

Probabilistische Nachweisführung von Stahlgittermasten im Freileitungsbau

**vom Fachbereich Bauwissenschaften
der Universität Duisburg-Essen
genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades**

Doktor-Ingenieur

**vorgelegt von
Matthias Mix
aus Chemnitz**

Eingereicht am: 10.06.2010

Tag der mündlichen Prüfung: 07.09.2010

**Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. M. Schnellenbach-Held
Universität Duisburg-Essen**

**Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Thierauf
Universität Duisburg-Essen**

**Prof. Dr.-Ing. habil. N. Stranghöner
Universität Duisburg-Essen**

Schriftenreihe Institut für Metall- und Leichtbau
Universität Duisburg-Essen
herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Band 2

Matthias Mix

**Probabilistische Nachweisführung von
Stahlgittermasten im Freileitungsbau**

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9703-9

ISSN 1867-6782

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als technischer Angestellter der Starkstromanlagengesellschaft mbH im Rahmen einer externen Promotion am Fachbereich Bauwissenschaften der Universität Duisburg-Essen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Thierauf gilt mein besonderer Dank für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit. Für zahlreiche Anregungen und Ratschläge danke ich ihm ebenso herzlich wie für die Übernahme des ersten Gutachtens.

Frau Prof. Dr.-Ing. habil. N. Stranghöner danke ich für das dieser Arbeit entgegengebrachte freundliche Interesse und für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Frau Prof. Dr.-Ing. M. Schnellenbach-Held danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsverfahren und die damit verbundene Mühe.

Essen, im November 2010

Matthias Mix

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Besonderheiten des probabilistischen Sicherheitskonzeptes	2
1.2. Aufbau der Arbeit	3
2. Probabilistische Grundlagen für den Stahlgittermastbau	6
3. Einwirkungen	13
3.1. Stabkräfte infolge normierter Lasten	13
3.2. Gewichtskräfte	18
3.3. Wind auf Konstruktion	23
3.4. Seil- und Isolatorvereisung	23
3.5. Wind auf Seile und Isolatoren	24
3.5.1. Höhenabhängigkeit der Böenwindgeschwindigkeit	24
3.5.2. Vergrößerte Windangriffsfläche bei Vereisung	25
3.5.3. Wind auf Seile	29
3.5.4. Wind auf Isolatoren	31
3.6. Horizontalzug der Seile	32
3.6.1. Horizontalzug als stochastische Variable	32
3.6.2. Horizontalzug als Funktion stochastischer Variablen	41
3.6.3. Komponentenzersetzung	44
4. Einwirkungskombinationen	45
4.1. Klimatisch verursachte Einwirkungen	46
4.1.1. Extremer Wind	48
4.1.2. Extremes Eis bei mäßigem Wind	48
4.1.3. Hochzugmaste	49
4.2. Unplanmäßige Horizontalzugbelastung in Leitungsrichtung	50
4.2.1. Abspann- und Winkelabspannmast mit einseitigen Zügen	50
4.2.2. Seilzugverminderung	52
4.3. Akkumulierte Systemversagenswahrscheinlichkeit	54
5. Versagensarten	57
5.1. Versagen als Druckstab	58
5.2. Versagen als Zugstab	60
5.3. Versagen durch Abscheren der Verbindungsmittel	60
5.4. Versagen durch Lochleibung	61
5.5. Versagen eines Druckstabes im Diagonalkreuz	61
6. Versagenswahrscheinlichkeit einer Komponente	65
6.1. Grenzzustandsfunktion	65

6.2. Berechnungsmethoden	67
6.3. Standardisierung der Variablen	70
6.4. Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung (FORM)	71
6.5. Zuverlässigkeitsmethode zweiter Ordnung (SORM)	72
7. Versagenswahrscheinlichkeit des Systems	76
7.1. Relevanz von Komponenten	76
7.2. Logisches Modell	83
7.2.1. Parallelsystem	84
7.2.2. Kettensystem	87
7.3. Systemversagenswahrscheinlichkeit des Kettenmodells	88
7.3.1. Elementare Schranken	89
7.3.2. Rackwitz-Schranken	90
7.3.3. Ditlevsen-Schranken	92
8. Beispiel	96
8.1. System und Belastung	96
8.2. Ermittlung relevanter Komponenten	96
8.3. Lösungsverbesserung nach Zuverlässigkeitstheorie zweiter Ordnung	104
8.4. Systemversagenswahrscheinlichkeit der Erdseilstütze	107
9. Zuverlässigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit der Normepoche	111
9.1. Sicherheitskonzept	113
9.2. Stabilitätsnachweis	114
9.3. Zugstabnachweis	115
9.4. Abschernachweis	116
9.5. Lochleibungsnachweis	116
9.6. Windlastannahmen	116
9.7. Eislastannahmen	119
9.8. Annahmen für unplanmäßige Horizontalzugbelastung in Leitungsrichtung	120
9.9. Annahmen für die Untersuchungen	121
9.10. Ergebnisse der Untersuchungen	128
9.11. Auswertung	143
10. Zusammenfassung	146
Literaturverzeichnis	148
A. Anhang	155
A.1. Ergänzung zu Abschnitt 5.1	155
A.2. Ergänzung zu Abschnitt 9.10	157

Notationen

Mathematische Symbole

$\bar{}$	Mittelwert einer Variablen
$\tilde{}$	Medianwert einer Variablen
$\hat{}$	Modalwert einer Variablen
$\dots(\dots)$	Funktion in Abhängigkeit der Variablen (\dots)
$\dots[\dots]$	Funktion mit den Parametern $[\dots]$
$\begin{pmatrix} \dots \end{pmatrix}$	Matrix oder Vektor
$\begin{pmatrix} \dots \end{pmatrix}^T$	Transponierte einer Matrix oder eines Vektors
$\begin{pmatrix} \dots \end{pmatrix}$	Matrix nach Streichung der ersten Zeile und der ersten Spalte
$ \dots $	Betrag einer Zahl
$\ \dots\ $	Norm eines Vektors
∇	Nablaoperator, HAMILTONscher Differenzial-Operator
\cup	Vereinigung von Mengen
\cap	Durchschnitt von Mengen
$\det(\dots)$	Determinante einer Matrix
$\exp(\dots)$	Exponentialfunktion
$\Phi(\dots)$	Summenfunktion der standardisierten Normalverteilung
$\Phi_2(\dots, \dots; \dots)$	Summenfunktion der standardisierten Binormalverteilung
$\phi(\dots)$	Verteilungsdichtefunktion der standardisierten Normalverteilung
$\ln(\dots)$	natürlicher Logarithmus
$\max(\dots)$	Maximum
$\min(\dots)$	Minimum

Lateinische Buchstaben

A	Querschnittsfläche
A_{WI}	Windangriffsfläche des Isolators
AE_{WI}	Vergößerung Windangriffsfläche des Isolators infolge Vereisung
a_{GS}	Seilgewichtsanteil
\underline{B}	Matrix der zweiten und gemischten Ableitungen
\underline{C}	Matrix der Kovarianzen
C_{XC}	Staudruckbeiwert des Seiles
C_{XI}	Staudruckbeiwert des Isolators
\underline{D}	Transformationsmatrix
d	Durchmesser
E	Elastizitätsmodul

E_I	Eislast des Isolators
El	Elementnummer
EK	Einwirkungskombinationsnummer
e	Eisbehang des Bezugsseiles im Originalraum der Variablen
es	Eisbehang des Seiles
FX	Vervielfachungsfaktor einer Kraft in X-Richtung
FY	Vervielfachungsfaktor einer Kraft in Y-Richtung
FZ	Vervielfachungsfaktor einer Kraft in Z-Richtung
$f_{(...)}$	Verteilungsdichtefunktion
f_y	Streckgrenze des Profilwerkstoffs im Originalraum der Variablen
f_u	Zugfestigkeit des Profilwerkstoffs im Originalraum der Variablen
f_{ua}	Produkt aus Beiwert α_a und Zugfestigkeit f_{ub} des Verbindungsmittels im Originalraum der Variablen
f_{ul}	Produkt aus Beiwert α_l und Zugfestigkeit f_u des Profilwerkstoffs im Originalraum der Variablen
G_I	Eigengewicht des Isolators
G_{XC}	Reaktionsbeiwert des Seiles
$g_{(...)}$	Grenzzustandsfunktion
g_S	Eigengewicht des Seiles
H	horizontale Komponente des Seilzuges
h_I	Aufhängehöhe des Isolators, vertikaler Abstand zwischen Traversenuntergurt und Seil
h_{Ur}	Höhe des Koordinatenursprungs über Erdoberkante
i	Variablenzähler
i_{kg}	Index für ankommendes ($i_{kg} = 1$) oder abgehendes ($i_{kg} = 2$) Seil
j	Komponentenzähler
k	Komponentenanzahl
L	Spannweite
LF	Lastfallnummer einer normierten Last
N	Stabkraft unter normierten Lasten
n	Variablenanzahl
n_{TL}	Teilleiteranzahl
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit
q_S	Streckenlast des über das Eigengewicht hinaus belasteten Seiles
\underline{R}	Matrix der Korrelationskoeffizienten
S	Stabkraft
SP	Seilplatznummer
T	Temperatur
T_{NW}	Nachweistyp
$u_{(...)}$	Variable (...) im standardisierten Raum
V	Variationskoeffizient
v	Windgeschwindigkeit im Originalraum der Variablen
$v_{(...)}$	Variable (...) im transformierten Raum
w_S	Streckenlast des Windes auf das Seil
x	X-Koordinate
y	Y-Koordinate
z	Z-Koordinate

Griechische Buchstaben

$\alpha(\dots)$	Sensitivität der Variable (...)
$\alpha[EI]$	elementabhängiger Parameter zur Berechnung des Abminderungsfaktors $\kappa[EI]$
α_{th}	Temperaturausdehnungskoeffizient
β	Zuverlässigkeitsindex
$\gamma(\dots)$	Schiefekoeffizient der Variable (...)
η_I	Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in Isolatorhöhe und in 10 m Höhe
η_S	Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in Seilhöhe und in 10 m Höhe
$\kappa[EI]$	elementabhängiger Abminderungsfaktor der Streckgrenze
$\kappa(\dots)$	Hauptkrümmung der Grenzzustandsfunktion in Abhängigkeit der Variable (...)
$\lambda[EI]$	elementabhängiger Schlankheitsgrad
$\lambda_a[EI]$	elementabhängiger Bezugsschlankheitsgrad
$\mu\dots$	Mittelwert einer Variable
ν_k	Schrittweitenverkleinerungsfaktor
ρ	Dichte
$\rho\dots\dots$	Korrelationskoeffizient zwischen Variablen oder Grenzzustandsfunktionen
σ	mechanische Spannung
$\sigma\dots$	Standardabweichung einer Variable
ω_{LR}	Leistungsrichtung
ω_S	Seilwinkel, die X-Richtung entspricht 0° , von oben gesehen ist der Uhrzeigersinn positiv
$\omega_{WR}[EK]$	Windrichtung, abhängig von der Einwirkungskombination
ξ_I	Verhältnis des Eisbehangs des Isolators zum Eisbehang des Bezugsseils
ξ_S	Verhältnis des Eisbehangs des Seiles zum Eisbehang des Bezugsseils
$\Psi_E[EK]$	Eisskalierungsfaktor, abhängig von der Einwirkungskombination
$\Psi_W[EK]$	Windskalierungsfaktor, abhängig von der Einwirkungskombination
ζ_E	Abminderungsfaktor der Eislast
ζ_H	Abminderungsfaktor des Horizontalzuges

Indizes

tiefgestellt

0	Ausgangszustand
<i>eff</i>	Effektivwert
<i>EI</i>	Eisgewicht des Isolators
<i>ES</i>	Eisgewicht des Seiles
<i>GI</i>	Gewicht des Isolators
<i>GK</i>	Gewicht der Konstruktion
<i>GS</i>	Gewicht des Seiles
<i>HS</i>	Horizontalzug des Seiles
<i>id</i>	ideell

<i>MZ</i>	Mittelzug unter Eigengewicht des Seiles bei +10°C
<i>Ne</i>	Nettowert
<i>Syst</i>	systembezogene Angabe
<i>WI</i>	Wind auf Isolator
<i>WK</i>	Wind auf Konstruktion
<i>WS</i>	Wind auf Seil

Die abweichende Verwendung von Variablenbezeichnungen wird im Text beschrieben.