

Sonderdruck (Nr. 4843) aus

# Elektrizitäts wirtschaft

Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke – VDEW  
Jg. 97 (1998), H. 23, S. 27 – 31



**GA Hochspannung  
Leitungsbau GmbH**

GAH  Gruppe

## **Verformung von Stahlvollwandmasten mit Steckstößen beim Einsatz in Hochspannungsfreileitungen**

Von Herbert Gohm, Friedrich Kießling und Volker Mahr

# Verformung von Stahlvollwandmasten mit Steckstößen beim Einsatz in Hochspannungsfreileitungen

Von Herbert Gohm, Walsrode, Friedrich Kießling, Erlangen, und Volker Mahr, Stade \*)

Die Verformung ist bei Stahlvollwandmasten hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit entscheidend und bestimmt vielfach die Bemessung. Der Einfluß von Steckstößen, die bei hohen Masten erforderlich sind, ist dabei angemessen zu berücksichtigen. Bisher fehlten praktische Erfahrungen und Vorgaben hierfür. Der Bericht behandelt Erfahrungen mit der Verformung von Stahlvollwandmasten mit Steckstößen, die an einer 110-kV-Leitung der PreussenElektra AG in Norddeutschland gewonnen wurden, und leitet Vorschläge für die Beachtung ihrer Verformung bei der Auslegung und Montage ab.

## Summary of the report

### Deformation of steel poles with slip joints used for high-voltage transmission lines

In case of steel poles the deformation is crucial in terms of serviceability and resistance and decides on the design very often. The effect of slip joints which are adopted for tall poles has thereby to be considered adequately. For this aspect practical experience and requirements have been lacking up to now. This report deals with experience on the deformation of steel poles with slip joints gained at a 110 kV line of PreussenElektra AG in Northern Germany and establishes proposals for adequate consideration during design and erection.

## 1 Beschreibung des Bauvorhabens

Die PreussenElektra AG, Hannover, stellte im Jahr 1998 die 110-kV-Doppelleitung Visselhövede - Bomlitz am Rande der Südheide im Regierungsbezirk Lüneburg fertig. Die Leitung wur-

de notwendig, weil der Strombedarf der im Gebiet ansässigen Chemieunternehmen über die bestehenden 20-kV-Netze nicht mehr zu decken ist.

Als Ergebnis des Raumordnungsverfahrens mit der Prüfung zweier Trassenvarianten im Norden der Stadt Walsrode ergab sich die verwirklichte Trasse, die von Visselhövede rd. 6 km durch den Landkreis Rotenburg und rd. 6 km durch den Landkreis Soltau-Fallobstetel bis nach Bomlitz verläuft (Bild 1).

PreussenElektra wollte ursprünglich die gesamte Leitung mit dem üblichen, technisch und wirtschaftlich vorteilhaften Donaumastgestänge errichten. Im Laufe des Genehmigungsverfahrens wurde jedoch im Landkreis Rotenburg eine Einebenen-Anordnung mit Stahlgittermasten favorisiert und von allen Beteiligten angenommen. Von Seiten der Wehrbereichsverwaltung kamen Einwände gegen die Leitungshöhe, da die Trasse auch den Schutzbereich einer Flugsicherungsanlage berührt. Mit niedrigen Stahlvollwandmasten unter Beibehaltung der Anordnung der beiden Stromkreise in einer Ebene ließen sich diese Einwände ausräumen. Die verwirklichte Leitung besteht daher je zur Hälfte aus Stahlvollwandmasten in Einebenenanordnung und aus Stahlgittermasten mit Donauanordnung der Stromkreise.

Der mit den Stahlvollwandmasten ausgerüstete Abschnitt umfaßt 25 Masten, wobei von den 11 Winkelabspannmasten 6 Masten der Winkelgruppe

160 bis 180° und 5 Masten der Winkelgruppe 140 bis 160° angehören. Der längste Mast erreicht rd. 35 m Höhe. Alle Masten haben mindestens einen Steckstoß. Die Leitung ist mit Einfachseilen Al/St 185/30 und einem Erdseil Al/St 95/55 belegt.

Die beiden Leitungsabschnitte eignen sich auch für einen relevanten Vergleich der Baukosten. Je Trassenkilometer ist die Bauweise mit Stahlvollwandmasten um rd. 60 % teurer, wobei die Kosten für die Gründungen um 110 %, für die Masten um 30 % und für die Stromkreise um 35 % steigen. Die größere Mastanzahl ist dabei für die Zunahme der Kosten entscheidend.

## 2 Bemessung von Stahlvollwandmasten

Die Vorgaben für die Bemessung von Stahlvollwandmasten finden sich in der derzeit gültigen Norm DIN VDE 0210/12.85, besonders im Abschnitt 8.5 Aufgrund der Erfahrungen mit den meteorologischen Bedingungen im Baugebiet wurden Windlasten mit um 40 % gegenüber den Normwerten erhöhtem Staudruck und die Eislasten mit dem doppelten Wert der Normeislast angesetzt.

Bei der Bemessung von Stahlvollwandmasten ist deren relativ große

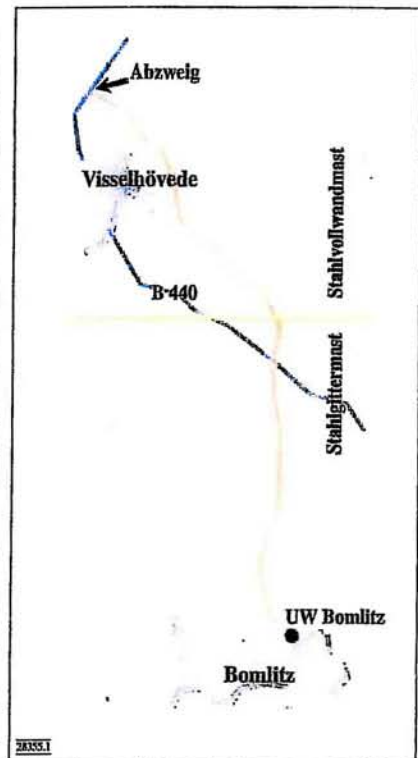


Bild 1. Lageplan der Leitung Visselhövede - Bomlitz

\*) Dipl.-Ing. V. Mahr ist Leiter der Abteilung TU/TL, PreussenElektra Netz GmbH & Co KG, Stade; H. Gohm ist geschäftsführender Gesellschafter der FBG - Freileitungsbau GmbH, Walsrode; Dr.-Ing. F. Kießling war bis zum Übertritt in den Ruhestand wissenschaftlicher Berater, Unternehmensbereich Verkehrstechnik der Siemens AG, Erlangen.

Durchbiegung zu beachten. In der Norm VDE 0210 ist daher gefordert, daß die Ermittlung der Schnittgrößen nach der Theorie II. Ordnung vorgenommen werden muß, d.h. die Schnittgrößen müssen am verformten Mast ermittelt werden. Zusätzlich ist festgelegt, daß die lastbedingte Auslenkung der Maste an der Mastspitze rechnerisch nachzuweisen und zu begrenzen ist auf:

- 4 % der Mastlänge bei Trag- und Winkeltragmasten unter Belastung durch Wind auf die Leiter mit und ohne Zusatzlast rechtwinklig zur Leiterungsrichtung und
- 5 % der Mastlänge bei Winkel-, Abspann- und Endmasten unter Belastung mit Leiterzugkräften mit Zusatzlast und Windlast auf die Masten.

Die Begrenzung der Verformung soll die Gebrauchstauglichkeit der Maste sicherstellen, da die Durchbiegung, besonders von Winkelabspannmasten, Einfluß auf die Leiterposition und damit die Abstände haben kann.

Bei langen und schlanken Masten, auch bei Winkelabspannmasten, kann dieses Kriterium der Gebrauchstauglichkeit entscheidend für die Bemessung werden. Die Verformung des Mastes muß dabei unter Berücksichtigung aller wesentlicher Einflüsse ermittelt werden, also des Einflusses der elastischen Verformung der Maste und auch der zusätzlichen Verformungen in den Steckstößen. Hinweise für die zusätzliche Verformung in Steckstößen finden sich in [1]. Messungen an Masten in einer Leitung wurden bisher nicht veröffentlicht, sind jedoch für eine sichere Bemessung wichtig. Weiterhin dienen solche Daten für die notwendigen Vorkehrungen für die Montage.

### 3 Vorkehrungen bei der Montage

Die relativ großen ständigen Verformungen der Winkelabspannmaste in Stahlvollwandbauweise müssen bei der Errichtung angemessen berücksichtigt werden. Die davon betroffenen Masten werden daher überlotet, d.h. gegen die Belastung eingerichtet, um sicherzustellen, daß sie nach Ende der Montage entweder vertikal stehen oder die Querträger waagrecht ausgerichtet sind.

Bisher wurden Stahlvollwandmasten meist so eingerichtet, daß nach der Belastung die Mastspitze lotrecht über dem Mastmittelpunkt in Bodenhöhe zu liegen kommt. Wie aus Bild 2a zu erkennen, ist dann der Querträger geneigt. Der optische Eindruck von geneigten, langen Querträgern ist ungünstig.

Die Vorgaben für die Überlotung der Winkelmasten für die Leitung sollten daher dafür sorgen, daß nach der Montage die Querträger eine möglichst horizontale Lage einnehmen (Bild 2b). Als Konsequenz aus dieser Vorgabe ergibt sich, daß die Tangente an die Biegelinie des Mastchaftes, wie sie sich nach Belastung durch die Leiterseite einstellt, in der Höhe der Querträger vertikal sein muß (Bild 2b). Die Überlotung ist mit dieser Vorgabe deutlich größer als bei den Vorkehrungen für eine vertikale Maststellung.

Der Winkel, unter dem die Mastachse bei der Montage gegen die Belastung zu neigen ist, damit die oben genannten Bedingungen erfüllt sind, ergibt sich aus

$$\beta = \varphi + n \alpha_s \quad (1)$$

Dabei ist

- $\varphi$  der elastische Verdrehwinkel des Mastes in Querträgerhöhe unter Alltagslast,
- $n$  die Anzahl der Stöße und
- $\alpha_s$  die Verkantung eines Stoßes.

Der elastische Verdrehwinkel ergibt sich aus den Mastabmessungen gemäß [2] zu

$$\varphi = \frac{\partial A}{\partial M_0} = \frac{1}{E} \int_0^l M(x) \cdot \frac{\partial M}{\partial M_0} J(x) \cdot dx \quad (2)$$

mit

- $A$  Formänderungsarbeit,
- $M$  Biegemoment,

$M_0$  fiktives, am Querträgeranschluß wirkendes Moment,

- $J$  Flächenträgheitsmoment des Querschnittes, das wegen der sich ändernden Querschnitte und Wanddicken, längenabhängig ist und
- $E$  Elastizitätsmodul.

In ähnlicher Weise wird auch die elastische Auslenkung des Mastes unter Belastung in Höhe der Querträger berechnet

$$r_x = \frac{\partial A}{\partial P_0} = \frac{1}{E} \int_0^l M(x) \cdot \frac{\partial M}{\partial P_0} J(x) \cdot dx \quad (3)$$

mit

$P_0$  fiktive Horizontalkraft, die in Höhe der Querträger angreift.

Aus dem ermittelten Winkel  $\varphi$  kann die Ausmittigkeit des Mastes in Querträgerhöhe beim Errichten berechnet werden.

$$r_m = h_T \cdot \text{tg} \varphi \quad (4)$$

mit

$h_T$  Höhe des Querträgers über dem Boden.

Schließlich ergibt sich die bleibende Exzentrizität nach dem Auflegen der Leiter unter Alltagsbedingungen aus:

$$r_e = r_m - r_x - r_s = r_m - r_x - \text{tg} \alpha_s \sum_{i=1}^n h_{si} \quad (5)$$

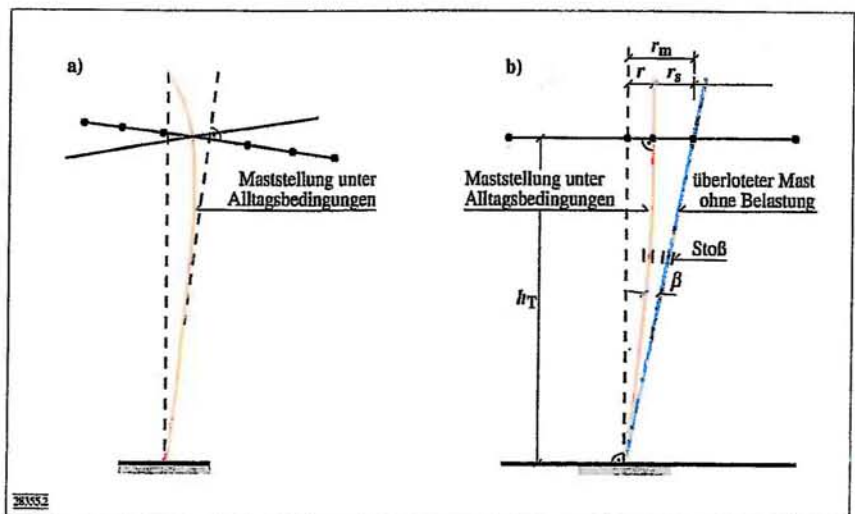


Bild 2. Maststellung nach Montage  
a) Mastspitze lotrecht über Mastmittelpunkt

b) Querträger waagrecht

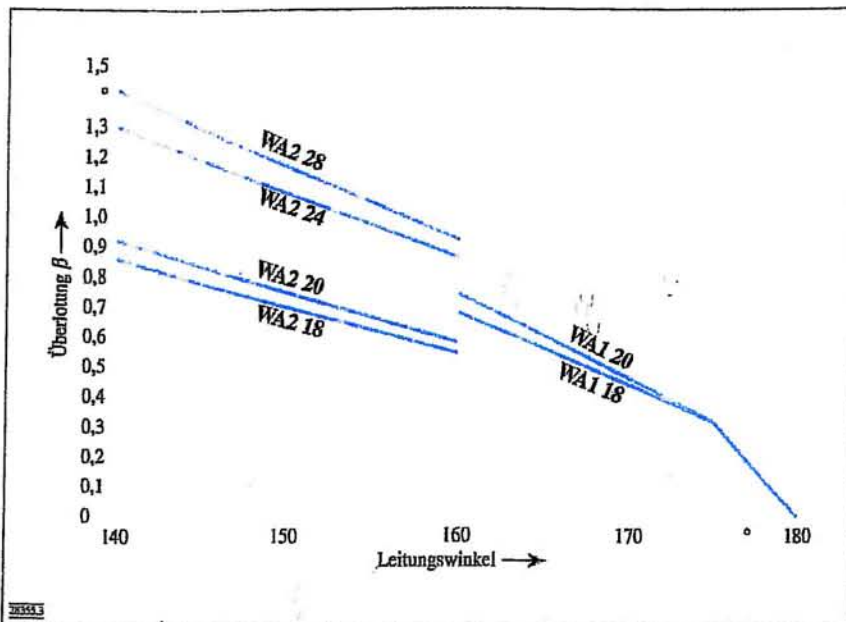


Bild 3. Überlotung, abhängig vom Masttyp und Leitungswinkel

Dabei ist  $h_{si}$  der Abstand zwischen dem jeweiligen Stoß und dem Anschluß des Querträgers am Mastschaft.

Bei den Montagevorgaben spielen die tatsächlichen Belastungen eine wesentliche Rolle. Bei Winkelmasten hängen diese vom tatsächlichen Leitungswinkel ab.

Hinsichtlich der Verformung in den Stößen wurde auf das Schrifttum [1] zurückgegriffen. Dort wird als Anhaltswert für die Bemessung bei maximaler Last eine Verkantung von  $0,4^\circ$  je Stoß vorgeschlagen. Da sich dieser Wert auf die maximale Belastung bezieht, wurden für die Montage entsprechend der deutlich niedrigeren Belastung unter

Alltagsbedingungen für jeden Stoß  $0,2^\circ$  berücksichtigt. In Bild 3 und Tafel 1 sind die Vorgaben für die Überlotung angegeben.

#### 4 Montage

Das Verfahren zum Errichten der Stahlvollwandmaste muß auf die Gründungen, die Zufahrtswege, die Mastlänge und die anzustrebende Einbaulage abgestimmt sein. Der Einsatz eines mobilen Stellgerätes, eines Kranes also, bietet sich an, wenn die Zufahrten zu den Standorten dies zulassen. Diese Voraussetzung war bei der beschriebenen Leitung gegeben, auch wenn dies

wegen der ungünstigen Witterung eine teilweise aufwendige Befestigung von Zufahrtswegen erforderte.

Bei der üblichen Vorgehensweise wird der untere Mastschuß in die Gründung eingebaut, entsprechend der Sollage ausgerichtet und anschließend die Gründung fertiggestellt. Erst danach folgt das Aufsetzen der übrigen Mastteile mit einem Stellgerät und das Zusammenziehen der Schüsse. Bei diesem Arbeitsablauf ist das Erreichen der angestrebten, geneigten Maststellung schwierig, da die Mastachse wegen der gerundeten Mastkanten und der Fertigungstoleranzen nicht ausreichend genau zu ermitteln ist. Aus diesem Grund wurden die Maste bei diesem Bauvorhaben vollständig vormontiert und in einem Stück gestellt. Hierzu wurden die Maste am Boden liegend ausgerichtet, die einzelnen Schüsse mit der vom Hersteller angegebenen Kraft zusammengezogen und die Querträger mit der Erdseilspitze angefügt.

Alle Standorte mit Winkelabspannmasten erhielten Betonblockgründungen mit Stufen und einem Köcher zur Aufnahme des Mastchaftes. Im Unterschied zur herkömmlichen Vorgehensweise wurden nach dem Herstellen der Grundplatte, die mit Bewehrung zur Anbindung des Kopfes versehen war, die Masten bereits aufgestellt, ausgerichtet und anschließend der Gründungskopf betoniert.

Ein in der Grundplatte einbetonierter Stahlbolzen markierte dabei den Mastmittelpunkt zum genauen Aufsetzen des Mastes. Am unteren Mastende wurde als Gegenstück ein Kreuz aus Flachstahl mit einer Bohrung in der Mastmitte eingesetzt, mit der die Maste in ihrer Position fixiert werden konnten. Die

Tafel 1. Überlotung von Stahlvollwandmasten PreussenElektra, 110-kV-Leitung Abzweig Bomlitz, gemessene und errechnete Exzentrizität der Querträger vor und nach Belastung

| Mast-Nr. | Masttyp            | Leitungswinkel | eingerichtete Überlotung |            | elastische Durchbiegung |            | Einfluß der Stöße | bleibende Durchbiegung gerechnet | bleibende Durchbiegung gemessen | Unterschied |
|----------|--------------------|----------------|--------------------------|------------|-------------------------|------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------|
|          |                    |                | $\beta$                  | $r_m$<br>m | $r_x$<br>m              | $r_s$<br>m |                   |                                  |                                 |             |
| 3        | WA <sub>1</sub> 20 | 164            | 0,63                     | 0,220      | 0,083                   | 0,035      | 0,102             | 0,080                            | -0,022                          |             |
| 4        | WA <sub>1</sub> 20 | 174            | 0,35                     | 0,122      | 0,029                   | 0,035      | 0,058             | 0,030                            | -0,028                          |             |
| 5        | WA <sub>2</sub> 28 | 149            | 1,20                     | 0,586      | 0,201                   | 0,109      | 0,276             | 0,260                            | -0,016                          |             |
| 6        | WA <sub>2</sub> 20 | 151            | 0,74                     | 0,258      | 0,103                   | 0,035      | 0,120             | 0,090                            | -0,030                          |             |
| 7        | WA <sub>2</sub> 24 | 153            | 1,02                     | 0,427      | 0,138                   | 0,081      | 0,208             | 0,100                            | -0,108                          |             |
| 8        | WA <sub>1</sub> 20 | 174            | 0,35                     | 0,122      | 0,029                   | 0,035      | 0,058             | 0,030                            | -0,028                          |             |
| 10       | WA <sub>1</sub> 20 | 170            | 0,47                     | 0,164      | 0,052                   | 0,035      | 0,077             | 0,050                            | -0,027                          |             |
| 11       | WA <sub>2</sub> 18 | 145            | 0,78                     | 0,245      | 0,101                   | 0,035      | 0,109             | 0,080                            | -0,029                          |             |
| 14       | WA <sub>1</sub> 20 | 180            | -                        | -          | -                       | -          | -                 | -                                | -                               |             |
| 19       | WA <sub>2</sub> 20 | 148,5          | 0,78                     | 0,272      | 0,119                   | 0,035      | 0,126             | 0,100                            | -0,026                          |             |
| 20       | WA <sub>1</sub> 20 | 180            | -                        | -          | -                       | -          | -                 | -                                | -                               |             |

Greifzüge zur Verankerung ließen das genaue Ausrichten mit Hilfe eines herkömmlichen Theodoliten zu, wobei die waagerechte Verschiebung des Mastachsenpunktes in Querträgerhöhe als Richtgröße diente. Diese Vorgehensweise führte zum Stellen der Maste in der vorgegebenen Lage und hat sich als wirtschaftlich erwiesen.

### 5 Beobachtungen nach der Leitungsfertigstellung

Nach der Leitungsfertigstellung wurden die betroffenen Winkelabspannmaste nach dem optischen Eindruck beurteilt und dann hinsichtlich der Lage der Querträger vermessen. Nach dem Augenschein hat sich bei allen Winkelabspannmasten eine waagerechte Querträgerlage eingestellt; mit dem Auge war eine Neigung der Querträger nach der einen oder anderen Seite nicht zu erkennen (Bild 4).

In Tafel 1 sind die gemessenen, bleibenden Auslenkungen in der Querträgerhöhe dargestellt. Die Werte zeigen, daß bei allen Masten eine Auslenkung entgegen der Belastungsrichtung vorhanden ist. In Tafel 1 sind die nach Gl.(5) errechneten Auslenkungen aufgeführt.

Der Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen bleibenden Auslenkungen ergibt durchwegs negative Werte. Dies bedeutet, daß die Auslenkungen und auch die Biegewinkel nach der Belastung größer sind als die errechneten. Bei den Masten mit einem Stoß (Masten 3, 4, 6, 8, 10, 11 und 19) beträgt der Unterschied zwischen den gemessenen und errechneten Auslenkungen durchgängig rd. 30 mm, unabhängig vom Masttyp und unabhängig vom tatsächlichen Leitungswinkel. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß die Ursache dieses Unterschiedes in den Steckstößen liegt. Die Verkantung der Steckstöße ist offensicht-

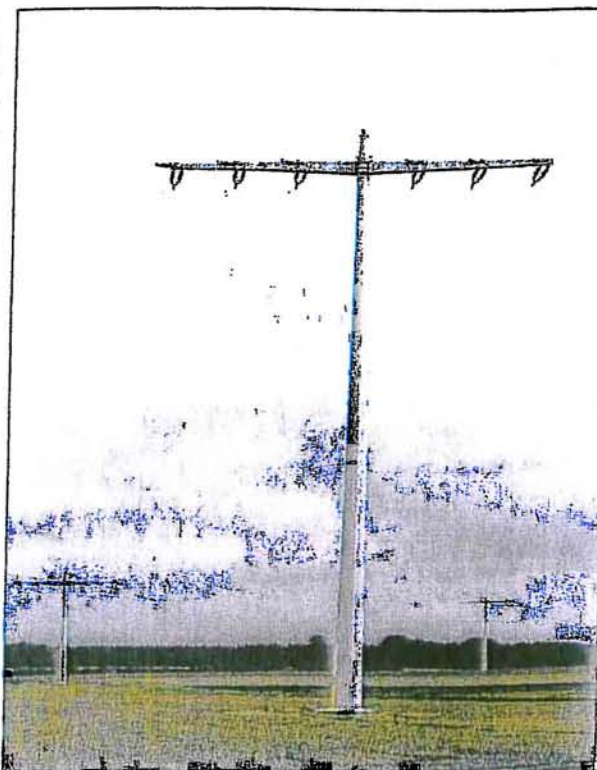


Bild 4. Winkelabspannmast nach dem Auflegen der Leiter

lich größer als bei der Ermittlung der Überlotung zugrunde gelegt wurde. Bei den Masten mit zwei Stößen (Maste 5 und 7) ergeben sich keine einheitlichen Aussagen. Bei Mast 5 stimmen Rechnung und Messung gut überein. Bei Mast 7 liegen ähnliche Erkenntnisse vor wie bei allen Masten mit einem Stoß.

### 6 Schlussfolgerung und Empfehlungen

Es hat sich gezeigt, daß unabhängig vom Masttyp und unabhängig vom tatsächlichen Leitungswinkel, d.h. der tatsächlichen Belastung, die beobachtete waagerechte Auslenkung nach der Belastung bei Masten mit einem Stoß um rd. 30 mm und bei Masten mit zwei Stößen um rd. 100 mm größer ist als theoretisch unter Zugrundelegung einer Winkelverkantung von  $0,2^\circ$  je Stoß ermittelt. Da die Differenz unabhängig vom Masttyp und unabhängig von der Belastung ist, kann angenommen werden, daß die Stöße eine größere Verkantung erfahren und diese Verkantung auch unabhängig von den Einflußfaktoren Belastung und Masttyp ist. Eine in der Tendenz größere Überlotung als bei diesem Vorhaben vorgegeben ist angebracht, um die angestrebte Position der

Maste nach der Belastung unter Alltagsbedingungen noch genauer zu erreichen. Unabhängig von der Belastung sollte daher je Stoß eine Verkantung von  $0,3^\circ$  bis  $0,4^\circ$  berücksichtigt werden.

Da die Unterschiede zwischen errechneter und gemessener Auslenkung unabhängig von der Belastung sind, dürfte auch die Verkantung in den Stößen bei höchster Last, d.h. unter Seilzugkräften bei Wirkung von Wind und Eis nicht wesentlich zunehmen. Der Ermittlung der Verformung unter höchster Last sollten daher Werte zwischen  $0,4^\circ$  und  $0,5^\circ$  je Stoß zugrunde gelegt werden.

Aus den durchgeführten Messungen ergibt sich kein Hinweis auf ein Schiefstellen der Gründungen. Da jedoch eine Überlotung entgegen der Mastbelastung immer zweckmäßig erscheint, sollte pauschal das Schiefstellen der Gründungen mit  $0,1^\circ$  berücksichtigt werden, sofern nicht örtlich ungünstige Bodenverhältnisse größere Werte angeben lassen.

Die Maste sollten so eingerichtet werden, daß sich nach der Belastung durch die Leiter unter Alltagsbedingungen eine horizontale Lage der Querträger ergibt. Diese Vorgabe gilt nicht nur für Masten mit Einebenenordnung der Leiter, sondern auch bei Donauanordnung, wobei der untere Querträger als Bezug benutzt werden sollte.

Der Einfluß der Auslenkung unter Belastung hat einen erheblichen Einfluß auf die Lage der Leiter. Dieser Einfluß nimmt mit der Mastlänge zu, wenn die Auslenkung nur relativ hierzu begrenzt wird. Im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit sollte daher die Zunahme der Auslenkung unter Höchstlasten gegenüber den Alltagsbedingungen absolut, z.B. auf 0,5 m, begrenzt werden. Hinweise hierauf finden sich auch in [3].

### 7 Schriftum

- [1] Stahlmaste in Vollwandbauweise. Projekt 152 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Universität-Gesamthochschule Essen, Fachbereich Bauwesen, 1992.
- [2] Fischer, R.; Kießling, F.: Freileitungen, 4. Auflage, Springer-Verlag 1993.
- [3] ASCE-Manual No.72: Design of steel transmission poles, American Society of Civil Engineers, 2. Auflage, 1990.

(28355)