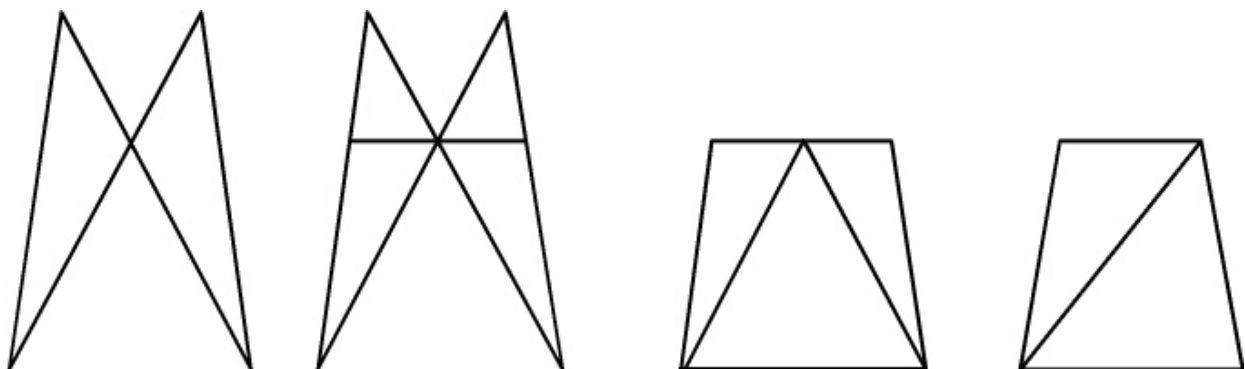


Bild 3: Fachwerkartenarten

Kreuzfachwerk

Kreuzfachwerk mit
Horizontalstab

K-Fachwerk

Z-Fachwerk

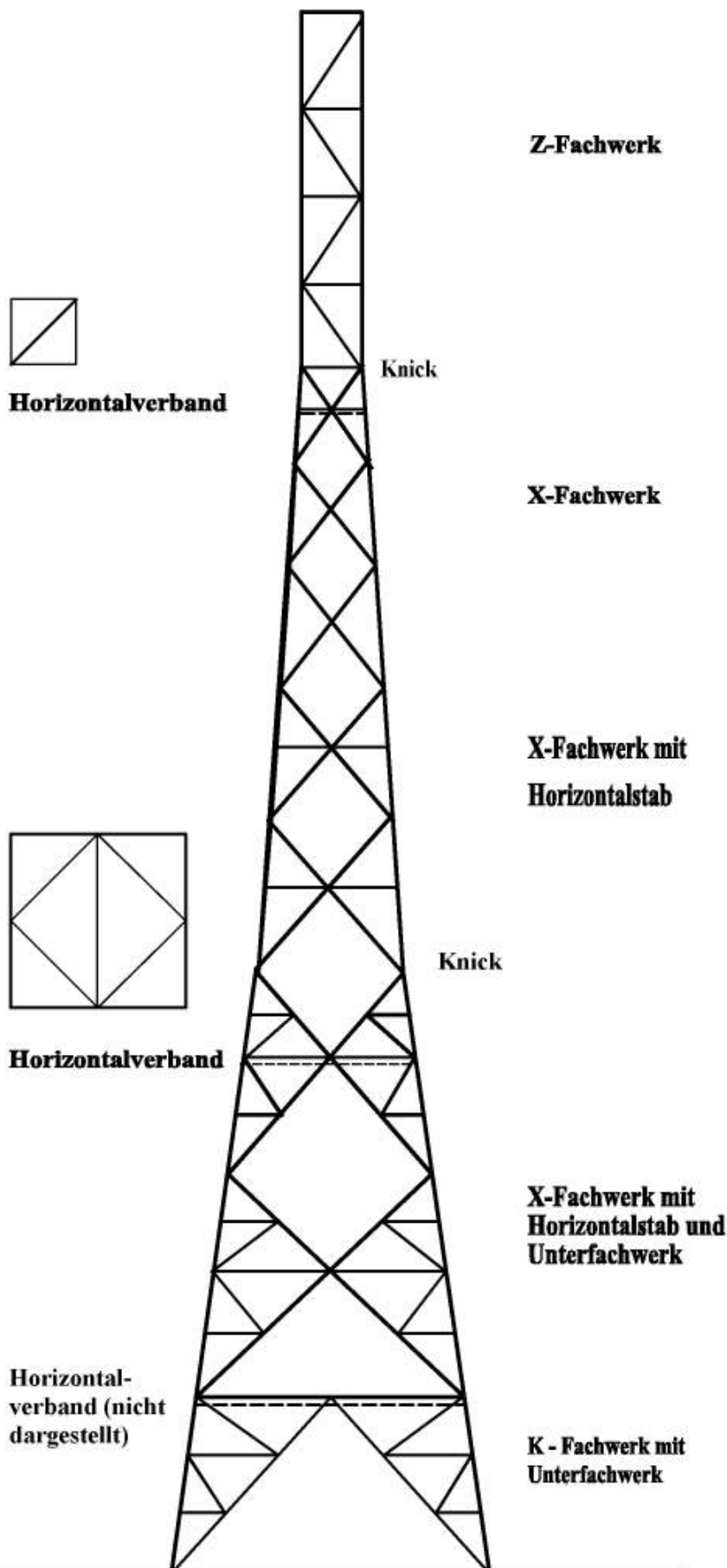


Bild 4: Prinzipskizze eines Fachwerksturmes mit gemischten Ausfachungsarten. Antennenbeleuchtung und Anbauten nicht dargestellt

Fachwerktürme

In der Regel kommen mehrere der obigen Fachwerkarten bei einem Turm zur Anwendung, wie nebenstehendes Bild zeigt. Zur Reduzierung der Knicklänge der Eckstiele werden Horizontalstäbe und ggf. zusätzliche Unterfachwerke eingebracht. Die Horizontalstäbe erfüllen zwei Funktionen: Die Knickaussteifung der Eckstiele und die Abtragung der auf das Diagonalkreuz wirkenden Windlast auf die Eckstielknoten.

Bei vierstieligen Türmen wird der unterste Horizontalverband bei der Aufstellung des untersten Turmschusses als Montageverband benötigt. Weitere Horizontalverbände sind vor allem in den Turmschüssen unterhalb eines Knickes erforderlich, um während der Montage die quadratische Form des Turmes zu fixieren.

Weitere An- und Einbauten eines Antennenträgers sind Steigewege einschließlich zugehöriger Ruhepodeste, Kabelwege, Antennenplattformen, Blitzschutz und bei größeren Turmhöhen eine Flugwarnbeleuchtung.

Abgespannte Maste.

Man unterscheidet von der Funktionsweise her zwei Arten von abgespannten Masten. Die einen dienen als Antennenträger und erfüllen die gleiche Funktion wie Fachwerktürme mit dem Vorteil, dass wesentlich größere Bauhöhen möglich sind. Die anderen sind Selbststrahler, d. h. der Mast selbst ist die Antenne und dient zur Erzeugung der oben beschriebenen Langwellen. Die Abspannung erfolgt nach drei Richtungen. Bei größeren Masten sind drei bis vier Abspannebenen üblich. Für den Mastschaft kommen alle oben aufgeführten Querschnitte zur Ausführung, jedoch nicht in konischer Form. Der unten abgebildete 350 m hohe Antennenträger, errichtet im Auftrage der Post in den siebziger Jahren in Berlin Frohnau, ist auf mehreren Plattformen an der Spitze mit Antennen bestückt und dient zur Telefonverbindung zu einem Mast gleicher Bauart und -höhe im 135 km entfernten Gartow an der damaligen innerdeutschen Grenze.



Drehbare Kurzwellen-Sendeanlagen haben im Vergleich zu fest aufgebauten Antennen den Vorteil, dass eine einzige Antenne die Funkversorgung von Zielgebieten ausführen kann, die in beliebigen Richtungen liegen. Die Reichweite dieser Antennen beträgt mindestens 2000 km, bei günstigen atmosphärischen Bedingungen ist ein weltweiter Empfang möglich. In der Regel sind auf der Vorder- und Rückseite der Konstruktion jeweils eine Antenne angebracht, die sich in der Größe und damit in den Frequenzbereichen unterscheiden. Ein zwischen diesen Antennen angebrachter Reflektor bewirkt, dass eine Antenne nur in eine Richtung strahlt. Die Antennen und der Reflektor aus vertikal und horizontal gespannten Seilen erstrecken sich über eine große Spannweite bis zu ca. 80m. Das Tragwerk besteht aus einem festen Fußteil, das in der Regel die Elektronik für die Antennentechnik aufnimmt, und dem drehbaren Turmschaft mit einem Rohrdurchmesser von 4m, der in ca. 5m Höhe über eine Rollendrehverbindung drehbar mit der Unterkonstruktion verbunden ist. Die Drehung erfolgt durch zwei Elektromotore, mit denen das obere Tragwerk über einen Zahnkranz in ca. 3 Minuten eine Komplettumdrehung ausführen kann, auch bei voller asymmetrisch wirkender Windlast bei gleichzeitiger Vereisung des Tragwerkes. Das Tragwerk kann auf zehntel Grad genau ausgerichtet und in dieser Stellung mit einer Haltebremse fixiert werden. Diese drehbaren KW Antennen –kurz Drehstände genannt- wurden bislang von zwei Herstellern in unterschiedlicher Ausführung errichtet. Das untere Bild zeigt den Drehstand der Fa. Thales, Niederlassung Mannheim. Vier Drehstände dieses Typs wurden in Nauen in der Nähe von Berlin für die deutsche Welle errichtet. Mit einem Kurzwellenempfänger können die Rundfunksendungen auch in weit entfernten Ländern empfangen werden. Die Besonderheit dieser Ausführung liegt im Unterbau aus einem Betongebäude, das die Sendetechnik aufnimmt, und in der Anordnung fester Dipole.

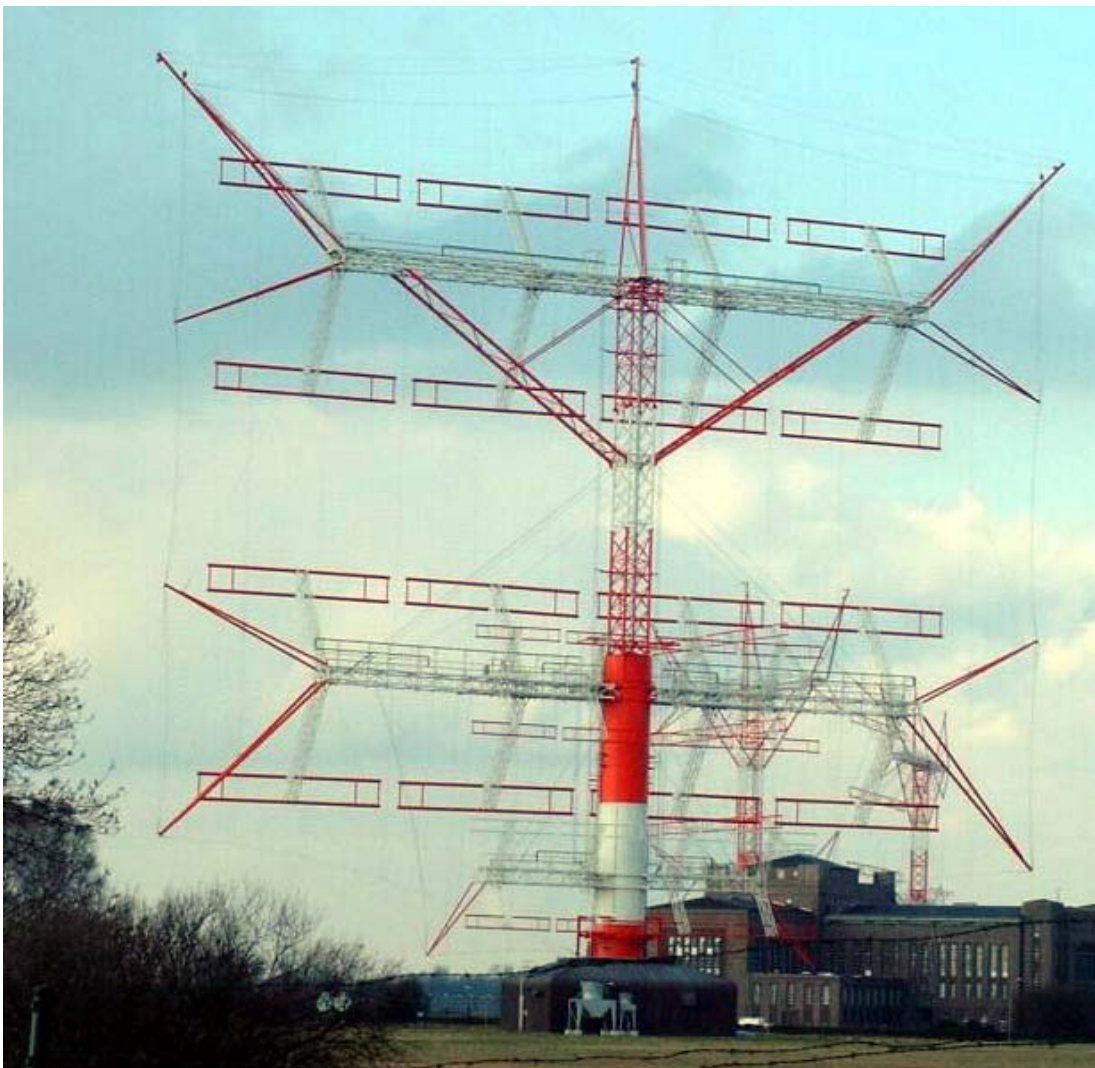


Bild 6: Drehstand der Deutschen Welle in Nauen bei Berlin, Höhe ca. 80 m

Das Gegenstück zu diesem Antennentyp ist die unten abgebildete drehbare KW-Antenne der Fa. Telefunken aus Berlin, 1999 erbaut für die Marine in Marlow in der Nähe von Rostock. Das Bauwerk aus Stahl und Seilen ist ca. 90 m hoch und fast genauso breit. Eine Besonderheit ist die Aufhängung der Antennen an den oberen Befestigungspunkten. Die Befestigungsseile sind über Rollen in das Innere des Rohrschaftes geführt und an Gegengewichten befestigt, die bei jeder auf die Antennen wirkenden Wind- und Eislast immer die gleichen Spannung auf die Antennenseile ausüben. Dadurch entsteht ein „intelligentes“ Tragverhalten der Antenne bei hoher Belastung. Insgesamt 10 Gegengewichte aus Beton mit 50 to Gesamtmasse im inneren des Rohrschaftes können der Belastung nachgeben, sich 12 m nach oben bewegen und bei Entlastung wieder in ihre Ursprungslage zurückkehren. Die Gegengewichte sind so bemessen, dass die Antennenvorhänge bis zur höchsten Windgeschwindigkeit nahezu parallel auswehen, wodurch ein uneingeschränkter Sendebetrieb ermöglicht wird. Das Tragwerk mit mehr als 200 to drehbare Masse kann auch bei voller Vereisung noch bei Windgeschwindigkeiten bis zu 120 km/h gedreht werden. Die Antennen dienen zur Funkverbindung der Marine an ihre Schiffe an beliebigen Orten mit einer Mindestreichweite von 2000 km. Bei günstigen atmosphärischen Bedingungen ist die Reichweite nahezu unbegrenzt.



Bild 7:Drehantenne Marlow

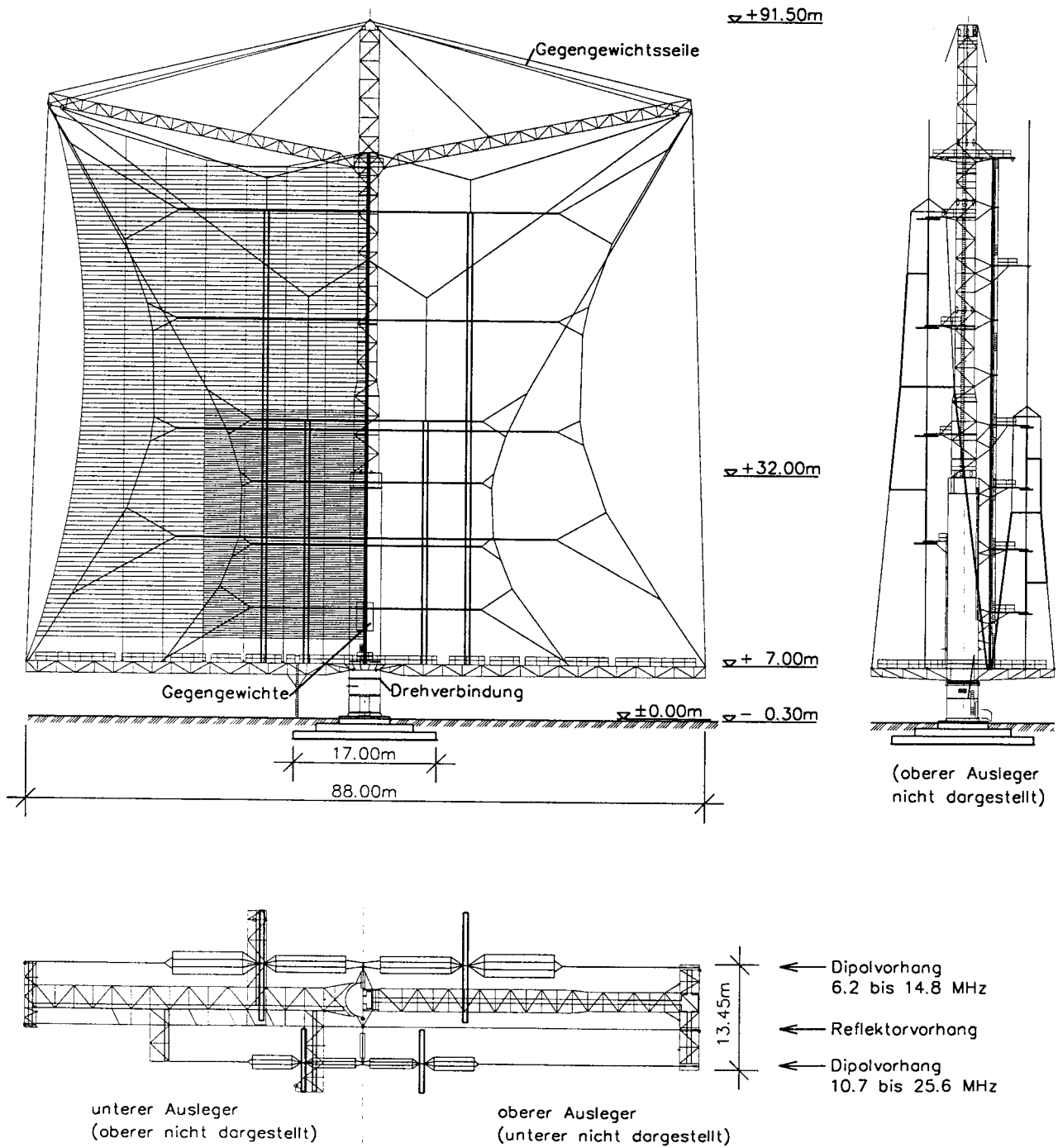


Bild 8: Systemzeichnung der Antennen und des Tragwerkes mit Lage der Drehverbindung und der Gegengewichte

Belastungen der Antennentragwerke.

Außer dem relativ geringen Eigengewicht der Bauwerke ist der Wind die Hauptlast, die bei Eisbehang noch erheblich verstärkt auftreten kann. Die Berechnungsnorm ist die DIN 4131 von 1991, die momentan überarbeitet wird und dann als Teil 7-1 „Türme, Maste und Schornsteine“ des Eurocode 3 herausgegeben wird. Trotz umfangreicher Neuerungen in den Rechenvorschriften ist für den jetzigen Kenntnisstand keine wesentliche Auswirkung auf die Antennenträgerkonstruktionen zu erwarten. Die momentan noch gültige Fassung der DIN 4131 sieht für die Belastung von Fachwerktürmen und Masten folgende Vorgehensweise vor:

Der Staudruck wächst linear mit der Höhe $q(z)=q_0 + 0,003 \cdot z$ in kN/m^2 , z = Höhe über Gelände und q_0 ist der Grundstaudruck in Abhängigkeit von der Windzone.

Die auf einen Turm wirkende Windlast ist dann noch mit dem aerodynamischen Kraftbeiwert C_f und der Ansichtsfläche A zu multiplizieren. C_f ist abhängig von dem Abminderungsfaktor ψ , der sich aus dem Verhältnis Höhe zu Breite des Bauwerkes und bei Fachwerkstrukturen von dem Völligkeitsgrad φ , der Profilform, der Grundrißform und der Anströmrichtung, wie folgende Bilder aus der DIN 4131 verdeutlichen

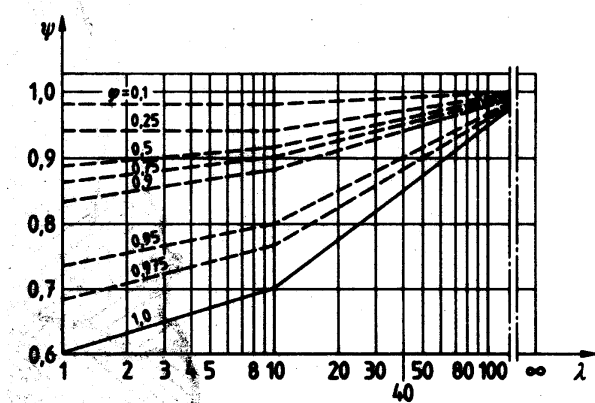


Bild 9: Abminderungsfaktor ψ in Abhängigkeit von der Streckung λ und dem Völligkeitsgrad

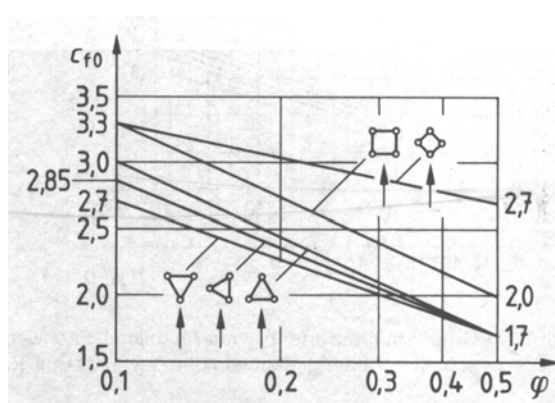


Bild 10: Grundkraftbeiwert C_{f0} für räumliche Fachwerke aus räumlichen Stäben in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad φ

(Hinweis: für Rundprofile siehe weitere Diagramme in DIN 4131)

Somit ergibt sich für den Abschnitt eines räumlichen Fachwerkturmes mit kantigen Stäben (z.B. Winkelprofile) folgender C-Beiwert:

A = Ansichtsfläche

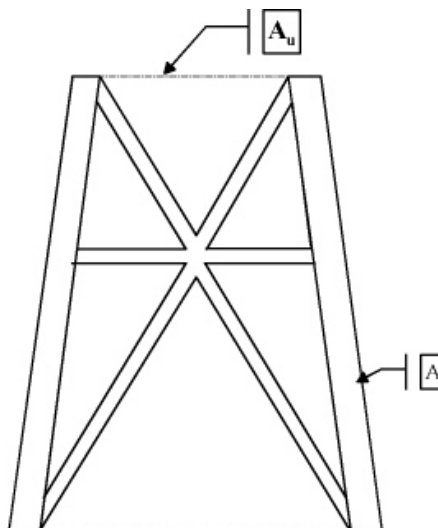
A_u = Umrißfläche

$\varphi = A/A_u$ C_{f0} aus Bild A.5

ψ aus Bild A.2

Damit wird $C_{fi} = \psi \cdot C_{f0,i}$

Bild 11: Windangriffsfläche



Bei Eisansatz z. B. 3cm radial nach DIN 1055 sind A und A_u erneut zu errechnen und ein entsprechender Kraftbeiwert zu ermitteln. Der Staudruck kann dann auf 75% reduziert werden.

Zu den Lasten der Turmkonstruktion sind dann die Lasten aus den Antennen und der Podeste zu berücksichtigen sowie die Lasten aus Steigeleitern und Kabeln.

Schließlich ist noch die Schwingungswirkung zu berücksichtigen. Man unterscheidet zwischen
 - Böenerregten Schwingungen in Windrichtung. Diese wird mit einer statischen Ersatzlast berücksichtigt, die sich aus der Schwingungsdauer der Tragkonstruktion ergibt und zu einem Böenreaktionsfaktor φ_B führt. Damit ist die Windlast auf einen Turmabschnitt

$$W_i = \varphi_B \cdot c_{f0,i} \cdot q_i \cdot A_i$$

Der Böenreaktionsfaktor berücksichtigt die Wirkung der räumlichen und zeitlichen Änderungen der Windgeschwindigkeit auf die Bauwerksschwingungen in Windrichtung.

- wirbelerregte Querschwingungen quer zur Windrichtung bei zylindrischen Baukörpern
 Diese treten in der Abhängigkeit der Eigenfrequenz und des Durchmessers des Baukörpers bei bestimmten, sogenannten kritischen Windgeschwindigkeiten auf.

Mit diesen Lasten werden nun die Schnittlasten für die Antennenträger ermittelt. In der Regel sind sechs Grundlastfälle erforderlich:

Bei z. B. vierstieligen Türmen: Berechnung nach Theorie I. Ordnung:

Ohne Eisansatz: Eigengewicht, Wind senkrecht auf eine Turmwand, Wind über Eck.

Mit Eisansatz: analog zu obigen Lastfällen

Bei abgespannten Masten: Berechnung nach Theorie II. Ordnung (Durchhangsänderung der Seile berücksichtigen). Es ist eine iterative Berechnung erforderlich.

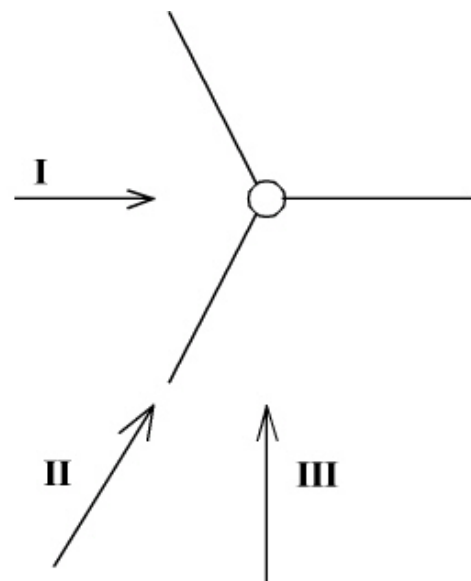
Ohne Eisansatz: Eigengewicht + Windrichtung I \Rightarrow min N im Mastschaft

Eigengewicht + Windrichtung II \Rightarrow maximale Verformung des Mastes

Eigengewicht + Windrichtung III \Rightarrow maximale Seilkraft

Mit Eisansatz : analog zu obigen Lastfällen

Zu untersuchende Windrichtungen bei abgespannten Masten, nach drei Richtungen abgespannt.



Die Bemessung erfolgt nach DIN 18800

Bild 12: Windrichtungen auf den Mast

Die statische und Dynamische Berechnung ist mit allgemeinen Stabwerksprogrammen möglich, aber sehr aufwendig. Wesentlich besser eignen sich spezielle Turm- und Mastprogramme (siehe Seite 19).

Montage

„Elegant mit dem Autokran
konventionell mit dem Montagegerüst,
riskant (Witterungsbedingungen) mit dem Hubschrauber“

Die Turmbaumontage ist vor allem bei hohen Türmen extrem Witterungsabhängig. Vor allem bei starkem Wind ist eine Montage oftmals gar nicht möglich. Die Baustelle „ruht“. Die daraus entstehenden Ausfallzeiten sind bei jeder Montage ein ökonomisches Risiko für die ausführende Firma.

Das **Montagegerüst** ist dabei ein vor allem in der Vergangenheit und vor allem bei Türmen und Masten mit großer Bauhöhe eingesetztes und autarkes Verfahren. Dabei wird mit zwei am Boden befindliche Winden gearbeitet. Eine Winde zieht die Last über eine an der Spitze des Montagemastes angeordnete Umlenkrolle nach oben. Um dann Pendelbewegungen der Last und vor allem das Anschlagen an das Bauwerk zu vermeiden, wird mit einer zweiten Winde mit Hilfe des sogenannten Abhalteseiles die Last geführt. Da große Seillängen für die Winden vorhanden sind, ist dieses Verfahren auch für größte Höhen und an unzugänglichen Stellen geeignet. Witterungsbedingten Ausfallzeiten sind bei der Montage mit dem konventionellen Montagegerüst nur mit geringen Kosten verbunden.

Die Montage mit dem **Mobilkran** ist zwar wesentlich schneller, aber gleichzeitig ist das finanzielle Risiko wegen der Wartezeiten bei schlechten Witterungsbedingungen erheblich größer. Aufgrund der in den letzten zwanzig Jahren starken Weiterentwicklung bei den Mobilkränen sind heute Montagehöhen bis zu 212 m möglich.

Die ebenfalls technisch sichere Montage mit dem **Hubschrauber** unterliegt dem größten Einsatzrisiko, da die Montage nur bei guten Witterungsverhältnissen möglich ist bei Lasten von ca. 3 Tonnen und max. 6 Tonnen bei den größten zur Verfügung stehenden Hubschraubern.

Stand der Normung: Momentan gilt die DIN 4131 „Antennentragwerke aus Stahl“ von November 1991. Die Vorschrift wird im Zuge der Bearbeitung des Eurocode 3 ersetzt und befindet sich momentan im Stadium einer Vornorm mit der Bezeichnung DIN V ENV 1993 – 3 –1 „Türme und Maste“. Nach der Überführung in die Europäische Norm kann diese mit einem nationalen Anhang ergänzt werden.

Zukunftsaussichten für Antennenträger aus Stahl: Trotz der Satellitentechnik ist die terrestrische Funktechnik weiterhin interessant, vor allem in Zusammenhang mit der digitalen Rundfunk- und Fernsehübertragung. Der Bedarf an Türmen ist jedoch geringer, da die digitale Mittelwelle eine größere Reichweite hat als die bis jetzt verwendete analoge Technik. Für das hauptsächlich mit Richtfunk betriebene Telefonnetz werden auch in Zukunft weiterhin Türme benötigt. Vor allem in Entwicklungsländern ist wegen der einfachen, robusten und langlebigen Bauweise bei überschaubaren Kosten der Bau von terrestrischen Sendeanlagen auch in Zukunft weiterhin gefragt.

Ein Glasfaserzylinder wird mit einem Montagemast und einer Winde hochgezogen



Bild 14 (unten)
Einschwenken der Last



Bild 15: Absetzen der Last und Einfahren des Gegengewichtes





Bild 16: Hubschrauber montage

Türme als Tragkonstruktionen für Windkraftanlagen.

In den vergangenen zwanzig Jahren wurden in der Entwicklung der Windkraftenergie enorme Fortschritte erzielt. Die stetige Entwicklung immer größerer Anlagen erfordert höhere Türme. Die größere Höhe ergibt vor allem im Binnenland eine bessere Ausnutzung der Windenergie. Während an der Küste wegen des dort vorhandenen stärkeren Windes eine Zunahme der Nabenhöhe der Energieanlage kaum noch Energiezuwachs bedeutet, wird im Binnenland die Energieausbeute deutlich größer.

Das höchste jemals gebaute Windkraftwerk steht in Magdeburg mit einer Nabenhöhe von 125 m auf einem Turm aus Spannbetonfertigteilen. In der Regel sind die Türme für Windkraftanlagen bis zu ca. 100m konische Rohrtürme aus Stahl. Aufgrund des Anschlussflansches an das Maschinenhaus haben die Rohrtürme eine Kopfbreite von ca. 2m und aus Transportgründen eine Fußbreite von maximal 4,20 m. Bei Turmhöhen oberhalb 100 m ist der Einsatz von Fachwerktürmen mit vierstieligem Grundriß deutlich wirtschaftlicher. Jüngste Entwicklungen zielen in eine Nabenhöhe von 160 m, die dann mit Fachwerktürmen realisiert werden.

Der Einwirkungen durch Windbelastungen in größeren Höhen und auch die damit verbundene Energieausbeute wurden in jüngster Zeit eingehender untersucht.

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit über die Höhe ist parabolisch, am Boden nahezu null. Zunächst ergibt sich eine starke Zunahme der Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe, in größeren Höhen jedoch ist die Zunahme der Windgeschwindigkeit nur noch gering. Über dem Erdboden liegt der Prandl-Bereich, der je nach Örtlichkeit und Wetterlage zwischen 60m und 100m betragen kann. Über diesem von Hindernissen stark beeinflussten und bogen Prandl-Bereich liegt der Ekman Bereich, der deutlich vom Höhenwind beeinflusst ist. In diesem Bereich ist die Windgeschwindigkeit im zeitlichen Verlauf und auch im Verlauf über die Höhe stetiger, richtungsstabiler und nur wenig böig. Die Luftströmungen im Prandl-Bereich und im Ekman Bereich verlaufen manchmal in ungleicher Richtung, ein Grund um den Rotor möglichst ganz aus dem Prandl-Bereich herauszuheben. Da sich die Windkräfte auf die Rotorblätter mit einem Rotordurchmesser von nahezu 90 m über die Höhe gleichmäßig verteilen, ergibt sich auch ein kleineres über die Horizontalachse wirkendes Biegemoment auf die Windkraftanlage.

Das Anheben der Nabenhöhe einer Windkraftanlage von 100m auf 160 m verbessert die Energieausbeute an der Küste lediglich um 12%, im Binnenland, z.B. in Bayern, um 40% und ist somit im Binnenland wirtschaftlich attraktiv.

Der Arbeitsbereich der Anlagen liegt bei einer Windgeschwindigkeit von mindestens 2,5 m/s (Anlaufgeschwindigkeit 2,5 bis 3,5 m/s) bis zu 25 m/s. Erreicht die Windgeschwindigkeit die Nennleistungsgrenze der WEA (Windenergieanlage), wird die Leistungsaufnahme der WEA durch die pitch-Regelung (anderer Anstellwinkel der Flügel) begrenzt. Bei Windstärken größer als die Abschalt-Windgeschwindigkeit (meistens > 25 m/s), wird die Gondel trotzdem stetig in Windrichtung nachgeführt, um bei nachlassendem Wind die WEA gleich wieder anfahren zu können.

Die Anlagen erbringen ihre Nennleistungen bei einer Windgeschwindigkeit von 13 bis 15 m/s. Das Windrad einer Anlage dreht sich in einem engen Drehzahlbereich von 11 bis 16 U/min mit einem von der Windgeschwindigkeit abhängigen und einstellbaren Anstellwinkel der Flügel. Das in der Regel dreistufige Getriebe mit einer festen Übersetzung überträgt die Drehgeschwindigkeit mit einem Verhältnis von ca. 1:97 auf den Generator, der sich mit 1000 bis max. 1800 U/min dreht und den Strom über einen Umrichter auf die erforderliche Netzfrequenz von

50 Hz in das Stromnetz liefert. Eine Windkraftanlage heutiger Größe mit 2,5 MW Leistung liefert fünf bis sechs Millionen kWh pro Jahr, was bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 4000 kWh/a für ca. 1300 Haushalte ausreicht. Bei verschiedenen Windkraftherstellern sind momentan Prototypen noch größerer Windkraftanlagen für die Nabenhöhe von ca. 160 m in der Entwicklung. Der Prototyp E112 mit 4,5 MW Leistung der Fa. Enercon hat ein Rotordurchmesser von 112 m, die Leistung eines Prototyps der Fa. Repower beträgt 5 MW. Die Massen neuerer Anlagen erreichen dabei ca. 275 to incl. Flügel. Die Gewichtszunahme bei der Vergrößerung der Anlagen verläuft nichtlinear und ist damit überproportional zur Leistung.

Die Konstruktion der Stahltürme für Windkraftanlagen erfolgt analog zu den Antennenträgern, jedoch sind die Türme für die Windkrafttürme wesentlich schwerer wegen der großen Massen der Maschinenhäuser und der Windlasten. Die Berechnung erfolgt nach der „Richtlinie für Windkraftanlagen“ des Deutschen Instituts für Bautechnik in Berlin in der Fassung von 1993. Die aerodynamischen Kraftbeiwerte für die Turmkonstruktionen errechnen sich ebenfalls analog zu denen der Antennenträger, jedoch wird für die Windgeschwindigkeit ein nichtlinearer Anstieg der Windlast angesetzt. Zusätzlich zu den Böenerregten Schwingungen in Windrichtungen, die durch eine statische Ersatzlast berücksichtigt werden, sind durch Rotordrehung erregte Schwingungen des Turmes zu untersuchen. Dazu ist nicht nur die Grundfrequenz des Turmes zu ermitteln, sondern auch die Frequenzen höherer Ordnung. Dabei ist der Einfluß der Gründung zu berücksichtigen.

Die Eigenfrequenzen f_0 des Turmes einschließlich Gründung müssen einen ausreichenden Abstand zur Blattdurchgangsfrequenz haben. Bei Rohrtürmen aus Stahl müssen außerdem noch die Beanspruchungen durch wirbelerregte Querschwingungen untersucht werden. Schließlich ist noch der Nachweis der Betriebsfestigkeit zu führen für eine Lebensdauer der Anlage von mindestens 20 Jahren. Für die statische und dynamische Berechnung werden standardmäßige räumliche Stabwerksprogramme verwendet. Auch hier gilt, dass Spezialprogramme für Fachwerktürme mit automatischer System- und Lastgenerierung und Ermittlung der zugehörigen Eigenfrequenzen eine wesentliche Arbeitersparnis bei der Berechnung darstellen.

Die Montage erfolgt in aller Regel mit Mobilkränen. Bis zu einer Nabenhöhe von 160 m kann neuerdings mit einem mobilen Raupenkran in Einzelteilen bis zu 30 to montiert werden. Von diesen Kränen gibt es in Deutschland momentan ca. 8 Stück.

Das größte technische Problem für den Bau und den Betrieb von Windkraftanlagen liegt aufgrund der Wetterabhängigkeit in der Montage der Maschinenhäuser und der Flügel sowie in der Wartung. Ebenso ist die Planung immer größerer Anlagen Neuland. Der Bau der Turmbauwerke und auch die damit zusammenhängende Bewältigung der Schwingungsprobleme hingegen ist weniger problematisch.



Bild 17: Fachwerkurm der Firma Seeba
In Badbergen, Nabenhöhe 114,5m



Bild 18: Windenergieanlage Nordex N80
mit 60m Nabenhöhe und 80 m Rotordurchmesser

Montageverfahren für ein Windkraftwerk mit einem Montagegerüst

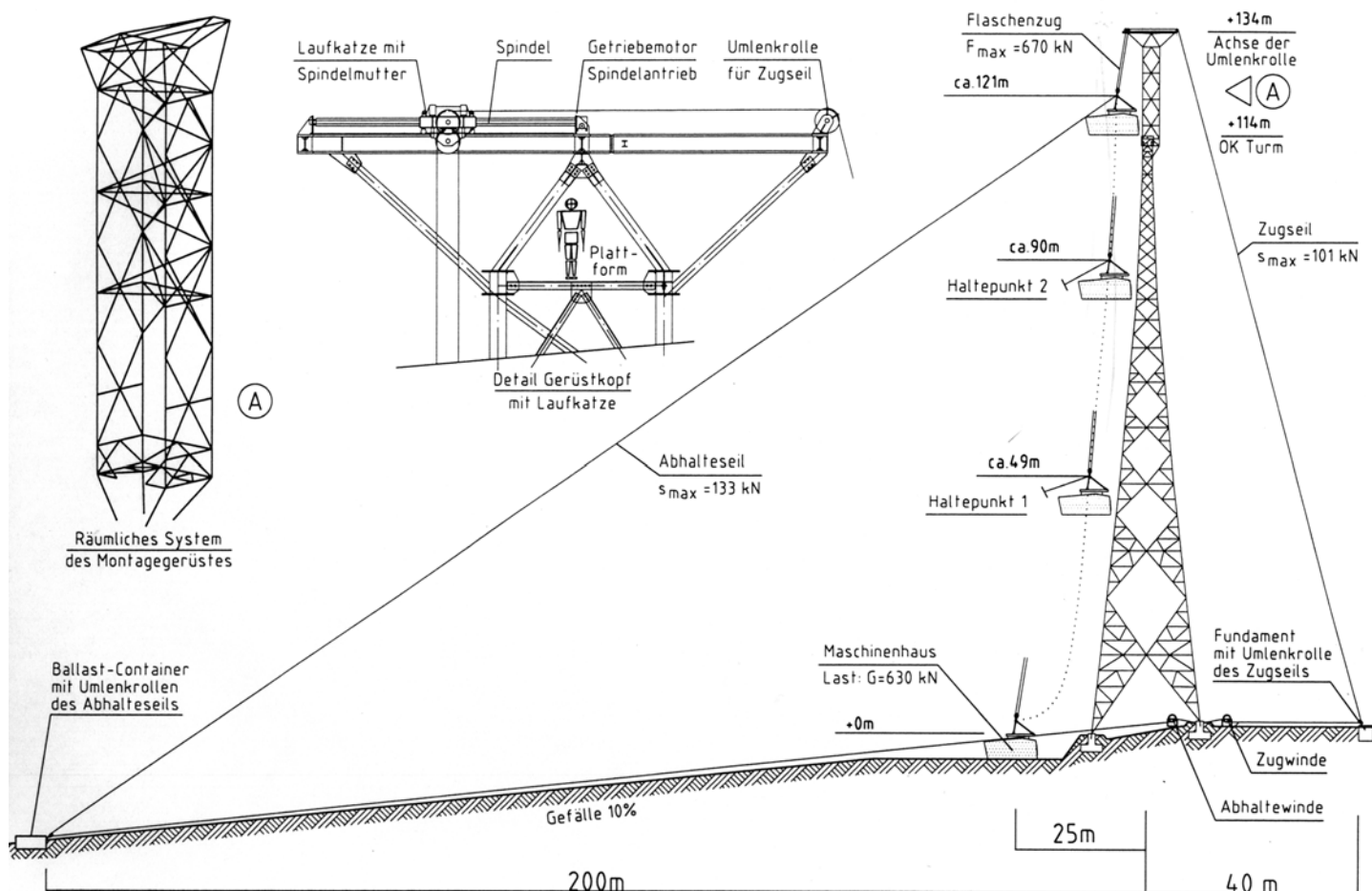


Bild 19: Montageprinzip für das Montagegerüst

In Olpe, Westfalen wurde erstmalig ein Windkraftwerk mit 113 m Nabenhöhe montiert. Das dazu verwendete ca. 30 t schwere Montagegerüst besteht aus einer auf der Turmspitze angebrachten freistehenden räumlichen Fachwerkkonstruktion mit offener Bauweise, in die das Maschinenhaus eingefahren und auf den Anschlußflansch abgesetzt werden kann. An der Spitze befindet sich eine auskragende Konstruktion, auf dem eine Laufkatze mittels einer Spindel und eines Elektromotors mit Getriebe vom vorderen Ende des Trägers bis zur Mittelachse des Turmes bewegt wird. Auf der Laufkatze ist der feste Teil eines Flaschenzuges mit fünf Seilrollen, angeordnet.

Das 4,50 m breite Montagegerüst überragt den Fachwerkturm oberhalb des Anschlußflansches bei 114 m nochmals um ca. 20 m. Es besteht aus Stahlrohren der Güte S355J0 mit 320 mm Durchmesser für die Eckstiele und weiteren Rohr- und Walzprofilen für die Ausfachung. Eine 5 m hohe und 4,20 m breite Öffnung im unteren Teil dieses Gerüsts erlaubt das horizontale Einfahren des Maschinenhauses. Auf beiden Seiten verbleibt beim Einfahren des 10 m langen, 4,35 m hohen und 3,40 m breiten Maschinenhauses ein Freiraum von ca. 40 cm. Im oberen Teil wird das zur Lastseite offene Gerüst durch Raumdiagonalen ausgesteift.

Erst die offene Bauweise und die zur Turmachse asymmetrische Anordnung des Montagegerüsts ermöglichen es der Laufkatze, das an den Seilen hängende Maschinenhaus samt Montagetraverse bis über den Anschlußflansch in der Turmachse zu fahren. Aus den örtlichen Verhältnissen und der Turmgeometrie ergab sich, daß die zu hebende Last ca. 25 m vor der Turmachse platziert werden mußte. Da wegen der Größenordnung der Last und der damit verbundenen statischen Beanspruchung eine derart lange Auskragung nicht möglich ist, mußte die Last in einer schrägen Linie zur Turmspitze geführt werden. Dazu wurden zwei Elektrowinden benötigt, die zur Aufnahme der Windenkräfte jeweils am Turmfundament befestigt wurden. Das Seil der Zugwinde wird über eine Umlenkrolle an einem eigens dafür hergestellten Fundament sowie eine zweite Umlenkrolle am



Bild 20: Einfahren des Maschinenhauses in 113 m Höhe

abgehalten werden – unter Einhaltung eines Abstandes von 1 m – einerseits, um nicht zu hohe Horizontallasten auf die Konstruktion auszuüben, andererseits, um das Maschinenhaus nicht mit der Turmkonstruktion kollidieren zu lassen – beides mit fatalen Folgen, eine Arbeit, die höchste Anforderungen an das Montagepersonal stellte. Nach Erreichen der Hubhöhe wurde das Abhalteseil nachgelassen und die frei hängende Last mit der Laufkatze waagrecht in das Gerüst hineingefahren. Dazu wurde der elektrische Antrieb am Kopf des Montagegerüsts vom Montagepersonal über eine Steuerung bedient und danach die Last senkrecht bis auf den Befestigungsflansch abgelassen. Die Montage mit dem Hilfsgerüst kommt in Spezialfällen zur Anwendung, z. B. bei unzugänglichem Gelände oder in Ländern, wo ein entsprechender Kran nicht zur Verfügung steht.

Kopf des Montagegerüsts über die Turmkonstruktion bis zur Laufkatze geführt und dort mit einer 4-rolligen Hakenflasche zu einem Flaschenzug zusammengefaßt, im Fachjargon „vierfach geschert“. Der Flaschenzug ist notwendig, um die auftretenden Seilkräfte an der Winde und die Größe des benötigten Umlenkfundaments beim Ziehen der 63 t schweren Last des Maschinenhauses sinnvoll zu begrenzen. Für den Hubvorgang ist somit ein ca. 1200 m langes Seil erforderlich. Das Heben der Last erfolgt maximal mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/min, bedingt durch die Windgeschwindigkeit und die Übersetzung des Flaschenzuges. Mit der zweiten Winde wird über das zweifach gescherte Abhalteseil die Last geführt. Das Abhalteseil läuft dabei über die Umlenkrollen am Ballast-Container, einer im Boden versenkten und mit Sand gefüllten Sonderkonstruktion. Die Entfernung des Umlenkfundamentes zur Turmkonstruktion wurde aus statischen Gründen mit 40 m, die des Ballast-Containers mit 200 m gewählt. Die Last mußte nun mit dem Zugseil gehoben und simultan mit dem Abhalteseil vom Turm

Literaturhinweise

[1] Hermann Schulte – Peter Bruger „Drehbare Kurzwellen-Vorhangantenne auf der Funksendestelle in Marlow - Stahlbau 69 (2000)

[2] Hermann Schulte – Tilo Sasse „Maschinenhausmontage für welthöchste Windkraftanlage“ Stahlbau 70 (2001)

[3] Mertins „Turmfachwerke“

[4] DIN 4131 „Antennentragwerke aus Stahl“ Nov. 1993

[5] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT) „Richtlinie für Windkraftanlagen“ Juni 1993

Bildnachweise:

Seeba GmbH, Sternwede (Bild 17, Bild 20)

Montage Maschinenhaus (Bild 19), aus [2]

Nordex GmbH, Norderstedt (Bild 18)

Tahles Broadcast & Multimedia GmbH, Niederlassung Mannheim (Bild 1, Bild 6)

Kathrein GmbH, Rosenheim (Bild 13, 14, 15, 16)

Drehstand Marlow (Bild 7,8) aus [1]

DIN 4131, Beuth Verlag (Bild 9,10,12)

Bilder 2, 3, 4, 5, 11 – eigene

Hinweise auf spezielle EDV-Programme zur Tragwerksanalyse:

Turmprogramme: H. Schulte – A. Schwabedal (Fachwerktürme), München - Berlin

Mastprogramm: Dr. Ullrich - Hirschberg