

# Besonderheiten bei der Berechnung von Kühlturmschalen

Michael Geis, Joachim Meyer

Zerna, Köpper & Partner, Ingenieurgesellschaft für Bautechnik, Bochum

## Zusammenfassung:

Kühltürme sind die schon von weitem zu erkennenden Wahrzeichen moderner Großkraftwerke. Bei ihrer Planung ist neben den DIN-Vorschriften vor allem die VGB-Richtlinie „Bautechnik bei Kühltürmen“ zu beachten, die derzeit im Hinblick auf die aktuellen Normen der Reihen DIN 1045 und 1055 überarbeitet wird. Maßgebliche Beanspruchungen einer Kühlturmschale ergeben sich neben dem Eigengewicht im Wesentlichen aus Wind und Temperatur, aber auch aus Baugrundsetzungen und Schwinden. Die Besonderheiten bei der Modellabbildung und Berechnung mit Sofistik werden an Beispielen dargestellt.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 „Der Strom geht aus“

„Der Strom geht aus“ - so titelte DIE WELT am 5. März 2005. Weiter berichtete DIE WELT an gleicher Stelle:

„Wenn die deutschen Kraftwerke nicht möglichst schnell erneuert werden, droht dem Land in naher Zukunft eine empfindliche Versorgungslücke. Bis 2020 müssen hierzulande rund 40 Gigawatt Kraftwerksleistung erneuert werden, hat der Verband der Elektrotechnik (VDE) in einer aktuellen Studie ermittelt. Das entspricht 40 großen Kraftwerken von der Leistungstärke des Kernkraftwerks Biblis A. Weitere 20 Gigawatt fehlen, wenn die deutschen Atomkraftwerke wie geplant abgeschaltet werden. Zudem werden Reservekraftwerke für die Windenergie benötigt, die nach den Plänen der Bundesregierung kräftig ausgebaut werden soll.“

Zur Gewährleistung einer national unabhängigen Stromversorgung wurde in der Bundesrepublik Deutschland ein entsprechender Kraftwerkspark aufgebaut und vorgehalten. Wesentliche Neubauten erfolgten vor allem in den 60er bis 70er Jahren sowie in den Jahren nach der deutschen Wiedervereinigung.

Zur Sicherstellung einer Grundversorgung wurden Atomkraftwerke sowie Braunkohlekraftwerke gebaut, die einen zeitlichen Ausnutzungsgrad von über 80% aufweisen. Steinkohle befeuerte Kraftwerke - mit einem zeitlichen Ausnutzungsgrad von ca. 50 - 60% - wurden für den Mittellastbetrieb errichtet; sie gleichen die Schwankungen zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch aus. Stromspitzen in besonders verbrauchsstarken Zeiten werden durch so genannte Spitzenlastkraftwerke (z. B. Gasturbinenanlagen) gedeckt.

In den letzten Jahren wurde intensiv daran gearbeitet, den Wirkungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken zu erhöhen und gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Einen Überblick über ein modernes, mit Braunkohle befeuertes Großkraftwerk gibt die nachfolgende Abbildung 1.

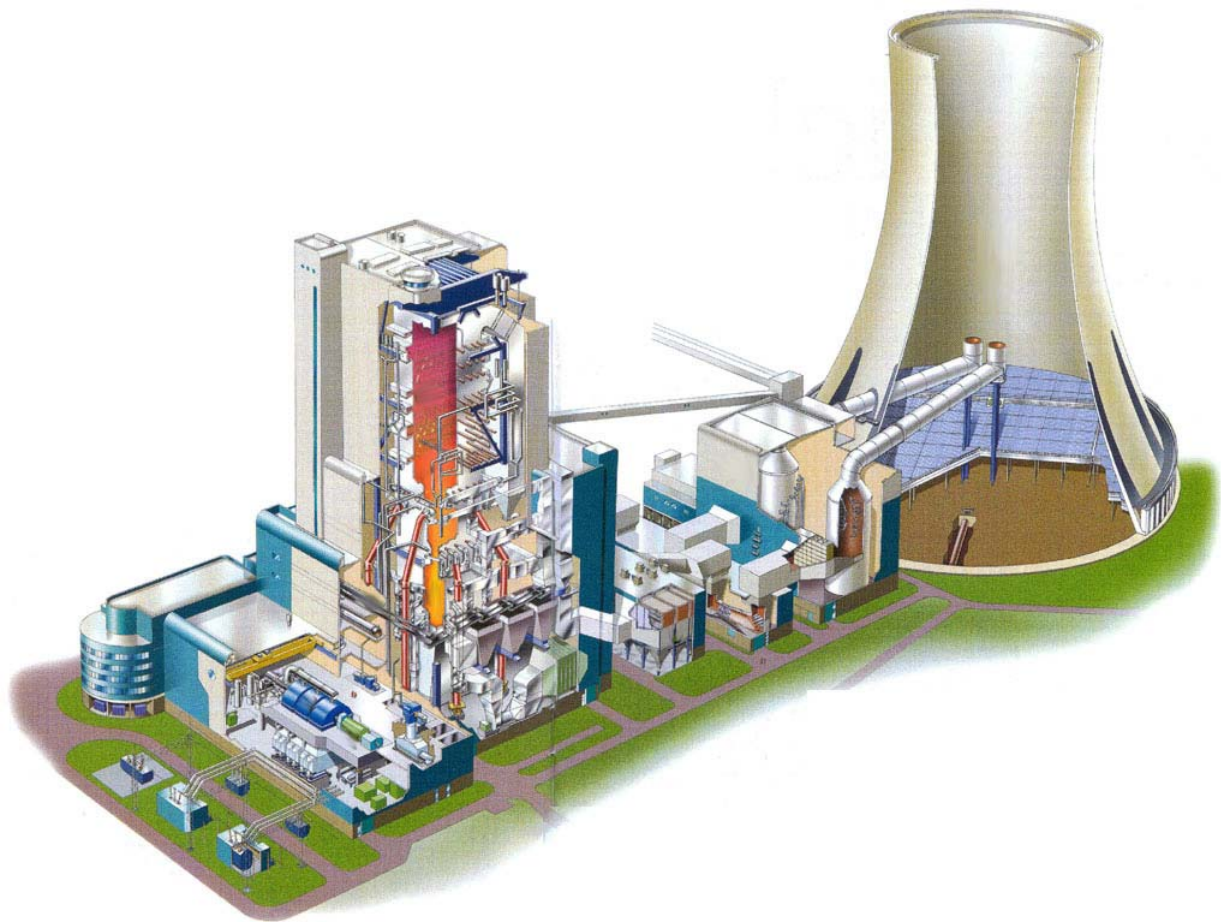


Abbildung 1: Fossil befeuertes Großkraftwerk

### 1.2 Kühltürme - das Wahrzeichen von Großkraftwerken

Wie die Abbildung 1 erahnen lässt, ist der Kühlturm in der Regel das schon von weitem zu erkennende Wahrzeichen eines Großkraftwerks. Er ist das kalte Ende eines heißen Prozesses. Beginnend mit der Verbrennung der Kohle im Dampferzeuger wird Wasser unter hohem Druck verdampft und überhitzt. Dieser überhitzte Dampf durchströmt anschließend eine Turbine, die über einen Generator Strom erzeugt. Bei der Durchströmung durch die Turbine verliert der Dampf Druck und Temperatur. Im Kondensator wird der Dampf mit Hilfe von Kühlwasser, das vom Kühlturm bereitgestellt

wird, zu Wasser kondensiert. Anschließend beginnt der Kreislauf von Vorwärmung, Verdampfung, Überhitzung und Turbinenarbeit von neuem.

In der nachfolgenden Abbildung 2, die einen in der Bauphase befindlichen Stahlbeton-Naturzugkühlturm zeigt, sind die unter der Tassensohle verlaufende Kühlwasserleitung (warmes Wasser) sowie das Auslaufbauwerk, über den das um ca. 10 K gekühlte Wasser zurückgeführt wird, sehr gut zu erkennen.

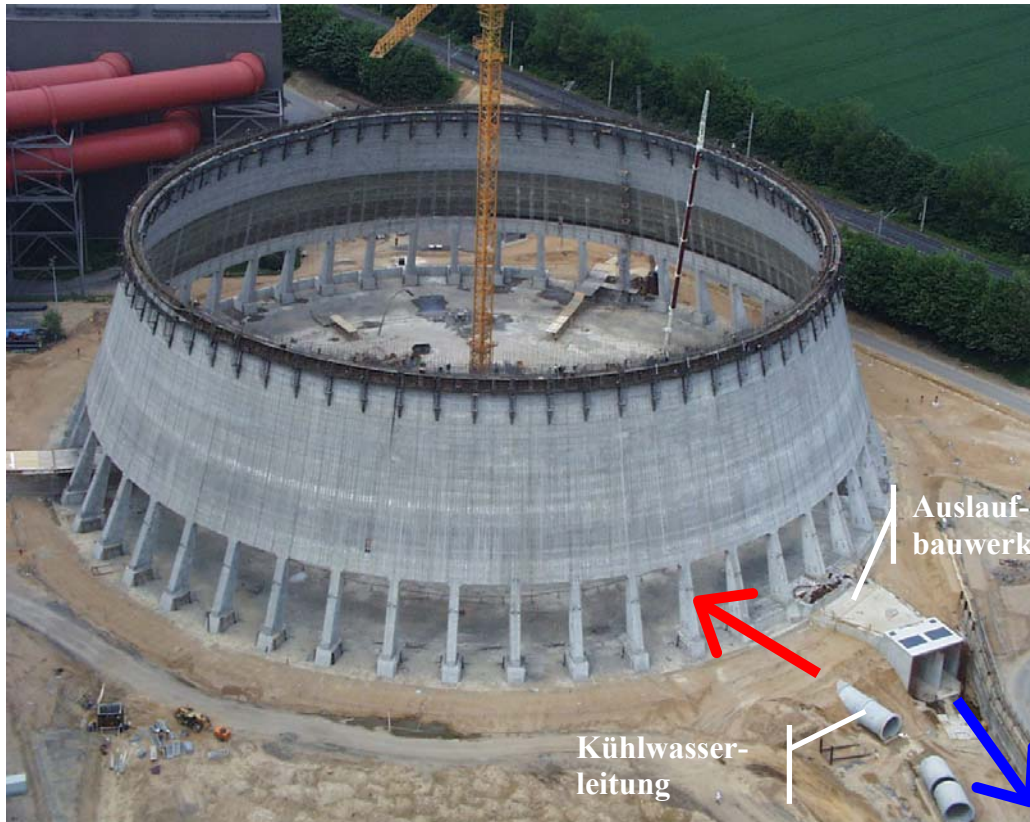


Abbildung 2: Stahlbeton-Naturzugkühlturm im Bau

Kühltürme von Großkraftwerken, die eine hohe Kühlleistung zur Verfügung stellen müssen, werden in der Regel als Naturzugkühltürme aus Stahlbeton gebaut. D. h. durch die natürliche Kaminwirkung herrscht ein kräftiger, aufsteigender Luftzug. In diesem Luftzug kühlen die feinen Tropfen des warmen Kühlwassers ab, das von einer Verteilerebene innerhalb des Kühlturms aus einigen Metern Höhe herabrieselt. Dabei verdunstet ein Teil des Kühlwassers und wird von der Zugluft mit nach oben gerissen: So entsteht, abhängig von der Wetterlage, die typische, von weitem zu erkennende „Dampffahne“. Der weit überwiegende Teil des Wassers wird zurück zum Kondensator geführt.

Seit letzten Jahrzehnten werden Kühltürme neben ihrer notwendigen Kühlleistung auch zur Ableitung gereinigter Rauchgase genutzt. Die bei der Verbrennung der Kohle im Dampferzeuger entstehenden Rauchgase werden in mehreren Schritten gereinigt, so dass die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte sicher eingehalten werden. Durch die Einleitung im Kühlturminneren werden die gereinigten Rauchgase gemeinsam mit dem Kühlturmschwaden in die Atmosphäre geleitet.

### 1.3 Normen und Richtlinien

An das in der Regel bei großen Bauwerkshöhen aus Stahlbeton hergestellte Bauwerk „Kühlturm“ werden mehrere Anforderungen gestellt. Neben seiner Funktion zur Sicherstellung der erforderlichen Kühlleistung sowohl im Sommer wie auch im Winter ist insbesondere ein störungsfreier Betrieb unabdingbar. Da die bautechnische Normung der letzten Jahrzehnte weitgehend Aspekte der Standsicherheit im allgemeinen Hochbau regelte, wurden Erfahrungen des Kühlturmbaus in Richtlinien zusammengestellt, dies aber auch vor dem Hintergrund des Einsturzes von drei Kühltürmen in Ferrybridge, England 1965.



Abbildung 3: Spektakulärer Einsturz von drei Kühltürmen in Ferrybridge, England

In den späten 60er Jahren wurde der erste, von Fachleuten erstellte „Technische Leitfaden zum Bestellen von Kühltürmen“ von der Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft (VIK) herausgegeben. Zusätzlich zu den einschlägigen DIN-Vorschriften wurden Hinweise für die Berechnung und Ausführung von großen Naturzugkühltürmen mit Abmessungen von mehr als 70 m Höhe und 50 m Durchmesser zusammengestellt. Bereits zu diesem Zeitpunkt wurde zusätzlich zur DIN 1045 ein Nachweis mit Teilsicherheitsbeiwerten gefordert, um ein gewünschtes, über dem der DIN 1045 liegendes Sicherheitsniveau zu erreichen. In den Jahren 1980, 1990 und 1997 wurden überarbeitete



Fassungen der VGB-Richtlinie „BTR - Bautechnik bei Kühltürmen“ von der VGB PowerTech e.V., Essen, veröffentlicht, dem derzeit größten europäischen Verband der Strom- und Wärmeerzeugung. Durch die seit 2005 geltenden neuen Normenreihen DIN 1045 und DIN 1055 war wiederum eine Überarbeitung der VGB-Richtlinie BTR erforderlich, die aller Voraussicht nach in diesem Jahr als BTR 2005 zur Verfügung stehen wird. Erläuterungen zur dieser neuen BTR 2005 finden sich z. B. im Tagungsband des 5th International Symposium on Natural Draught Cooling Towers, 2005, Istanbul sowie im Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1 („Die VGB-Richtlinie „Bautechnik bei Kühltürmen“ und ihre Anpassung an die neue DIN 1045 / DIN 1055“, Jürgen Lenz, Rüdiger Meiswinkel).

## 2 EINWIRKUNGEN

Dass der Kühlturm ein außergewöhnliches Bauwerk mit besonderen Anforderungen darstellt, wurde zuvor im Kapitel 1 dargestellt. Aber auch bei den bei der Kühlturmschale zu berücksichtigenden Einwirkungen sind besondere Aspekte zu beachten. Nachfolgend werden Hinweise zu den beiden wesentlichen Einwirkungen, dem Wind und der Temperatur, gegeben. Detaillierte Angaben, auch zu den weiteren Einwirkungen wie Eigenlast, Schwinden, fremdverursachte Baugrundsetzungen, Montagelasten, Erdbeben und Vorspannung können der VGB-Richtlinie BTR entnommen werden.

### 2.1 *Windlast W*

Die Windwirkung wird durch statische Ersatzlasten in Form von Winddrücken auf Basis von höhenabhängigen Böengeschwindigkeiten in der VGB-Richtlinie BTR berücksichtigt. Dabei wird zwischen Außen- und Innendruck unterschieden, der je nach Bemessungssituation ungünstig zu überlagern ist. In den Winddruck fließen verschiedene Parameter ein, z. B. die Oberflächenrauigkeit, der dynamische Überhöhungsfaktor und der Interferenzfaktor. Damit wird die Windlast auf die jeweiligen Kühlturm-Struktureigenschaften (Höhe, Eigenfrequenz usw.) und die Bauwerksanordnungssituation abgestimmt. Dennoch kann es aus sicherheitstheoretischen und wirtschaftlichen Gründen notwendig werden, Windlasten mit Hilfe von Windkanaluntersuchungen zu bestimmen.

Die Windlast wird insbesondere durch die Oberflächenrauigkeit in starkem Maße beeinflusst. Bei einer sehr glatten Oberfläche ohne Rippen ergibt sich ein Minimum des Druckbeiwerts von -1,6, während bei einer Kühlturmschale mit hohen Rippen ein Minimum von -1,0 zu berücksichtigen ist. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt den Verlauf der beiden in der VGB-Richtlinie BTR angegebenen Druckverteilungskurven K1.0 und K1.6, wobei 0° den Staupunkt darstellt.

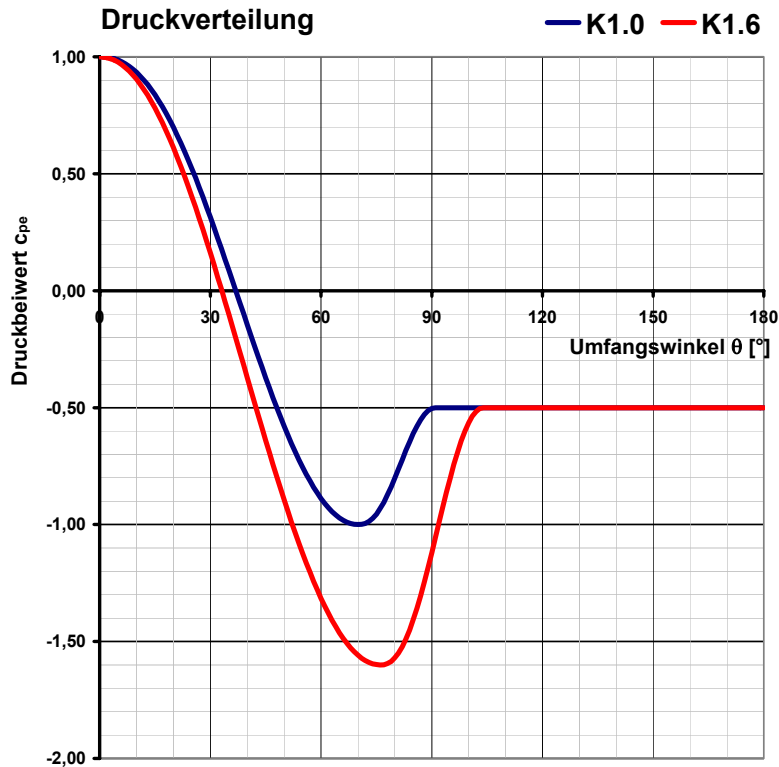


Abbildung 4: Druckverteilungskurven K1.0 (hohe Rippen) und K1.6 (glatt, ohne Rippen)

Diese beiden, nur von der Gestaltung der Schalenoberfläche abhängigen Druckverteilungskurven führen zu stark unterschiedlichen Beanspruchungen (siehe hierzu auch Abschn. 4.3).

Der Böengeschwindigkeitsdruck hängt von der geografischen Lage und der Geländekategorie ab. Die Bundesrepublik Deutschland ist dabei gem. DIN 1055-4:2005 in vier Windzonen eingeteilt. Die Werte des Böengeschwindigkeitsdrucks werden pro Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 2% überschritten, d. h. die mittlere Wiederkehrperiode beträgt 50 Jahre.

Für die Windzone I (Geländekategorie II) ergibt sich der Böengeschwindigkeitsdruck zu  $q_b = 0,71 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,22}$ .

Der resultierende Außendruck  $w_e$  ergibt sich dann als Produkt aus dem Druckbeiwert  $c_{pe}$ , dem Böengeschwindigkeitsdruck  $q_b$ , dem dynamischen Überhöhungsfaktor  $\varphi$  und dem Interferenzfaktor  $F_I$ :  $w_e(z, \theta) = c_{pe}(\theta) \cdot \varphi \cdot F_I \cdot q_b(z)$ .

## 2.2 Temperatur $T$

Bei den zu berücksichtigenden Temperatureinwirkungen auf eine Kühlturmschale wird unterschieden zwischen einer gleichmäßigen Temperaturänderung  $T_0$  und einer ggf. gleichzeitig wirkenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Schaleninnen- und Schalenaußenseite. Während die gleichmäßige Temperaturänderung im Wesentlichen durch die klimatische, jahreszeitliche Temperaturänderung gegenüber der Aufstelltemperatur hervorgerufen wird, ist die sich einstellende Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite des Kühlturms eine Folge aus dem

Kühlturbetrieb (innen wärmer als außen) oder aus der Sonneneinstrahlung bei einem stillstehenden Kühlturm (außen wärmer als innen). Nach der VGB-Richtlinie BTR sind derzeit die folgenden Temperatureinwirkungen für Standorte in Deutschland, sofern keine ungünstigeren Werte angegeben sind, zu berücksichtigen:

Betriebstemperatur $T^{OP}$ :	$T_0^{OP}$	=	-15 K
	$\Delta T^{OP}$	=	+33 K
Sommer-Stillstand $T^S$ :	$T_0^S$	=	+22 K (rotationssymmetrisch)
	$\Delta T_{eff}^S$	=	-25 K (über den halben Umfang cosinus-förmig)
Winter-Stillstand $T^W$ :	$T_0^W$	=	-39 K
	$\Delta T^W$	=	0 K

Praxiserfahrungen und vergleichende rechnerische Untersuchungen haben gezeigt, dass Einwirkungen aus Temperatur in der Größenordnung, wie sie bei Kühltürmen auftreten, nur geringen Einfluss auf die Traglast einer Kühlturmschale besitzen. Beobachtete Rissbildungen im Zusammenhang mit Temperatureinwirkungen haben in den letzten Jahrzehnten jedoch mehrfach zu Problemen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit von Kühlturmschalen geführt.

Die nun – im Vergleich zur alten VGB-Richtlinie BTR 1997 – höheren charakteristischen Werte sowie die – im Vergleich zur alten DIN 1045 – nicht mehr in vollem Ausmaße mögliche Reduzierung von Zwangseinwirkungen geben den Temperatureinwirkungen jetzt eine größere Bedeutung.

### 3 SICHERHEITSKONZEPT

Das in der VGB-Richtlinie 2005 für Kühlturmschalen geforderte Sicherheitskonzept basiert auf den neuen Normenreihen der DIN 1045 und der DIN 1055. Zusätzlich zu den Nachweisen der Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ist der Nachweis der Beulsicherheit für Kühlturmschalen von besonderer Bedeutung.

In Abbildung 5 sind die bei den Nachweisen der Kühlturmtragstruktur anzusetzenden Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte dargestellt.

ständige Einwirkungen und veränderliche Einwirkungen $Q_k$		Teilsicherheitsbeiwert		Kombinationsbeiwert		
		$\gamma_G$ <sup>a)</sup>	$\gamma_Q$ <sup>a)</sup>	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Eigengewicht	G	1,00 / 1,35	-	-	-	-
Windlast W	( $W^e$ , $W^i$ )	-	0 / 1,60	0,6	0,5	0
Betriebstemperatur	$T^{OP}$	-	0 / 1,50 <sup>b)</sup>	0	1,0	1,0
Sommer (kein Betrieb)	$T^S$	-	0 / 1,50 <sup>b)</sup>	0	0,5	0
Winter (kein Betrieb)	$T^W$	-	0 / 1,50 <sup>b)</sup>	0	0,5	0
Baugrundsetzungen	B	-	0 / 1,50 <sup>b)</sup>	1,0	1,0	1,0
Schwinden	S	-	0 / 1,50 <sup>b)</sup>	1,0	1,0	1,0

a) günstige / ungünstige Auswirkung

b) Lineare Tragwerksanalysen:  $\gamma_Q = \kappa_T \cdot 1,50 = 1,00$  (Berücksichtigung reduzierter Steifigkeiten)

Abbildung 5: Teilsicherheiten und Kombinationsbeiwerte von Kühlturm-Einwirkungen

Im Vergleich zur DIN 1055-100 wird für die Windlast ein höherer Teilsicherheitsbeiwert von 1,6 statt 1,5 erforderlich, um das bisher bei Kühlturmbauwerken übliche Sicherheitsniveau zu erreichen. Die Kombinationsbeiwerte sind auf die Besonderheiten der Kühlturmtragstruktur sowie des Kühlturmbetriebs abgestimmt.

## 4 MODELLABBILDUNG

### 4.1 Generierung

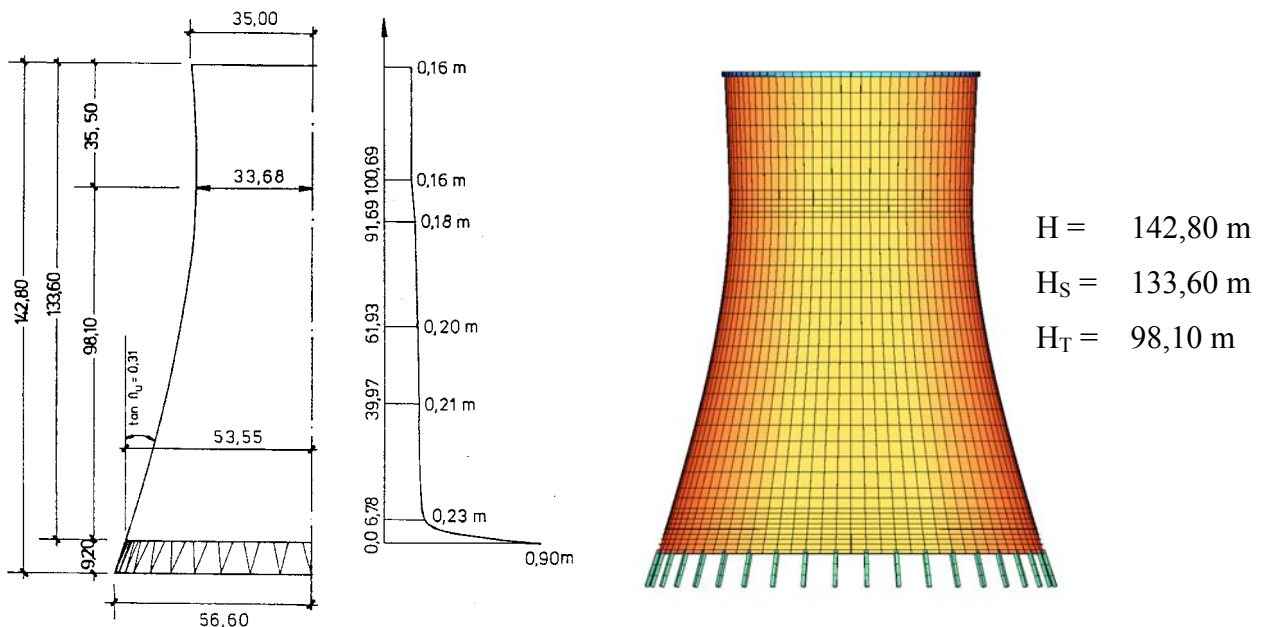


Abbildung 6: Schnitt durch eine typische Kühlturmschale, Geometrie, Wanddicken

In der Abbildung sind die wesentlichen Geometriedaten einer typischen Kühlturmschale zusammengefasst. Die Schale stützt sich auf einem Ring aus V-Stützen oder Einzelstützen ab, die wiederum auf Einzelfundamenten oder einem Ringfundament gegründet sind. Die Schalenform lässt sich allgemein durch folgende Gleichungen beschreiben:



oberhalb der Taille:  $r = a_1 + b_1 * \sqrt{1 + ((H - H_S + H_T - z)/c_1)^2}$

unterhalb der Taille:  $r = a_2 + b_2 * \sqrt{1 + ((H - H_S + H_T - z)/c_2)^2}$

Die Schalendicke nimmt i. d. R. mit der Höhe ab. Die Mindestschalendicke neuerer Kühltürme liegt gem. BTR 2005 bei  $\min h = 18 \text{ cm}$ . Die Schale des 200-m-Kühlturms in Bergheim-Niederaußem hat z. B. eine Minstdicke von 22 cm.

Zur Aussteifung der Schale und zur Lasteinleitung in die Stützen besitzt der untere Schalenrand eine deutlich größere Dicke. Die Verstärkung des oberen Schalenrandes kann z. B. durch ein U-förmiges Randglied erfolgen.

Ein regelmäßiges Netz aus Viereckelementen stellt die einfachste Art der Elemententeilung mit GENF dar. Die Elementanzahl in Umfangsrichtung ergibt sich dabei als Vielfaches der Stützenanzahl. In vertikaler Richtung ist eine geeignete Netzverfeinerung am unteren und oberen Rand, am unteren Schalenrand ggf. eine zusätzliche Netzverfeinerung in Umfangsrichtung sinnvoll.

#### 4.2 Auswirkungen unterschiedlicher Elementtypen und Diskretisierungen

Zur Beurteilung des Einflusses auf die Genauigkeit der Schnittgrößenverläufe werden hier drei unterschiedliche Diskretisierungen einer Kühlturmschale verwendet. Zusätzlich wird der Einfluss des Elementansatzes (konform/nicht konform) betrachtet.

Modell	Ansatz	$n_{\text{Ring}}$	$n_{\text{Meridian}}$
1	nicht-konf.	40	30
2	nicht-konf.	80	30
3	nicht-konf.	80	39
4	konform	80	39

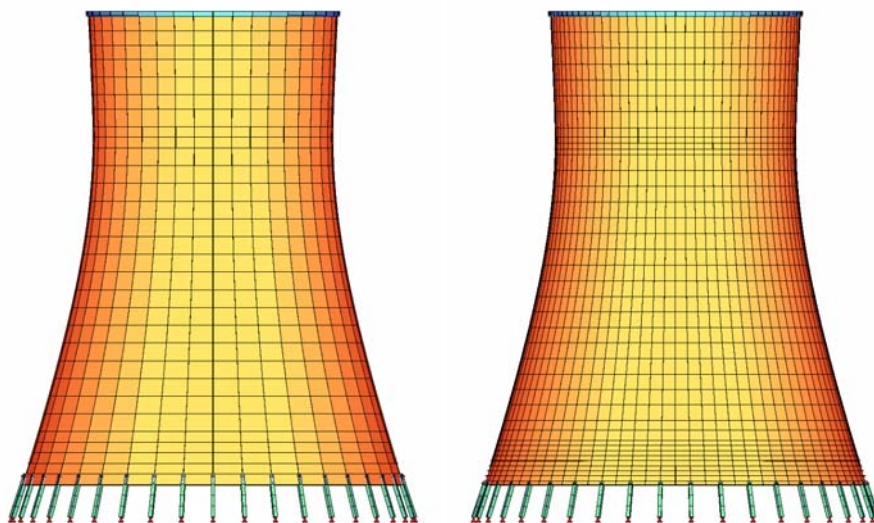


Abbildung 7: grobes Netz (Mod. 1) / feines Netz (Modell 3-4)

In den Abbildungen sind die Schalennormalkräfte infolge von Windlasten im Schnitt  $0^\circ$  (Staupunkt) dargestellt. Einen wesentlichen Einfluss auf die Schnittgrößen hat die Netzverfeinerung hier nur im Bereich des unteren Schalenrandes.

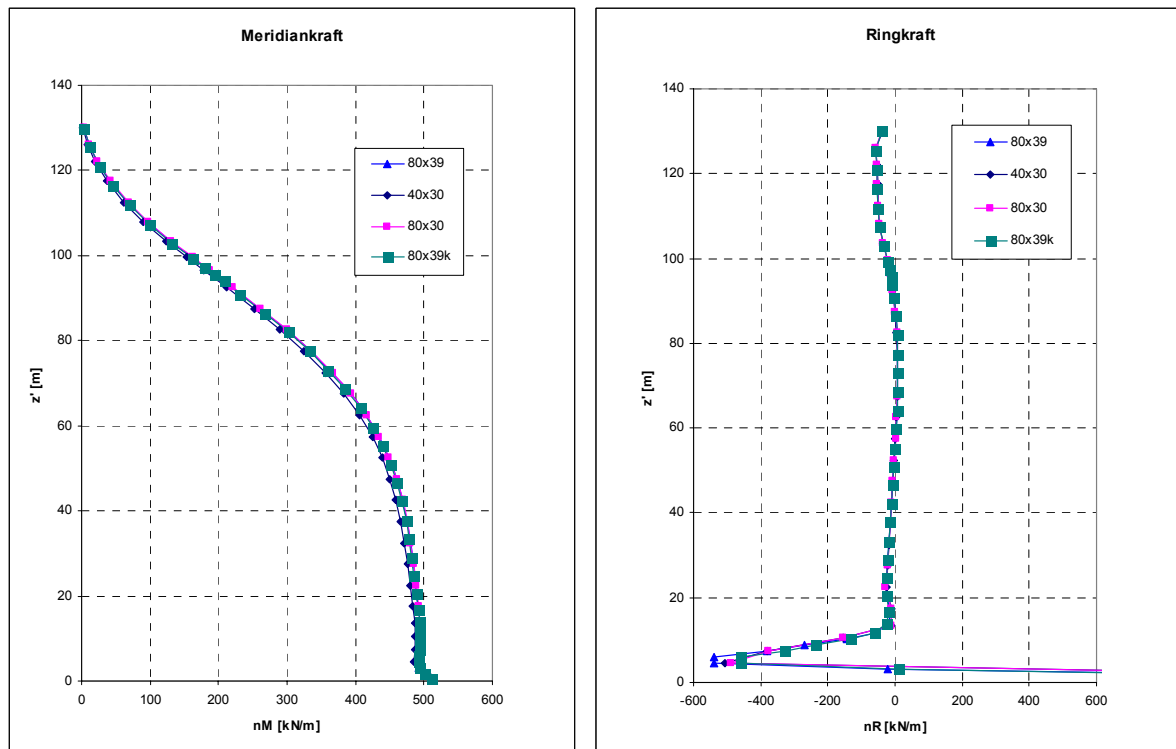


Abbildung 8: Meridiankraft  $n_M$  und Ringkraft  $n_R$  für verschiedene Elementeteilungen

### 4.3 Einfluss der Druckverteilungskurven

Die verschiedenen, nur von der Gestaltung der Schalenoberfläche abhängigen Druckverteilungskurven (Abbildung 4) führen zu stark unterschiedlichen Beanspruchungen, die in den nachfolgenden Abbildungen wieder im Schnitt  $0^\circ$  exemplarisch dargestellt sind.

Während die Ringkraft oberhalb des unteren Randbereichs nahezu gleich ist, ergeben sich hier für die Meridiankraft am Modell 3 unter der Druckverteilungskurve K1.6 etwa 30% größere Werte als für die Kurve 1.0.

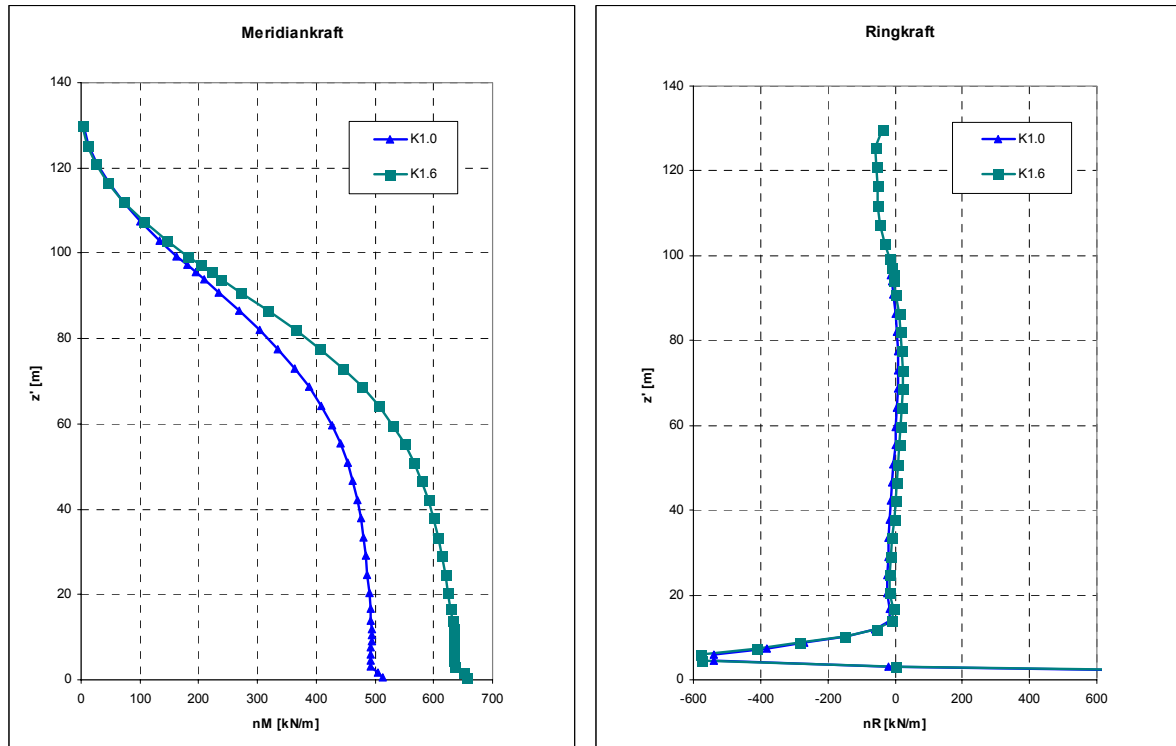


Abbildung 9: Meridiankraft und Ringkraft für Druckverteilungskurven K1.0 und K1.6

#### 4.4 Kopplung von Stab- und Schalenelementen (oberes Randglied/Stützen/Fundamente)

Besonderer Beachtung bedarf erfahrungsgemäß die Kopplung der Schalenelemente mit den Stützen. V-förmige Stützen können als Fachwerkstäbe mit entsprechend gelenkigen Anschlüssen generiert werden. Bemessungsmomente ergeben sich dabei nur aus Imperfektionen und Zwängungen.

Meridionalstützen müssen an ihrem Kopf Momente in Richtung der Schalennormalen aufnehmen können. Anstelle einer Aktivierung des 6. Schalenfreiheitsgrades ( $\varphi_z$ ) hat sich hier die Kopplung mit einem weiteren Schalenknoten über ein biegesteifes Stabelement bewährt.

Die Abbildung des U-förmigen, oberen Randgliedes kann als Stabzug mit starrer Kopplung an die oberste Reihe der Schalenknoten erfolgen.

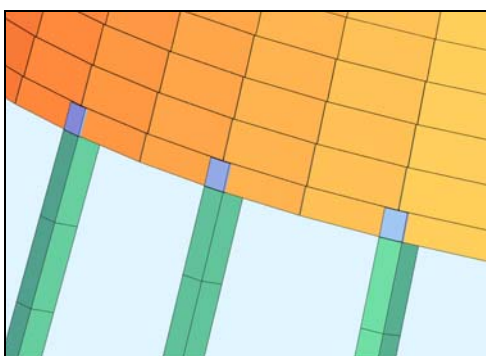


Abbildung 10: Meridionalstützen

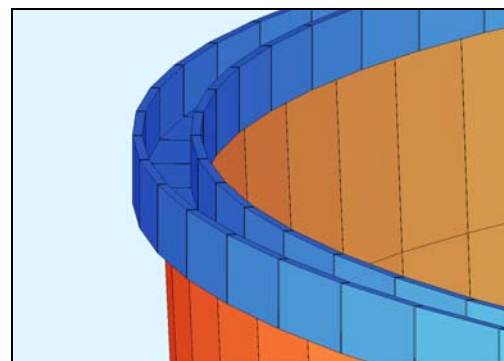


Abbildung 11: oberes Randglied

## 5 BERECHNUNG UND BEMESSUNG

### 5.1 Schnittgrößen im GZT

Die wesentlichen Bemessungsschnittgrößen ergeben sich für die Überlagerung der Einwirkungen aus Eigengewicht (G), Wind (W) und Temperatur (T). Für die zuvor dargestellte Kühlturmschale ist der Verlauf der Bemessungsschnittgrößen über die Höhe in Abbildung 12 dargestellt.

Die Schnittgrößenberechnung und -überlagerung erfolgen mit ASE bzw. MAXIMA.

Die Schalennormalkräfte (Membrankräfte) in Meridianrichtung resultieren überwiegend aus der Überlagerung von Eigengewicht und Wind. Maximale Zugkräfte in Meridianrichtung ergeben sich aus der Überlagerung  $1,00\text{ G} + 1,60\text{ W}$ . In Ringrichtung ergeben sich große Zug- und Druckkräfte im Bereich der unteren Randverstärkung.

Schalenbiegemomente resultieren vor allem aus Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenseite der Schale. Nur im Bereich der unteren Randverstärkung führen Windlasten wegen der diskontinuierlichen Lagerung zu zusätzlichen Momenten in Meridian- und Ringrichtung.

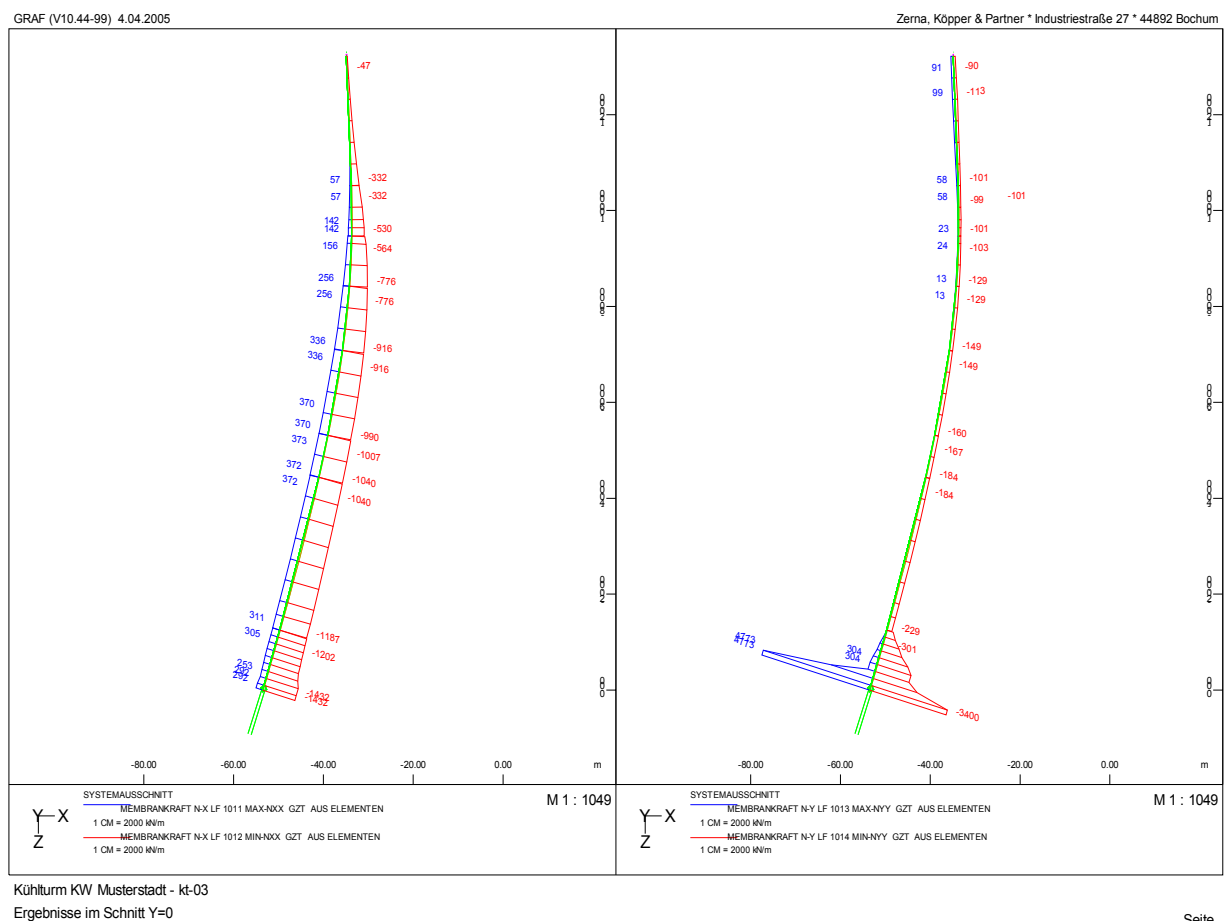
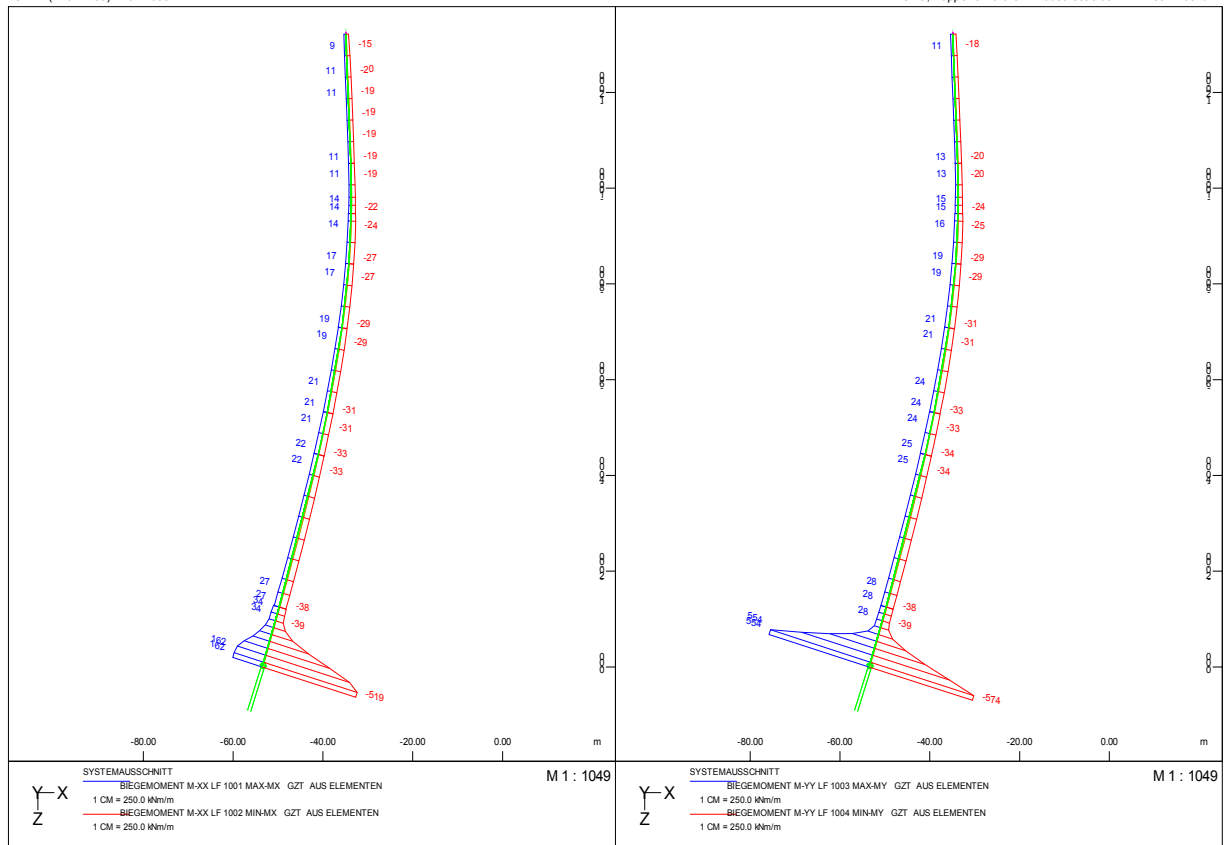


Abbildung 12: Membrankräfte in Meridian- und Ringrichtung



Kühlturm KW Musterstadt - kt-03  
Ergebnisse im Schnitt Y=0

Seite

Abbildung 13: Schalenmomente in Meridian- und Ringrichtung

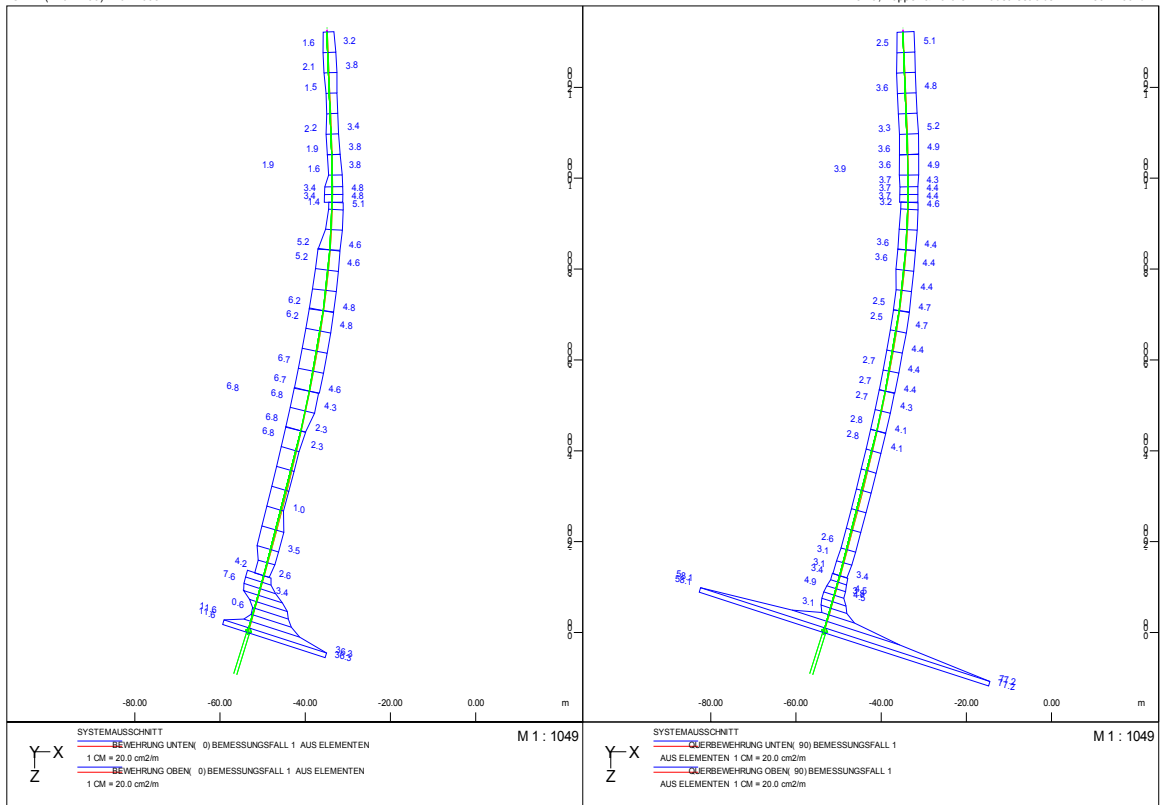
## 5.2 Bewehrungsverteilung

Die Bemessung mit BEMESS unter Berücksichtigung der erforderlichen Bewehrung zur Rissbreitenbeschränkung liefert die dargestellte Bewehrungsverteilung.

Aus der BTR ergibt sich allgemein ein erforderlicher Mindestbewehrungsgrad von  $\rho_M = \rho_R = 0,3 \%$  und in der oberen Schalenhälfte  $\rho_R = 0,4 \%$ , also z. B.  $\Sigma a_{sM} = 6 \text{ cm}^2/\text{m}$  für  $h = 20 \text{ cm}$ .

Die Bewehrung von Kühlturmschalen wird üblicherweise symmetrisch angeordnet. Eine entsprechende Bemessung mit dem Ziel einer symmetrischen Bewehrung ist mit BEMESS jedoch derzeit nicht möglich.





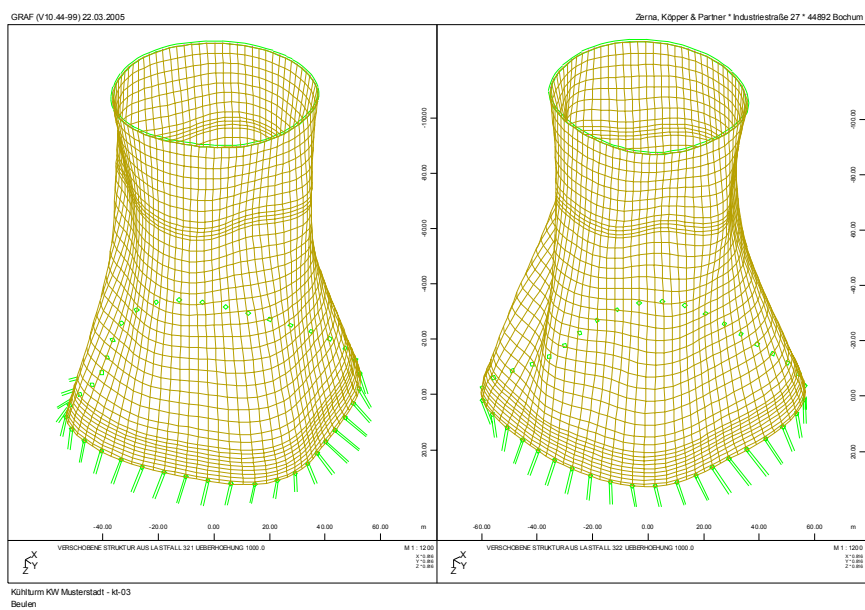
Kühlturm KW Musterstadt - kt-03  
 Ergebnisse im Schnitt Y=0

Seite

Abbildung 14: Meridianbewehrung und Ringbewehrung

### 5.3 Beulnachweise

Der Beulnachweis für die Lastkombination G + W wird mit DYNA geführt. Die Beulsicherheit beträgt hier wie in der BTR gefordert  $\gamma_B = 6,9 \geq 5,0$ .



Kühlturm KW Musterstadt - kt-03  
 Beulen

Seite 1

Abbildung 15: 1. und 2. Beulform

## 5.4 Eigenfrequenzen

Resonanzwirkungen infolge von dynamischen Windlastanteilen werden gem. BTR durch eine Erhöhung der statischen Ersatzlast erfasst. Der dynamische Überhöhungsfaktor ist dabei abhängig von der kleinsten Eigenfrequenz der Kühlturmschale. Die Berechnung der Eigenfrequenzen erfolgt mit ASE bzw. DYNA.

Im vorliegenden Beispiel ergibt sich bei starrer Auflagerung aus der Eigenfrequenz  $n_{\min} = 1,06 \text{ Hz}$  ein Überhöhungsfaktor von  $\varphi = 1,07$ .

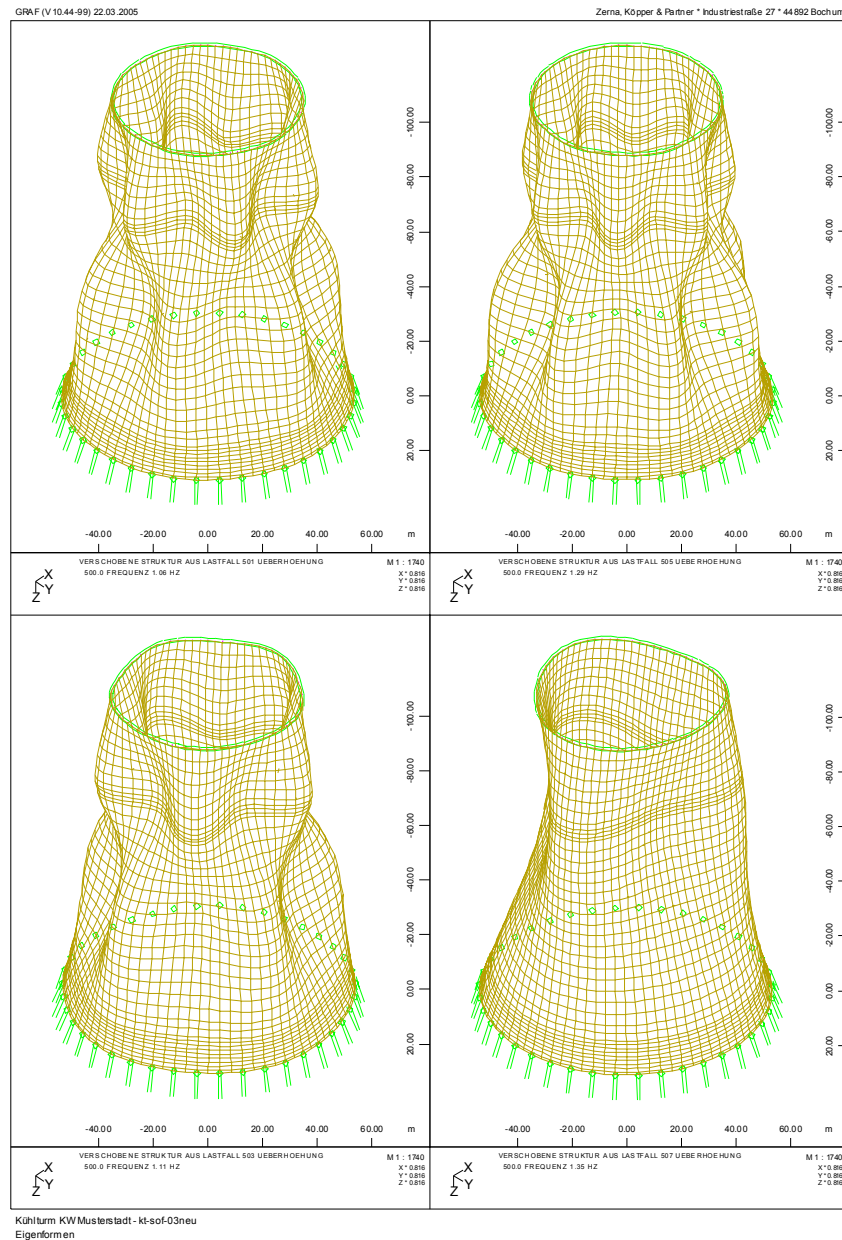


Abbildung 16: 1. - 4. Eigenform

## 6 MONITORING

Mit Errichtung des Kühlturms im RWE-Kraftwerk Niederaußem im Jahr 1999 startete erstmals ein Kühlturm-Monitoringprogramm. Der zum Block K gehörende Naturzugkühlturm erreicht nicht nur hinsichtlich seiner Kühlkapazität sondern auch in bautechnischer Hinsicht neue Dimensionen. Mit seiner Bauhöhe von 200 m ist er derzeit das weltweit höchste Bauwerk seiner Art. Neben seiner Funktion der Kühlung des Kühlwassers wird der Kühlturm auch zur Ableitung der gereinigten Rauchgase genutzt. Um auf die zeit- und kostenaufwändige, obligatorische Beschichtung der Kühlturmschaleninnenfläche verzichten zu können, wurde – als weitere Innovation – erstmalig ein „säure-resistenter“ Hochleistungsbeton entwickelt und eingesetzt. Um das durch Berechnungen und Laborversuche nicht auszuschließende Restrisiko bei technischen Neuentwicklungen sicher beherrschen zu können, wurde ein langjähriges Monitoring des ausgeführten Kühlturmtragwerks konzipiert, installiert und in Betrieb genommen.

Mit Hilfe von geplanten und regelmäßigen Beobachtungen diverser Bauwerksparameter sollen unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. ein Schadenseintritt, möglichst frühzeitig erkannt werden. Um Schadensursachen identifizieren und bewerten zu können, kann eine Korrelation mit den gleichfalls im Rahmen des Bauwerk-Monitorings gemessenen Bauwerkseinwirkungen und den ggf. veränderten Materialeigenschaften (z. B. in Form einer Nacherhärtung des Schalenbetons) durchgeführt werden.

Abbildung 17 gibt einen teilweisen Überblick über die nachfolgend aufgeführten Monitoring-Elemente:

- W 2 Windmessgeräte
- T 19 Temperatursensoren
- C 40 Betonwürfel
- G 12 Geophone
- A 16 Anodenleitern
- P 8 Betonprobeplatten

Mit Hilfe der 12 eingebauten Geophone lassen sich Eigenfrequenzen und -formen ermitteln. Nach Herstellung der Kühlturmschale wurden die Parameter des Sofistik-Rechenmodells entsprechend kalibriert. Hiervon ausgehend können Änderungen der globalen Tragwerksstruktur (E-Modul, Rissbildung etc.) durch Vergleich mit späteren Geophon-Messungen identifiziert werden.

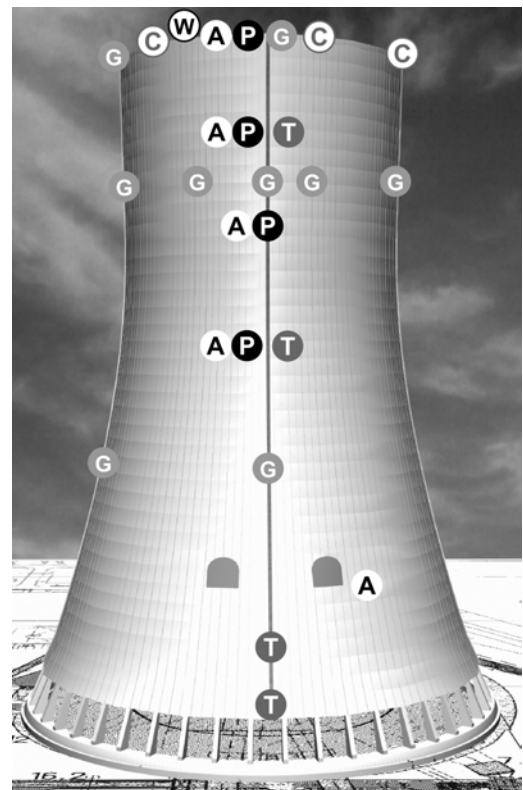


Abbildung 17: Monitoringprogramm am Kühlturm Niederaußem