



**Hochschule für Technik und
Wirtschaft Dresden**

Fakultät
Bauingenieurwesen

Studiengang:
Bauingenieurwesen

Lehrgebiet:
Konstruktiver Ingenieurbau

DIPLOMARBEIT

Statisch konstruktive Entwicklung eines Abstandsmontagesystems für Stählerne Oberleitungsmaste der DB AG

Betreuer:
Prof. Dr.-Ing. Holger Flederer ; Dr.-Ing. Lars Sieber
Dipl.-Ing. Wolfgang Schulz

Bearbeitungszeitraum: **03.06.2020 bis 03.11.2020**

Verfasser

Björn Jannik Wendler
24.06.1997 in Dresden

Bildungsweg

2016 - 2020 HTW-Dresden
2013 - 2016 BSZ-Elektrotechnik Dresden
2007 - 2013 HOGA Schloss Albrechtsberg
2003 - 2007 91. Grundschule „Am Sand“



Problemstellung

Derzeit wird an allen Fahrleitungsmasten von elektrifizierten DB Eisenbahnstrecken die Bauweise mit einem unterstopfem Mastfuß verwendet. Die alternative und im Ausland etablierte Abstandsmontage ist in Deutschland nicht zugelassen. Denn die verwendeten Ankerbolzen sind nur auf Normalkraftabtrag zugelassen. Bei der Abstandsmontage müssen die Ankerbolzen eine Kombination aus Momenten, Normal- und Querkraften aufnehmen. Es ist zu erwarten, dass zum Abtrag dieser Belastungen ausreichende Tragfähigkeitsreserven vorhanden sind. Die Anwendung der Abstandsmontage bietet eine Zeit- und Arbeitsaufwandreduktion und die Verminderung von Ausführungsmängeln durch das Wegfallen der Unterstopfung.

Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollten die Tragfähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit der Ankerbolzen unter kombinierten N, V und M Belastungen untersucht und nachgewiesen werden. Dazu erforderlich sind die Entwicklung eines Berechnungsmodells, die Berechnung der Lastannahmen für Oberleitungsmaste, Tragfähigkeits- und Ermüdungsnachweise am Peiner- und Stahlwinkelmast und Nachweise für Bolzen im Beton nach EC 2 Teil 4. Die notwendigen Nachweisverfahren sollten recherchiert und mit den im Eurocode geforderten Nachweisen erweitert werden. Es sollen Aussagen zur Einsetzbarkeit der Abstandsmontage im DB Netz getroffen werden.

Betrachtete Maste:

Mast HEB 240 L = 11,5m (Stahl Sondermast nach Ebs. 04.02.12 Blatt 1) und **Stahlwinkelmast 600 x 800, 90 x 9** (nach Ebs. 04.10.01)

Die Berechnungen der Mast- und Ankerbolzenschnittgrößen werden mit Hilfe von einem RFEM-Modell des jeweiligen Mastes durchgeführt. Zur Überprüfung der Berechnungen wurden Laborversuche mit den zu erwartenden Lasten durchgeführt und in der Auswertung mit den Ergebnissen der Berechnungen verglichen.



Abb.: Abstandsmontage in Dänemark

Konstruktion des Abstandsmontagesystems

Der Entwurf des Abstandsmontagesystems erfolgt nach dänischem Vorbild in Abstimmung mit den EBS – Richtlinien. Die Lastannahmen für Oberleitungsmaste und die Berechnungsverfahren der Mast- und Bolzenschnittgrößen werden entsprechend des Fachbuches „Fahrleitungen elektrischer Bahnen“ von Kießling angewendet. Bei der Abstandsmontage werden statt flacher Unterlegscheiben Kugelscheiben verwendet. Diese gleichen die Toleranzen aus dem Betonfundament und der Stellung der Ankerbolzen aus. Die Kugelscheiben werden mit der flachen Seite zur Fußplatte hin eingebaut. Die konische Seite ist zur Mutter hin positioniert. Abhängig von der freien Bolzenlänge werden entweder separate Kegelflännchen oder Muttern mit integrierten Kegelflännchen eingebaut. Dadurch wird die Fußplatte ebenfalls gegen Verschiebung gesichert. Um die Bolzenbiegung möglichst gering zu halten, muss der Abstand zwischen dem Betonfundament und der Fußplatte möglichst klein gehalten werden. Jedoch muss genug Abstand zur Montage gegeben werden.

Berechnungsmodell

Zur Berechnung der Beanspruchung der Ankerbolzen muss ein FE-Modell erstellt werden, in welchem die Konstruktionseigenschaften möglichst realitätsnah modelliert werden. Abhängig von der tatsächlichen Ausführung muss das Berechnungsmodell angepasst werden. Der maßgebende Faktor ist die Ausrichtung der Kugelscheiben. Werden die Kugelscheiben mit der konischen Seite zu den Lochrändern hin ausgerichtet, erfolgt der Querkraftabtrag über diese Kontaktflächen. Diese können als Knotenkopplungen modelliert werden. Werden die Kugelscheiben mit der flachen Seite zur Mastfußplatte hin positioniert, erfolgt der Querkraftabtrag über Reibung und muss im RFEM mit Kontaktflächen und den Reibungskoeffizienten modelliert werden.

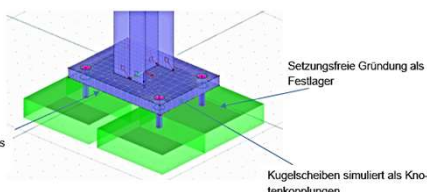


Abb.: Berechnungsmodell Peinermast in RFEM

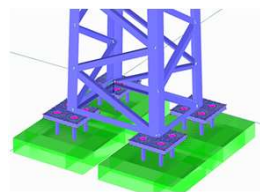


Abb.: Berechnungsmodell Stahlwinkelmast in RFEM

Bolzenschnittgrößen

Zur Berechnung der Bolzenschnittgrößen müssen die Lastannahmen auf die zu erwartenden Oberleitungsmaste und die resultierenden Mastschnittgrößen am Mastfuß ermittelt und auf den Ankerbolzen verteilt werden. Die Ankerbolzen erhalten Druck- und Zugkräfte, Querkraften und Momente aus den Querkraften und deren Hebelarm zur Einspannung der Ankerbolzen im Beton. Der Hebelarm setzt sich nach EC 2 Teil 4 aus der freien Bolzenlänge, der halben Dicke der Mastfußplatte und aus dem Abstand der Einspannung im Beton zur Fundamentoberkante zusammen. Dieser Abstand entspricht nach Eurocode der Hälfte des Spannungsdurchmessers der Ankerbolzen.

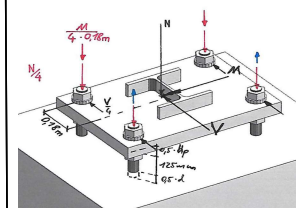


Abb.: Aufteilung der Mastschnittgrößen

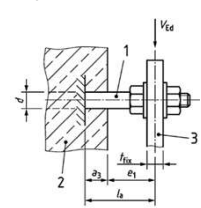


Abb.: Hebelarm Bolzenmoment

Bolzennachweise

Üblicherweise werden Bolzenverbindungen auf die zu erwartenden Versagenskriterien untersucht. Diese beinhalten Abscheren, Lochleibung, Biegung und eine Kombination von Abscheren und Biegung der Bolzen. Bei diesen Nachweisen wird jedoch der Einfluss der Normalkraft nicht berücksichtigt. Diese hat bei den Ankerbolzen einen deutlich höheren Einfluss als die Querkraft, die sonst oft maßgebend ist. Wie bei anderen Stahlbauteilen muss daher eine Vergleichsspannung ermittelt werden. Die üblichen Formeln sind allerdings nicht für Bolzenverbindungen ausgelegt. Ein entsprechendes Nachweisverfahren ist im Forschungsbericht „Schrauben mit planmäßiger Biegung“ der TU Braunschweig beschrieben.

Nachweisverfahren

Bolzenzugfähigkeit nach „Schrauben mit planmäßiger Biegung“

Zuerst wird überprüft ob die Querkraft für den jeweiligen Nachweis relevant ist. Für ein ausreichend großes Verhältnis des Hebelarms zum Bolzendurchmesser muss die Querkraft nicht berücksichtigt werden.

$$\frac{e}{d} > 1,0 \quad \text{bzw.} \quad \frac{M}{(Q \cdot d)} > 1,0$$

Mit e Hebelarm zwischen Einspannung und Querkraft [cm]
 d Bolzendurchmesser (Spannungsdurchmesser) [cm]

Es verbleibt die Interaktion von Biegung und Normalkraft. Dazu muss das Grenzbiegemoment mit dem Ausnutzungsgrad der Normalkraft abgemindert werden.

Dabei wird das Grenzmoment wie folgt berechnet:

$$M_{gr}^* = 0,90 \cdot W_{pl} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M}$$

$$\text{mit } W_{pl} = 1,7 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot d^3$$

d Durchmesser des Spannungsquerschnitts [mm]

f_{yk} Dehngrenze der Schraube [N/mm²]

γ_M Teilsicherheitsbeiwert [1,0]

Der Nachweis ist erfüllt, wenn das Verhältnis des vorhandenen Momentes zu dem abgeminderten Grenzmoment kleiner 1,0 ist. Der maximale Ausnutzungsgrad der Ankerbolzen bei dem betrachteten Peinermast liegt bei 40% für den Lastfall D (nach Kießling) bei der Belastung durch Eigen-, Wind- und Eislasten in ungünstiger Richtung. Das maßgebende Moment tritt an der Einspannung der Ankerbolzen am Fundament auf. Der maximale Ausnutzungsgrad der Ankerbolzen des betrachteten Stahlwinkelmastes liegt bei 13%. Dies folgt daraus dass der Stahlwinkelmast mit 16 Bolzen verankert ist.

Das abgeminderte Grenzmoment wird berechnet:

$$M_{gr}^* = M_{gr} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_{Rd}}\right)$$

$$\text{mit } N_{Rd} = A_{Sp} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M}$$

N vorhandene Normalkraft [kN]

A_{Sp} Spannungsquerschnitt [mm²]

Bolzenermüdung

Durch die Vorbeifahrten der Züge, im Gebrauch der Strecke, entstehen Druck- und Soglasten am Mast. Diese führen zu Ermüdungsbeanspruchungen und einem Lastspiel bei jeder Zugvorbeifahrt. Um zu ermitteln ob es zu einem Ermüdungsversagen der Ankerbolzen im Nutzungszeitraum des Mastes kommt, müssen die Ankerbolzen auf Ermüdung nachgewiesen werden. Die Lasten auf den Doppel-T-Profilmast wurden durch Streckenmessungen im Rahmen einer Masterarbeit an der HTW Dresden ermittelt. Die Messwerte werden mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 multipliziert.

Für die Berechnung werden die Messwerte in eine Querkraft je Achse des Mastes und ein Torsionsmoment aufgeteilt. Es ergeben sich zwei entgegengesetzte Ersatzlastfälle. Diese ergeben das ermüdungsrelevante Lastspiel.

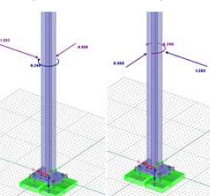


Abb.: Ersatzlasten Ermüdung

Für den Nachweis der Ermüdungssicherheit muss diese für die Normalspannung aus der Bolzennormalkraftänderung und den Momenten aus den Ersatzlasten und die Schubspannung aus den Querkraften der Ersatzlasten separat nachgewiesen werden.

Die Dauerfestigkeit der Ankerbolzen bei Normalspannungen kann aus der Zulassung der RS-Schwerlastanker (Schröder) entnommen werden und beträgt 55,60 N/mm² (M42). Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit bei Schubspannungen beträgt nach Eurocode 39,73 N/mm² (M42). Das maximale berechnete Normalspannungsspiel beträgt 32,52 N/mm² und das berechnete Schubspannungsspiel beträgt 2,40 N/mm². Es ist daher kein Ermüdungsversagen zu erwarten.

Laborversuche

Zur Untersuchung der Lastannahmen wurde ein Probemast im Labor aufgebaut und belastet. Dabei wurden durch einen Hydraulikzylinder 15kN Drucklast in 165cm Höhe oberhalb der Mastfußplatte eingeleitet. Gemessen wurde die Bolzenverformung an 3 Messpunkten und die Auslenkung am Bolzenkopf unter den zu erwartenden Lasten. Es sollen Rückschlüsse auf den tatsächlichen Momentenverlauf im Bezug auf das RFEM-Modell geschlossen werden. In den Nachweisen wurde die Momentenverteilung als Kragarm angenommen. Durch die Einspannung der Bolzen in die Mastfußplatte ist ein anderer Momentenverlauf zu erwarten.

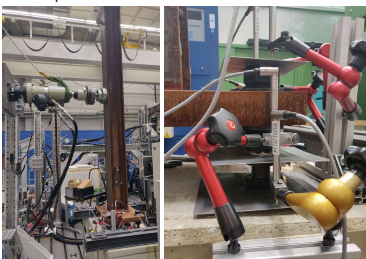


Abb.: Versuchsaufbau



Abb.: Mutter und Kugelscheibe

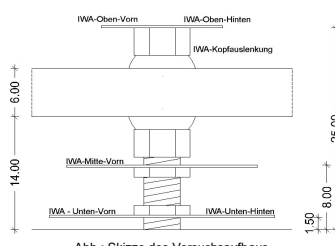


Abb.: Skizze des Versuchsaufbaus

Messwerte und Auswertung

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt durch Wegaufnehmer an den Messpunkten. Aus den Messwerten wird die Längenänderung und die Neigung der Bolzen an dem jeweiligen Messpunkt ermittelt. Die Messwerte der IWA's deuten auf eine Biegelinie mit einem Wendepunkt hin. Der resultierende Momentenverlauf ist ähnlich eines Rahmentragwerks mit steifen Ecken zu erwarten. Die Messwerte und die Werte aus dem RFEM-Modell liegen nah beieinander.

Fazit

Die Abstandsmontage bei Oberleitungsmasten sollte in Deutschland als Alternative zur Unterstopfung in Betracht gezogen werden. Die Nachweise und Versuche haben die Machbarkeit bewiesen. Die erforderlichen Nachweisverfahren sind vorhanden und können weitestgehend aus bestehenden Richtlinien entnommen werden. Der Eurocode 2 Teil 4 bildet dabei eine gute Grundlage für die Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsnachweise. Wenn die genauen Konstruktionsdetails und Bemessungsvorschriften in Richtlinien festgelegt werden, spricht nichts dagegen, die Abstandsmontage in Zukunft auch in Deutschland zu verwenden.