

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
11. November 2010 (11.11.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/128056 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01M 5/00 (2006.01) G01H 13/00 (2006.01)
G01M 7/00 (2006.01) G01N 29/04 (2006.01)

Renato [DE/DE]; Remscheider Str. 37, 42659 Solingen (DE). HORTMANN, Michael [DE/DE]; Glehner Weg 88a, 41464 Neuss (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/056052

(74) Anwalt: GILLE HRABAL STRUCK NEIDLEIN PROP ROOS; Brucknerstr. 20, 40593 Düsseldorf (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
4. Mai 2010 (04.05.2010)

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2009 002 818.8 5. Mai 2009 (05.05.2009) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): MEYER, Axel [DE/DE]; Marwick 20, Bislich, 46487 Wesel-Bislich (DE).

(72) Erfinder; und

(71) Anmelder : SPALTMANN, Horst [DE/DE]; Kormoranweg 7, Blumenkamp, 46487 Wesel-Blumenkamp (DE).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS,

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): ZAHLTEN, Wolfgang [DE/DE]; Osthausstr. 43, 58300 Wetter (DE). EUSANI,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR TESTING THE STABILITY OF A POLE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR PRÜFUNG DER STANDSICHERHEIT EINES MASTES

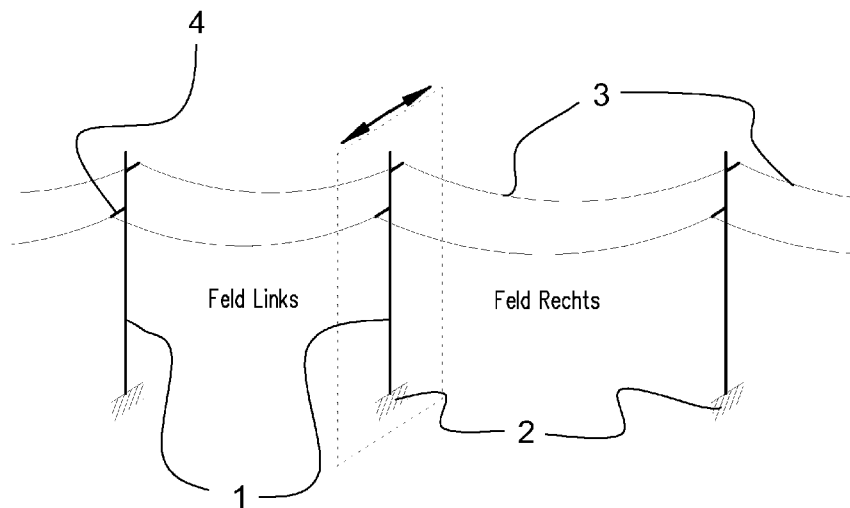


FIG. 1

Feld Links = Left field
Feld Rechts = Right field

(57) Abstract: The invention relates to a method for testing the stability of a pole that stands on a foundation or of a similar upright system. In such a method for testing the stability of an upright system, a characteristic frequency of a pole to be tested is determined. A measure of the stability is determined computationally and/or numerically using the characteristic frequency, and the stability is estimated using the determined measure. A device comprises means to be able to perform such a testing method in an automated manner.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2010/128056 A1



IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden
Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderun-
gen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz
3)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prüfung der Standsicherheit eines auf einem Untergrund stehenden Mastes oder eines ähnlichen stehenden Systems. Bei einem solchen Verfahren für die Prüfung der Standsicherheit eines stehenden Systems wird eine Eigenfrequenz eines zu prüfenden Mastes ermittelt. Mit Hilfe der Eigenfrequenz wird ein Maß für die Standsicherheit rechnerisch und/ oder numerisch ermittelt und anhand des ermittelten Maßes die Standsicherheit beurteilt. Eine Vorrichtung umfasst Mittel, um ein solches Prüfverfahren automatisiert durchführen zu können.

5

Verfahren und Vorrichtung zur Prüfung der Standsicherheit eines Mastes

10

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prüfung der Standsicherheit eines auf einem Untergrund stehenden Mastes oder eines ähnlichen stehenden Systems.

15

Masten werden beispielsweise als Träger von Beleuchtungen (z. B. Flutlichtmasten), Verkehrsschildern, Ampeln, Seilen wie Freileitungen für Strom oder Seile für Seilbahnen (z. B. Hochspannungsmasten, Oberleitungsmasten von Eisenbahnen oder Straßenbahnen) oder Antennen (z. B. Sendemasten für Radio, Fernsehen oder Mobilfunk) eingesetzt. Ein Strommast ist ein beispielsweise aus Holz oder Metall bestehender, im Untergrund verankerter Pfahl oder Pfeiler mit wenigstens einem im oberen Bereich befestigten stromführenden elektrischen Leiter.

25 Vor allem Umwelteinflüsse wie Bodenfeuchtigkeit und Wind oder Vandalismus können einen Mast oder ein ähnliches stehendes System beispielsweise durch Korrosion, Materialermüdung oder Rissbildung beschädigen und die Standsicherheit gefährden. Die Standsicherheit eines Mastes ist daher in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Es ist also festzustellen, ob ein zu
30 überprüfender Mast derart beschädigt ist, dass dieser ausgetauscht werden muss.

Um die Standsicherheit eines Mastes zu prüfen, wird vielfach mit Hilfe eines mobilen Gerätes eine horizontal wirkende Last auf die Masten aufgebracht.
35 Die dabei auftretenden Verschiebungen werden gemessen. Nach dem Entfernen der Last wird anschließend kontrolliert ob der Mast seine Ausgangsposition wieder erreicht hat. Diese Methode ist in vielen Fällen nachteilhaft und nicht zerstörungsfrei da z.B.:

- beschädigte Masten ihre Ausgangsposition nicht mehr erreichen und dann in der Regel schief stehen.
- die aufgebrauchten Lasten höher sind als die tatsächlich möglichen Lasten durch eine Windeinwirkung. Die Masten können dabei durch die Prüflast beschädigt werden, obwohl sie noch standsicher waren.

Schiefstehende oder beschädigte Masten müssen in der Regel sofort ausgetauscht werden, insbesondere dann, wenn die Maste spannungsführende Beseilung tragen. Dies ist für die Betreiber ein erheblicher logistischer Aufwand, der in der Regel kurzfristig zu organisieren ist. Die Prüfmethode mit Lasteinleitung haben weiterhin den Nachteil, dass sie nur Fehler unterhalb der Lasteinleitungsstelle mit prüfen. Fehlerhafte Stellen oberhalb der Lasteinleitung werden hierdurch nicht geprüft.

Eine weitere Methode bei Holzmasten ist das Anbohren der Masten mit Hilfe eines speziellen Bohrgerätes. Dabei wird die Kraft aufgezeichnet, die für einen konstanten Bohrfortschritt erforderlich ist. Nimmt die Kraft ab, lässt dies auf schadhafte Stellen innerhalb des Holzquerschnittes schließen. Diese Methode hat ebenfalls verschiedene Nachteile:

- zunächst ist die Methode nicht zerstörungsfrei;
- da in der Regel nur am Fuß gebohrt wird, können Aussagen auch nur für diesen Bereich gemacht werden. Streng genommen ist nur die Bohrstelle selbst bewertbar. Eine Aussage zum Verhalten des Fundamentes als Ganzes ist nicht möglich.

Eine aufwändige Methode ist das Prüfen mit Hilfe spezieller Ultraschallgeräte. Diese Prüfung ist zunächst einmal diskret, d.h. es wird immer nur eine bestimmte Messstelle bzw. ein bestimmter Querschnitt geprüft. Um ein ganzheitliches Bild zu erlangen, müssen die Messungen an verschiedenen Stellen des Mastes durchgeführt werden. Dies ist relativ aufwändig. Es kann nur darauf geschlossen werden, ob die geprüften Stellen einen Schaden aufweisen oder nicht. Eine direkte statische Bewertung ist nicht möglich.

Verfahren zur Prüfung der Standsicherheit eines Mastes, gemäß denen ein Mast statisch belastet wird, sind beispielsweise aus den Druckschriften DE-OS 15 73 752 sowie EP 0638 794 B1 bekannt. Maß für die Standsicherheit ist gemäß diesen Druckschriften die Auslenkung eines Mastes bei einer vorgegebenen Kraft, mit der ein Mast beaufschlagt wird.

Die DE 29910833 U betrifft eine mobile Prüfeinheit zum Messen der Standsicherheit eines Mastes bestehend aus einem sich am Erdboden abstützenden und mit dem Mastfuß zu verbindenden Gestells, welches Mittel zum Belasten des Mastes mit einer Prüflast umfasst. Am Gestell ist eine erste Messeinheit zur Kontrolle der durch die Prüflast verursachten Mastauslenkung angebracht. Eine vom Gestell mechanisch unabhängige, zweite Messeinheit dient zum Ermitteln von Bewegungen der ersten Messeinheit. Diese Prüfeinheit ist relativ aufwendig und kann insbesondere nicht leicht zu einem zu prüfenden Mast transportiert werden.

Die Druckschrift DE 10028872 A offenbart ein Verfahren der eingangs genannten Art. Für das Überprüfen der Standsicherheit eines Betonfundamentes eines in Gitterbauweise erstellten Freileitungsmastes wird ein Kraftimpuls auf den Eckstiel ausgeübt und die Reaktion der Umgebung mit Hilfe von seismographischen Sensoren gemessen sowie ausgewertet. Dieses Verfahren kann keine genauen Ergebnisse für unterschiedliche Masttypen liefern.

Darüber hinaus ist bekannt, an einem Mast in einer gewünschten Höhe eine um den Mast rotierende Masse anzubringen. Der Mast wird so in Schwingung versetzt, die ein Maß für die Standsicherheit darstellen sollen. Ein derartiges Verfahren, gemäß dem ein Mast auf diese Weise periodisch mit einer Kraft beaufschlagt wird, ist beispielsweise der DE 103 00 947 A1 zu entnehmen. Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren wird das Schwingverhalten des Mastes ermittelt. Das Schwingverhalten wird anhand verschiedener Kriterien bewertet. Hieraus wird auf die Standsicherheit des untersuchten Mastes geschlossen. Es handelt sich bei einem derartigen Verfahren nachteilhaft ebenfalls um ein relativ ungenaues, nicht standardisiertes Verfahren.

35

Ein derartiges Verfahren ist insbesondere dann ungenau, wenn das Schwingungsverhalten von den Umgebungsbedingungen abhängt. Dies gilt vor allem für einen Mast, der Freileitungen trägt. In Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur verändert sich nämlich der Seildurchhang und damit das Schwingungsverhalten bzw. die Eigenfrequenz eines zu
5 untersuchenden Mastes. Es gibt also Abweichungen im Schwingungsverhalten, die auf jeweils herrschende Umgebungsbedingungen zurückzuführen sind und nicht etwa auf aufgetretene Beschädigungen eines Mastes, die seine Standsicherheit gefährden könnten.

10

Aus der Druckschrift EP1517141A geht ein Verfahren zur Überprüfung der Standsicherheit, insbesondere der Korrosionsbeeinträchtigung von Metallmasten hervor, die teilweise in einen Untergrund eingelassen sind. Der Metallmast wird in Schwingungen versetzt und diese Schwingungen werden
15 mit einer Messvorrichtung gemessen. Die dabei erhaltenen Schwingungsmessdaten werden mit aufgezeichneten Schwingungsmessdaten eines intakten identischen Mastes verglichen. Treten Abweichungen zwischen den erhaltenen und den aufgezeichneten Schwingungsmessdaten auf, so deuten diese Abweichungen auf eine
20 Beeinträchtigung hin. Nachteilhaft muss für jeden neuen Mast das Schwingungsverhalten eines intakten Mastes neu ermittelt werden. Für jeden neuen Mast muss neu festgelegt werden, welche Abweichungen eines Schwingungsverhaltens so sind, dass ein Mast wegen fehlender Standsicherheit ausgetauscht werden muss. Unberücksichtigt bleiben solche
25 Abweichungen des Schwingungsverhaltens, die auf die jeweils herrschenden individuellen Bedingungen zurückzuführen sind. Wiederum handelt es sich um ein nicht standardisiertes, relativ ungenaues Prüfverfahren.

30

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung bereitzustellen, mit denen die Standsicherheit eines Mastes zerstörungsfrei
35 und zuverlässig in praktikabler Weise überprüft werden kann.

Zur Lösung der Aufgabe wird eine Eigenfrequenz eines zu prüfenden Mastes ermittelt. Die ermittelte Eigenfrequenz wird verwendet, um hieraus ein Maß für die Standsicherheit eines Mastes zu ermitteln. In Abhängigkeit von dem
5 aus der Eigenfrequenz ermittelten Maß für die Standsicherheit wird also festgestellt, ob ein Mast hinreichend standsicher ist.

Um eine Eigenfrequenz eines Mastes ermitteln zu können, genügt es, den zu prüfenden Mast geringfügig in Schwingungen zu versetzen und das
10 Schwingungsverhalten mit einem oder mehreren Beschleunigungssensoren aufzuzeichnen. Der Mast muss und soll auch aus unten genannten Gründen keinen starken Belastungen ausgesetzt werden, zumal starke Belastungen den Mast beschädigen könnten. Um Eigenfrequenzen ermitteln zu können, ist es auch nicht erforderlich, einen zu prüfenden Mast in einer exakt
15 definierten, immer identischen Weise in Schwingungen zu versetzen. Es ist häufig noch nicht einmal erforderlich und auch nicht erwünscht, künstlich Mastschwingungen zu erzeugen. Es kann also genügen, die Schwingungen aufzuzeichnen, die beispielsweise aufgrund von natürlichen externen Belastungen wie Wind verursacht werden.

20 Im Unterschied zum Stand der Technik wird mit Hilfe der ermittelten Eigenfrequenz insbesondere die Verschiebung bzw. Auslenkung des Kopfes des Mastes aufgrund von externer Belastung berechnet und/ oder durch ein numerisches Verfahren ermittelt. Mit externer Belastung sind nicht die
25 Gewichte gemeint, die ein Mast ständig bestimmungsgemäß zu tragen hat. Mit externer Belastung ist auch nicht das Eigengewicht des zu prüfenden Mastes gemeint. Eine externe Belastung resultiert insbesondere von einem herrschenden Wind. Wird ein Mast von einer Person bestiegen, so handelt es sich ebenfalls um eine externe Belastung im Sinne der Erfindung.

30 Anhand des Verformungsverhaltens bzw. der Mastauslenkung wird die Standsicherheit beurteilt. Das Verformungsverhalten des Mastes ist ein gut geeignetes Maß, um die Standsicherheit eines Mastes beurteilen zu können. Insbesondere ermöglicht dieses Maß verlässlichere Aussagen zur
35 Standsicherheit im Vergleich zu dem Fall, gemäß dem lediglich das

Schwingungsverhalten oder die Eigenfrequenz selbst als Maß für die Standsicherheit verwendet wird.

5 Daher kann das Verfahren in einfacher Weise und damit praktikabel reproduzierbar durchgeführt werden. Es ist daher möglich, Standsicherheitsprüfungen so durchzuführen, dass die erhaltenen Ergebnisse zuverlässig die tatsächliche Standsicherheit eines Mastes wiedergeben.

10 Eine Eigenfrequenz hängt von der Steifigkeit eines Mastes ab und erlaubt daher eine Beurteilung der Steifigkeit eines Mastes. Die Steifigkeit eines Mastes ist wiederum eine Größe, die es erlaubt, die Auslenkung eines Mastes infolge einer Belastung zu beurteilen. Eine geeignet ermittelte Steifigkeit kann bereits ausreichen, um die Standsicherheit gegenüber dem Stand der
15 Technik verbessert ermitteln zu können. Dies gilt insbesondere dann, wenn aus den zulässigen Verformungen eine Sollsteifigkeit des Systems ermittelt wurde, mit der die geeignet ermittelte Steifigkeit verglichen werden kann. Eine ermittelte Steifigkeit ist insbesondere dann geeignet, wenn diese die zum Zeitpunkt der Messung vorhandene Gesamtsteifigkeit des Systems
20 beschreibt.

Regelmäßig verjüngt sich ein Mast, so zum Beispiel ein aus Holz bestehender Mast (Holzmast) nach oben hin. Ein Mast wie zum Beispiel ein Strommast weist ferner Anbauteile auf. Solche Anbauteile sind im Fall eines
25 Strommastes vor allem Befestigungselemente für elektrische Leitungen. Außerdem wird ein Strommast durch die daran befestigten elektrische Leiter mechanisch belastet. Diese Unterschiede im Vergleich zu einem einfachen, beispielsweise zylinderförmigen Mast wirken sich auf die Eigenfrequenz aus. Eine Eigenfrequenz eines Mastes hängt außerdem davon ab, in welcher
30 Höhe beispielsweise Anbauteile angebracht sind. In einer Ausführungsform der Erfindung fließen daher in die Ermittlung des Verformungsverhaltens (Auslenkung oder Verschiebung des Mastkopfes) solche Systemparameter eines Mastes ein. Damit ist gemeint, dass die Berechnung oder numerische Ermittlung des Verformungsverhaltens auch Systemparameter eines Mastes
35 berücksichtigt. Umfasst eine Berechnung oder numerische Ermittlung des Verformungsverhaltens keine Systemparameter, so fließen in die Ermittlung

des Verformungsverhaltens keine Systemparameter eines Mastes ein.
Systemparameter sind

- Höhe des zu beurteilenden Mastes;
- 5 • Mastdurchmesser sowie hiervon ausgehend die Veränderung des Mastdurchmessers mit zunehmender und/ oder abnehmender Höhe;
- Material des Mastes wie zum Beispiel Holzart (Buche, Eiche, Kiefer usw.), Stahl, Aluminium, Beton usw.;
- Anzahl von Seilen bei Masten mit Beseilung;
- 10 • Seildurchmesser von Seilen bei Masten mit Beseilung;
- Material oder Gewicht von Seilen, soweit vorhanden;
- Seildurchhang bei Masten mit Beseilung am Messtag;
- Höhe von Befestigungspunkten für Anbauten und/ oder Seile (soweit vorhanden);
- 15 • Gewicht von Anbauten wie zum Beispiel Befestigungselemente für elektrische Leiter / Seile;
- E-Modul des Mastes (ergibt sich in der Regel aus dem Material des Mastes – bei Holz wird vorteilhaft die am Messtag herrschende Materialfeuchte berücksichtigt);
- 20 • Abstand zwischen benachbarten Masten, die über eine Beseilung miteinander verbunden sind;
- Position von Zusatzmassen wie Lampen, Isolatoren, Traversen, Antennen, Leitern (um einen Mast besteigen zu können);
- Größe von Zusatzmassen wie Lampen, Isolatoren, Traversen, Antennen, Leitern (um einen Mast erklimmen zu können);
- 25 • Gewicht von Zusatzmassen wie Lampen, Isolatoren, Traversen, Antennen, Leitern (um einen Mast erklimmen zu können);

30 In einer Ausführungsform der Erfindung wird die Auslenkung eines Mastes bzw. ein entsprechendes Maß infolge einer externen Belastung durch Wind etc. unter Berücksichtigung der Lasten ermittelt, die ein Mast zu tragen hat, einschließlich des Eigengewichtes des Mastes. Die vom Mast
35 bestimmungsgemäß zu tragenden Lasten und Massen haben Einfluss auf seine Eigenfrequenzen, so dass die Berücksichtigung dieser Lasten und

Massen dazu beiträgt, verbessert die Standsicherheit beurteilen zu können. Fließen diese Lasten und Massen nicht in die Berechnung oder numerische Ermittlung der Auslenkung ein, so werden diese Lasten und Massen nicht im Sinne der vorliegenden Erfindung berücksichtigt.

5

Eine Eigenfrequenz eines Mastes wird allerdings nicht nur durch Lasten und Massen, mit denen ein Mast ständig belastet ist, beeinflusst, sondern vor allem auch, in welcher Höhe sich die zu tragenden Lasten und Massen befinden. In einer Ausführungsform der Erfindung wird daher die Höhe oder
10 aber die Höhen berücksichtigt, in der sich die von einem zu prüfenden Mast zu tragenden Lasten und Massen befinden, um so weiter verbessert die Standsicherheit eines Mastes beurteilen zu können. Fließen solche Höhen nicht in die Berechnung oder numerische Ermittlung der Auslenkung (Verformung) bzw. eines entsprechenden Maßes ein, so werden diese Höhen
15 nicht im Sinne der vorliegenden Erfindung berücksichtigt.

Die Eigenfrequenz eines Mastes wird außerdem durch die Position und Größe einer vom Mast zu tragenden Masse beeinflusst. Es kommt beispielsweise darauf an, ob eine Masse einen Mast gleichmäßig belastet oder aber
20 ungleichmäßig, weil eine Masse ausschließlich an einer Seite des Mastes befestigt ist. Ist eine Masse ausschließlich seitlich befestigt, so kommt es auch darauf an, wieweit der Massenschwerpunkt seitlich neben der Mastachse liegt. U. a. aus diesem Grund beeinflusst daher auch die Größe und Form einer Masse, also des Gegenstandes, dessen Gewicht betrachtet
25 wird, die Eigenfrequenz. In vergleichbarer Weise spielt auch eine Rolle, wie hoch und / oder wie tief eine Masse ausgehend von einem Befestigungspunkt am Mast reicht. In einer Ausführungsform der Erfindung wird daher auch die Größe und/ oder Form eines solchen Gewichtes berücksichtigt, um so weiter verbessert die Standsicherheit eines Mastes
30 beurteilen zu können.

In einer Ausführungsform der Erfindung werden die von einem Mast zu tragenden Massen einschließlich seines Eigengewichtes, die Höhen, in der
35 sich diese Massen befinden, zu einem Wert zusammengefasst, der nachfolgend generalisierte Masse genannt wird. In die generalisierte Masse

M_{gen} kann außerdem die Position, Form und/ oder Größe von zu tragenden Massen mit einfließen. Diese generalisierte Masse fließt in einer Ausführungsform der Erfindung in die Berechnung oder numerische Ermittlung eines Maß für die Auslenkung ein, um so weiter verbessert die Standsicherheit eines Mastes beurteilen zu können.

Die generalisierte Masse fließt insbesondere wie folgt in die numerische oder rechnerische Ermittlung der gesuchten Auslenkung ein:

10

$$\Omega^2 \sim \frac{1}{\text{generalisierte Masse}}$$

15

mit $\Omega = 2\pi \cdot$ Eigenfrequenz f_e .

Die generalisierte Masse unterscheidet sich von der wiegbaren Masse eines Mastes einschließlich der vom Mast zu tragenden Massen durch eine dynamische Komponente, die die Standsicherheit eines Mastes sowie seine Eigenfrequenzen beeinflussen.

Um eine generalisierte Masse ermitteln zu können, wird beispielsweise zunächst einmal das Gewicht des Mastes nebst der Verteilung des Gewichtes ermittelt. Hierzu wird beispielsweise der Durchmesser des Mastes am unteren Ende oberhalb seiner Verankerung sowie wenigstens der Durchmesser ermittelt, den der Mast an seiner Spitze aufweist. Der Durchmesser an der Mastspitze kann mit Hilfe von Konizitäten aus Tabellen ermittelt werden, in denen typische Abmessungen für Maste vorgegeben sind (z. B. RWE-Richtlinie). Dadurch wird beispielsweise im Fall eines sich homogen verjüngenden Holzmastes das Volumen des Mastes ermittelt. Durch Ermitteln der spezifischen Dichte des Materials, also zum Beispiel des Holzes in Abhängigkeit von der Holzart sowie durch Feuchtigkeitsmessungen am Messtag wird die spezifische Masse des Holzes am Messtag ermittelt. Hieraus wird das am Messtag maßgebliche Gewicht des Holzmastes ermittelt.

Die Anbauteile sind gewichtsmäßig in der Regel bekannt bzw. vom Betreiber der Masten vorgegeben. Diese werden also letzten Endes durch konventionelles Wiegen ermittelt und zwar vor der Befestigung am Mast.

- 5 Es wird darüber hinaus ermittelt, in welcher Höhe die Anbauteile angebracht sind. Dies geschieht durch Längen- bzw. Höhenmessungen.

Vorgegeben und damit bekannt ist das Material sowie der Durchmesser der Seile, die an einem Mast mit Beseilung hängen. Darüber hinaus wird der
10 Abstand zwischen zwei benachbarten Masten ermittelt. Ferner kann eine Temperaturmessung durchgeführt werden. Ausgehend von einem vorbekannten Seildurchhang bei einer vorgegebenen Temperatur kann so berechnet werden, wie stark die Seile zwischen zwei Masten durchhängen und wie stark die Gewichtskraft ist, die auf den Mast aufgrund eines
15 durchhängenden Seils ausgeübt wird. Alternativ wird der Seildurchhang am Messtag direkt gemessen. Die gemessene Temperatur dient dann zur Berechnung des Seildurchhanges bei den Temperaturen, die für die Bewertung maßgebend sind. Mit Hilfe dieses Seildurchhanges werden die Seilkräfte berechnet. Ungünstig können hohe Temperaturen sein, weil dann
20 der Seildurchhang zunimmt, die Seilkräfte kleiner werden und die Rückstellfeder aus der Beseilung ein Minimum annimmt. Bevorzugt wird daher die Prüfung durchgeführt, wenn die herrschende Außentemperatur weniger als 30 °C beträgt. Vorzugsweise beträgt die Außentemperatur dann wenigstens 0°C, um Verfälschungen aufgrund einer Eisbildung zu vermeiden.

25

Es wird dann ermittelt, wie stark ein zu prüfender Mast senkrecht durch Seile belastet wird. Dieser Wert ist temperaturabhängig, da in Abhängigkeit von der Temperatur Seile unterschiedlich stark durchhängen.

30

Ein am Mast befestigtes, durchhängendes Seil wirkt mit einer senkrechten und mit einer horizontalen Kraft auf den Mast ein. Insbesondere werden im Zusammenhang mit Seilen daher auch solche Rückstellkräfte ermittelt, die auf den Mast in horizontaler Richtung einwirken.

35

In einer Ausführungsform der Erfindung werden bei einem Mast mit Beseilung nur solche Auslenkungen als Folge von externen Belastungen als Maß für die Standsicherheit eines Mastes betrachtet, die senkrecht zu einem Seil erfolgen, welches vom Mast getragen wird. Es wurde festgestellt, dass vor
5 allem solche Auslenkungen für die Beurteilung der Standsicherheit von Interesse sind, so dass das Verfahren dann auf diese Betrachtung reduziert werden kann. Die Steifigkeit eines Mastes mit Beseilung in einer Richtung parallel zum Verlauf der Beseilung ist nämlich ca. 50 bis 100 mal höher im Vergleich zu der dazu senkrechten Richtung. Diese Steifigkeit bzw. die
10 entsprechende Auslenkung bei externer Belastung wird daher vorzugsweise nicht ermittelt und somit vernachlässigt.

Die kritische Richtung ist also die vorgenannte zu Seilen senkrechte Richtung. Die Gefährdung der Standsicherheit ergibt sich insbesondere durch Windlast
15 oder durch Mannlast. Die Mannlast spielt eine Rolle, wenn eine Person beispielsweise aus Wartungszwecken auf einen Mast hinaufklettert. Dies geschieht dann in der Regel seitlich einer Beseilung von Masten, so zum Beispiel seitlich von elektrischen Leitern von Strommasten, da andernfalls die betreffende Person nicht bis zu den Seilen heraufklettern kann.

20 Um Eigenschwingungen eines Mastes ermitteln zu können, werden in einer Ausführungsform der Erfindung Beschleunigungssensoren an dem Mast beispielsweise in einer definierten Höhe angebracht. Die genaue Höhe muss allerdings nicht bekannt sein. Die Beschleunigungssensoren müssen lediglich
25 so hoch angebracht werden, dass auftretende Beschleunigungen gemessen werden können. Die Mindesthöhe, in der die Sensoren angebracht werden müssen, hängt daher auch von der Empfindlichkeit der Sensoren ab. Am Mastfuß sind keine Messungen möglich, da hier fast keine Schwingungen auftreten. Als hinreichend hat sich eine Höhe in Brusthöhe einer
30 durchschnittlichen Person herausgestellt. Kommerziell erhältliche Sensoren sind regelmäßig hinreichend empfindlich, um in dieser Höhe Schwingungen mit ausreichender Genauigkeit messen zu können.

Grundsätzlich gilt, dass sich mit zunehmender Höhe der angebrachten
35 Sensoren die Messgenauigkeit verbessert. Allerdings besteht dann das Problem der Anbringung. Um also das Verfahren besonders einfach

durchführen zu können, werden die Sensoren vorzugsweise in einer Höhe angebracht, die von einem Bediener noch problemlos erreicht werden kann. Dadurch werden Zusatzausrüstungen wie Leitern entbehrlich. Gleichzeitig genügt die Messgenauigkeit in dieser Höhe.

5

In einer Ausführungsform der Erfindung werden Beschleunigungssensoren in unterschiedlicher Höhe angebracht, um so genauere Informationen über das Schwingungsverhalten eines Mastes ermitteln zu können. Hierdurch kann weiter verbessert die Standsicherheit eines Mastes beurteilt werden.

10

In einer ersten Ausführungsform der Erfindung wird nach Anbringung der Beschleunigungssensoren abgewartet, bis der Mast aufgrund von Umgebungseinflüssen wie Wind messbar schwingt. Dies reicht in vielen Fällen schon aus, um die gewünschten Eigenschwingungen ermitteln zu können.

15

Sollte dies nicht ausreichen, so wird der Mast künstlich in Schwingungen versetzt. Dies kann in vielen Fällen manuell geschehen, indem ein Bediener entsprechend eine dynamische Kraft auf den Mast aufbringt.

20

In einer Ausführungsform der Erfindung wird beispielsweise mittels eines wiederkehrenden Signals, so zum Beispiel eines Tonsignals signalisiert, wann manuell Kraft auf einen Mast ausgeübt werden soll, um diesen geeignet in Schwingungen zu versetzen. Das Tonsignal erfolgt vorzugsweise so, dass Resonanzschwingungen erzeugt werden, um mit geringer Kraft geeignete Schwingungen zu erzeugen.

25

Der Takt, mit dem eine Kraft auf den Mast ausgeübt werden soll, um eine Eigenschwingung bzw. Resonanzschwingung zu erzeugen, kann aus einer ersten, noch relativ ungenauen Messung ermittelt werden. Eine erste Messung liefert ein Frequenzspektrum. Der erste Peak des Frequenzspektrums gehört zur ersten Eigenfrequenz. Wird der Zeitschrieb des Messsignals mit Hilfe einer Fourier-Analyse in ein Frequenzspektrum umgewandelt, so ergibt sich der Takt eines wiederkehrenden Tonsignals aus der Lage des ersten Peaks.

30

Eine erste Messung erfolgt also in einer Ausführungsform vorzugsweise so, dass kontinuierlich Schwingungen aufgrund von natürlichen Störungen aus der Umgebung gemessen werden. Eine zweite Messung, die als Folge einer

künstlichen Anregung durchgeführt wird, findet vorzugsweise erst ab einer vorgegebenen Mindestbeschleunigung statt. Erst ab dieser Mindestbeschleunigung werden Messwerte aufgezeichnet. Es kann so besonders genau und einfach eine gesuchte Eigenfrequenz ermittelt werden.

In einer Ausführungsform des Verfahrens wird darauf geachtet, dass ein zu prüfender Mast nicht zu stark angeregt wird. Eine zu starke Anregung wird vorzugsweise wiederum mit Hilfe von wenigstens einem Beschleunigungssensor geprüft und beispielsweise mit Hilfe eines Signals angezeigt. Alternativ oder ergänzend werden bei zu starker Anregung Aufzeichnungen des Schwingungsverhaltens automatisiert gestoppt. Es ist nämlich von Vorteil, den quasistatischen Fall zu betrachten. Es ist nämlich zwischen der quasistatischen und der dynamischen Steifigkeit zu unterscheiden. Wird ein Mast zu schnellen Schwingungen angeregt, so ist die effektive Bodensteifigkeit sehr viel größer im Vergleich zum quasistatischen Fall. Physikalischer Hintergrund ist, dass aufgrund der Massenträgheit und des Strömungswiderstandes in den Bodenporen im dynamischen Fall das Wasser im Bodenbereich nicht schnell genug verdrängt werden kann. Hierdurch ergibt sich eine sehr viel größere Bodensteifigkeit im Vergleich zum quasistatischen Fall. Im quasistatischen Fall wird das Wasser verdrängt und so eine sehr viel geringere Steifigkeit im quasistatischen Fall erzielt. Für die Beurteilung der Standsicherheit ist der quasistatische Fall besonders relevant.

Das Verfahren wird daher vorteilhaft nur mit kleinen Anregungen durchgeführt und zwar auch dann, wenn unter Stabilitätsgesichtspunkten deutlich größere Schwingungsfrequenzen möglich wären.

In einer Ausführungsform der Erfindung wird der Mast daher durch eine Belastung angeregt, die zwischen 1 bis 10% der vorgesehenen maximalen Last liegt, die auf einen solchen Mast ausgeübt werden kann bzw. darf.

Eine zweite Messung, die darauf basiert, dass der Mast zuvor künstlich angeregt wurde, dient dazu, eine Eigenfrequenz genauer ermitteln zu

können. Je mehr Messungen durchgeführt werden, umso geringer ist eine Messungengenauigkeit in Bezug auf eine gesuchte Eigenfrequenz.

Dennoch kann das Verfahren bereits mit einer Messung erfolgreich durchgeführt werden. Es muss dann lediglich eine größere Ungenauigkeit in Kauf genommen werden. Werden Beschleunigungen mehrfach auf verschiedene Weise gemessen, so ergibt sich daraus also lediglich eine genauere Ermittlung der gesuchten Eigenfrequenz. Grundsätzlich wird das Verfahren dadurch jedoch nicht verändert.

10

In einer Ausführungsform der Erfindung wird ein geeignetes Maß für die Standsicherheit unter Verwendung der Beziehung

$$\Omega^2 \sim C_{\text{gen}}$$

15

ermittelt. Vorzugsweise wird ein geeignetes Maß für die Standsicherheit unter Verwendung der Gleichung

20

$$\Omega^2 = \frac{C_{\text{gen}}}{\text{generalisierte Masse}}$$

ermittelt.

C_{gen} ist ein Steifigkeitsmaß, welches bereits als Maß verwendet werden kann, um eine Standsicherheit verbessert beurteilen zu können.

30

35

$$C_{\text{gen}} = \left(\frac{1}{\text{Drehsteifigkeit}} + \frac{1}{\text{Biegesteifigkeit}} \right)^{-1} + \text{Seilsteifigkeit}$$

40

Von besonderem Interesse ist die Drehsteifigkeit des Mastes, um die Standsicherheit eines Mastes beurteilen zu können. Diese berücksichtigt bei Messung mit einem Sensor alle Abweichungen gegenüber einem nicht geschädigten System.

5

Die Seilsteifigkeit bezieht sich auf die Seile, die von einem Mast mit Beseilung getragen werden. Die Seilsteifigkeit C_s wird aus der Rückstellkraft ermittelt, die sich bei Auslenkung eines Mastes ergibt. Genauere Ausführungen dazu werden unten beschrieben.

10

Um die Biegesteifigkeit eines zu prüfenden Mastes zu ermitteln, wird vor allem auch die Mastlänge ermittelt und berücksichtigt. Es ist zu unterscheiden zwischen der Gesamtlänge des Mastes und der Länge, die gegenüber der Geländeoberkante hervorragt. Bei der Ermittlung der Biegesteifigkeit spielt die Länge eine Rolle, die gegenüber dem Gelände hervorragt. Diese Länge wird daher zum Beispiel gemessen.

20

Sind Biegesteifigkeiten und erforderlichenfalls die Seilsteifigkeit ermittelt worden, so kann die Drehsteifigkeit berechnet werden. Vor allem die Drehsteifigkeit erlaubt eine Aussage darüber, wie die Standsicherheit eines Mastes zu beurteilen ist.

25

In einer Ausführungsform der Erfindung wird auf der Grundlage einer ermittelten Maststeifigkeit, insbesondere der Drehsteifigkeit eines zu prüfenden Mastes beispielsweise durch Simulation oder Rechnung ermittelt, wie stark sich der Mast aufgrund einer Windlast, insbesondere aufgrund einer maximal möglichen bzw. vorgesehenen Windlast verformen würde.

30

Insbesondere wird die dadurch bewirkte Verschiebung des Mastkopfes (nachfolgend „Kopfpunktverschiebung“ genannt) betrachtet. Diese Verformung oder Verschiebung ist ein besonders gut geeignetes Maß, um die Standsicherheit beurteilen zu können. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass sämtliche Fehler, die die Standsicherheit in Frage stellen können, bereits in der ermittelten Information „Kopfpunktverschiebung“ enthalten

35

sind. Es hat sich herausgestellt, dass es daher nicht erforderlich ist genau festzustellen, wo der Fehler liegt, also beispielsweise in welcher Höhe.

Überraschend wurde festgestellt, dass die Kopfpunktverschiebung bereits Informationen über Fehler enthält, die sich oberhalb der

5 Beschleunigungssensoren befinden. Es lässt sich daher ableiten, ob die Standfestigkeit eines Mastes hinreichend gegeben ist. Überschreitet eine simulierte oder berechnete Verschiebung eines Mastkopfes einen vorgegebenen Grenzwert, so muss ein Mast ausgetauscht werden. Vorzugsweise gibt es mehrere verschiedene vorgegebene Grenzwerte, die
10 den Grad der Gefährdung charakterisieren. So kann die Überschreitung eines höchsten vorgegebenen Grenzwertes bedeuten, dass ein Mast sofort ausgetauscht werden muss. Die Überschreitung eines darunter liegenden vorgegebenen Wertes kann bedeuten, dass ein Mast innerhalb eines festgelegten Zeitraums ausgetauscht werden muss.

15

Die Einstufung in Klassen orientiert sich in einer Ausführungsform der Erfindung an den Klassen, die in EN 40-3-3 in Tabelle 3 angegeben sind. Die EN 40-3-2:2000 verlangt, dass die Verformung an der Mastspitze in eine der
20 Klassen fällt, die in Tabelle 3 der EN 40-3-3 angegeben sind (EN 40-3-2:2000, Abschnitt 5.2, Absatz b)). Das heißt: Ist die Verformung größer als die Verformung der Klasse 3, gilt der Mast sofort als nicht mehr zulässig. Im Rahmen der Bewertung wird diese Verformungsgrenze deshalb zweckmäßig als größter zulässiger Wert interpretiert. Die EN 40 gestattet es jedem Land
25 festzulegen, welche Klasse die Masten national mindestens erfüllen müssen (EN 40-3-3:2000, Anhang B, Absatz B.2). Im Rahmen der erfindungsgemäß vorgeschlagenen Bewertung wird davon ausgegangen, dass in Deutschland immer Klasse 1 Masten gesetzt werden müssen. Das heißt: Sind die Verformungen an der Mastspitze kleiner oder gleich den Grenzwerten für
30 Klasse 1 in Tabelle 3 aus EN 40-3-3, so gilt der Mast als in Ordnung. Die Grenzwerte der Klassen 2 und 3 werden in einer Ausführungsform erfindungsgemäß benutzt, um eine verfeinerte Bewertung abgeben zu können. Das heißt, ein Mast, der Verformungen für Klasse 2 oder 3 aufweist, ist gegenüber dem Einbauzustand (Klasse 1) negativ verändert. Diese
35 Veränderung stellt erfindungsgemäß eine Verminderung der Standsicherheit dar. Masten, die Verformungen kleiner als die Grenzwerte der Klasse 3

aufweisen, sind immer standsicher. Bei Klasse 2 und 3 Masten ist aber eine Veränderung eingetreten, die grundsätzlich das Ergebnis eines zeitabhängigen Prozesses ist. Die Masteigenschaften werden sich entsprechend kontinuierlich weiter verändern. Hieraus wurden dann
5 empirisch und zwar vor allem für Holzmasten erfindungsgemäß folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Klasse 1: Mast ist uneingeschränkt in Ordnung
- Klasse 2: nicht mehr besteigbar, aber noch standsicher
- 10 Klasse 3: nicht besteigbar, bedingt standsicher, muss innerhalb von 3 Monaten ausgetauscht werden
- >Klasse 3: nicht mehr standsicher, muss sofort ausgetauscht werden.

Es wird weiterhin unterstellt, dass die Verformungen direkt auch mit den
15 zugehörigen Grenzlasten korrelieren. Das heißt: Ein Mast mit großen Kopfpunktverformungen besitzt eine kleinere Grenzlast als ein Mast mit kleinen Kopfpunktverformungen. Geht man von einer durchschnittlichen Überfestigkeit von 7% aus und unterstellt man, dass nur Klasse A Masten gemäß Tabelle 1 aus EN 40-3-3:2000 verwendet werden dürfen, so muss
20 nach EN 40-3-2:2000 die kleinste Grenzlast mindestens ca. 1,5 mal so groß sein wie die Prüflast (charakteristische Last z.B. infolge Wind). Diese Bedingung gilt für alle Mastklassen. Da die Prüflasten aber für alle Lasten gleich sind heißt das, die Grenzlast für die Klasse 3 ist ca. 1,5 mal Prüflast und für die anderen Klassen ist die Grenzlast mindestens genauso groß, in
25 der Regel sogar größer. Dieser Zusammenhang ist in Figur 17 dargestellt. Gezeigt wird ein schematischer Zusammenhang zwischen Verformungen und Grenzlasten mit Klassen nach EN 40. Die genaue Bruchlast (Grenzlast) wird durch das Verfahren nicht festgestellt. Die Bewertung der Standsicherheit liegt aber auf der sicheren Seite.

30

In einer Ausführungsform der Erfindung wird ermittelt, wie sich ein Mast in verschiedenen Höhe unter einer simulierten Windbelastung verschieben würde. Auch dann können zu jeder Höhe vorgegebene Grenzwerte
35 festgelegt worden sein, um die Gefährdung eines Mastes weiter verbessert beurteilen zu können.

Beispielsweise bei Lichtmasten gibt es von Anfang an bekannte vorgegebene Grenzwerte für Mastauslenkungen, die nicht überschritten werden dürfen. Diese haben allerdings in vielen Fällen nichts mit der Standsicherheit, sondern mit Gebrauchsüberlegungen zu tun. Dennoch können solche Grenzwerte auch für die Beurteilung der Standsicherheit herangezogen werden.

In gleicher Weise kann eine Mastverformung aufgrund einer Mannlast betrachtet werden, um so die Standsicherheit beurteilen zu können.

Zur Durchführung des Verfahrens wird eine Prüfvorrichtung bereitgestellt, die über Eingabemittel wie eine Tastatur oder Mittel zur Spracherkennung und über Ausgabemittel wie zum Beispiel einen Bildschirm und/ oder Lautsprecher verfügt. Die Vorrichtung umfasst Mittel, um Schwingungen messen und insbesondere auch aufzeichnen zu können. Die Vorrichtung kann Sensoren umfassen, um die Feuchtigkeit eines Materials messen zu können, aus dem ein zu prüfender Mast besteht. Die Vorrichtung kann einen Temperatursensor umfassen, um die am Messtag herrschende Außentemperatur ermitteln zu können. Die Vorrichtung kann einen GPS-Empfänger oder dergleichen umfassen, um die Position während einer Messung ermitteln zu können. Über die beispielsweise per GPS automatisiert ermittelte Position kann automatisiert aufgezeichnet werden, welcher Mast mit welchem Ergebnis geprüft wurde. Irrtümer können so minimiert werden. In einer Ausführungsform werden die per GPS ermittelten Koordinaten verwendet, um automatisiert die Mastabstände bzw. Feldlängen ohne weitere Abstandsmessungen zu erfassen. Die Vorrichtung kann drahtlose Kommunikationsmittel umfassen, um online gesuchte Daten bzw. Systemparameter zu erhalten, die von einem Betreiber eines Mastes bereitgestellt werden. Dies kann wiederum automatisiert unter Berücksichtigung des automatisiert ermittelten Standortes der Vorrichtung geschehen. Darüber hinaus benötigte Informationen bzw. Systemparameter können über Eingabemittel wie zum Beispiel einer Tastatur in die Vorrichtung eingegeben werden. Die Vorrichtung ist in einer Ausgestaltung darüber hinaus so eingerichtet, dass mittels der Vorrichtung an den jeweiligen

Betreiber des untersuchten Mastes die ermittelten Prüfungsergebnisse automatisiert weitergeleitet werden, so dass beispielsweise entsprechende Datenbanken automatisiert aktuelle Informationen zur Standsicherheit erhalten. Ergänzend oder alternativ kann die Vorrichtung ein

5 Prüfungsergebnis über ein Ausgabemittel wie Bildschirm oder Drucker zur Verfügung stellen. Die Vorrichtung umfasst insbesondere eine so programmierte Recheneinheit, dass nach Eingabe der benötigten Eingangsinformationen automatisiert ein gesuchtes Maß für die Standsicherheit ermittelt wird. Die Vorrichtung umfasst in einer

10 Ausführungsform der Erfindung einen Taktgeber zur Vorgabe eines Taktes, mit der ein Mast zu Schwingungen angeregt werden soll. Darüber hinaus umfasst die Vorrichtung in einer Ausführungsform einen Zähler, der die Zahl der Anwendungsfälle registriert, Wartungsintervalle festzulegen oder aber um ein Abrechnungsmodell zu ermöglichen, gemäß dem pro Anwendung eine

15 Gebühr zu entrichten ist. In der Vorrichtung sind in einer Ausführungsform der Erfindung ein unterer und/ oder ein oberer Grenzwert gespeichert oder vorgesehen, um in Abhängigkeit vom unteren Grenzwert eine Aufzeichnung von Schwingungen zu starten bzw. in Abhängigkeit vom oberen Grenzwert die Aufzeichnung zu stoppen.

20 In einer Ausführungsform sind Grenzwerte für die angeregte Beschleunigung in der Vorrichtung gespeichert, die dazu genutzt werden, um bei zu großen Anregungsamplituden warnen zu können. Diese Warnung erfolgt über einen Warnton, der über den gleichen Lautsprecher ausgegeben wird wie das

25 Taktsignal.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung umfasst die Vorrichtung Mittel für die Berechnung einer spezifischen unteren und oberen Schranke für die zu messende Eigenfrequenz. Diese Grenzen werden in den Spektren

30 durch die Vorrichtung beispielsweise auf einem Bildschirm dargestellt, so dass der Anwender die Möglichkeit hat, das gemessene Ergebnis auf Plausibilität zu prüfen. Hierdurch werden Fehler vermieden.

35

Die Erfindung ermöglicht ein zerstörungsfreies Prüfverfahren mit Hilfe von Schwingungsmessungen, um die Standsicherheit von Masten bewerten zu können. Das Ergebnis des Verfahrens ist ein Parameter oder Maß, mit dem entschieden werden kann, ob die Standsicherheit des Mastes gegeben ist.

5 Für diese Bewertung werden in Ausführungsformen der Erfindung unter anderem Kriterien wie die Kopfpunktverschiebung des Mastes infolge Horizontallasten (Wind) und Vertikallasten (Mannlasten) und/oder die Verdrehung des Fundaments berücksichtigt.

10 Durch eine aufwändigere Messtechnik (mit mehr Sensoren) kann durch die vorliegende Erfindung auch auf die statisch relevanten Querschnittswerte (Fläche und Trägheitsmoment) geschlossen werden. In diesem Fall sind auch Spannungsnachweise möglich und sinnvoll, da diese dann für die Restquerschnitte geführt werden.

15 Die Erfindung ist universell für Masten aus verschiedenen Materialien einsetzbar sein. Hierzu zählen z. B.:

- Holzmaste z.B. als Freileitungsmaste im Nieder- und Mittelspannungsbereich oder für Telefonleitungen
- 20 Stahlmaste z.B. als Lampen-, Antennen-, Verkehrszeichen- oder Ampelmasten
- Aluminiummaste z.B. als Lampen-, Antennen-, Verkehrszeichen- oder Ampelmasten

Die Masten können verschiedene Querschnitte haben, z.B.:

- Vollquerschnitt
- 25 - Kreisringquerschnitt
- polygonartige Querschnitte (z.B. 6-Eck, 8-eck)
- abgestufter Querschnittsverlauf
- konischer Querschnittsverlauf.

Das erfindungsgemäße Prüfverfahren ist unabhängig von der jeweiligen Querschnittsform verwendbar.

Durch die Erfindung können vor allem auch Anbauteile wie z.B. Lampen, Verkehrsschilder, Isolatoren, Traversen oder Seile, die durch ihre Masse und Trägheitsmomente die Eigenfrequenzen der Maste beeinflussen, rechnerisch
5 berücksichtigt werden.

Weiterhin ist es durch die Erfindung möglich, die Rückstellkräfte durch evtl. vorhandene Beseilung (bei Freileitungsmasten) oder Abspannungen berücksichtigen zu können, da hierdurch die Gesamtsteifigkeit des Systems
10 beeinflusst wird.

Die nachfolgend angegebenen Ausführungen verdeutlichen Ausführungsformen der Erfindung und zielen zunächst auf eine analytische Lösung ab. Das Prinzip des Verfahrens kann so leichter erläutert werden. Von
15 der analytischen Lösung kann allerdings auch durch numerische Verfahren abgewichen werden, so zum Beispiel bei der Bestimmung der Schwingungsform. Außerdem kann z.B. die Drehfedersteifigkeit durch ein Iterationsverfahren bestimmt werden. Vor allem diese genannten Abweichungen von einer analytischen Lösung tragen zu einer Erhöhung der
20 Genauigkeit bei. Außerdem erleichtern diese Abweichungen die universelle Einsetzbarkeit des Verfahrens.

Die nachfolgenden grundlegenden Erläuterungen werden für einfache Tagmaste oder Lampenmaste vorgestellt. Das zugrunde liegende Prinzip ist in gleicher Weise auch für andere Masttypen verwendbar.
25

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die wesentlichen, verwendeten Variablen und Parameter.

30

Geometrie eines Mastes			
	Masthöhe über Geländeoberkante (GOK)	H	[m]
	Mastdurchmesser unten	d_u	[m]
	Mastdurchmesser oben	d_o	[m]
	Konizität	α	[-]
	Querschnitt unten	A_u	[m ²]
	Querschnitt oben	A_o	[m ²]
	Trägheitsmoment unten	I_u	[m ⁴]
	Trägheitsmoment oben	I_o	[m ⁴]
Mast			
	Masttyp	A, T	[-]
	Typ des Holzes	Kiefer (KI) Lärche (LA)	[-]
	Feuchtigkeit des Holzes (an Sensorposition und am Fuß!), zusätzlich Höhe Sensor über GOK für die Durchführung des Beispiels erforderlich	f_h	[%]
	Mastbiegesteifigkeit	C_B	[N/m]
	Mastrotationsteifigkeit	C_φ	[N/m]
	Gesamsteifigkeit	C_{Gesamt}	[N/m]
	generalisierte Masse infolge Biegung	$M_{gen,Mast,Bieg}$	[kg]
	generalisierte Masse infolge Verdrehung	$M_{gen,Mast,Rot}$	[kg]
	generalisierte Masse Mischanteil	$M_{gen,Mast,Misch}$	[kg]
	generalisierte Masse Gesamt	$M_{gen,Mast,gesamt}$	[kg]
Leitung bei Mast mit Beseilung			
	Feldlänge (Abstand zum nächsten Mast auf der linken Seite)	L_L	[m]
	Feldlänge (Abstand zum nächsten Mast auf der rechten Seite)	L_R	[m]
	Anzahl der Seile bzw. Isolatoren	n	[-]
	Höhe der untersten Leitung	h_l	[m]
	Leitungstyp	Stahl-Alu, Stahl	[-]
	Leitungsquerschnitt	$A_{L,u}$	[m ²]

	Leitungsdurchhang (Links)	d_L	[m]
	Leitungsdurchhang (Rechts)	d_R	[m]
	Leitermasse pro Länge (Links)	ρ_L	[kg/m]
	Leitermasse pro Länge (Rechts)	ρ_R	[kg/m]
	Leitermasse	M_L	[kg]
	generalisierte Masse der Leiter	$M_{gen,Leitung,gesamt}$	[kg]
	Isolatormasse	M_I	[kg]
	Vertikalabstand der Isolatoren (ggf. Horizontalabstand der Isolatoren erforderlich)	s	[m]
	Dichte Leiter	ρ_L	[kg/m ³]
	Seilfaktor	β	[-]
	E-Modul Leiter	E_L	[kN/cm ²]
	Horizontalkraft-Kraft aus dem Seil	H	[N]
	Längssteifigkeit des Seils (E-Modul*Querschnittsfläche/Seillänge)	EA/L	[N/m]
	Steifigkeit senkrecht zur Leiterebene CL für eine einzige Leitung	C_L	[N/m]
	Steifigkeit senkrecht zur Leiterebene	$C_{L,Gesamt}$	[N/m]
	Steifigkeit in der Leiterebene CLS	C_{LS}	[N/m]
Messung			
	Temperatur (am Messtag)	T	[C]
	gemessene Eigenfrequenz (am Messtag)	f_{gem}	[Hz]
	Höhe des Lastangriffspunkt der Seilkraft über GOK	h_1	[m]
	Hebelarm der Exzentrizität der Vertikallast V bezogen auf die Mastachse	h_V	[m]
zulässige Verformung			[-]
	Zulässige Verformung für Klasse 1	$d_{zul,1}$	[m]
	Zulässige Verformung für Klasse 2	$d_{zul,2}$	[m]
	Zulässige Verformung für Klasse 3	$d_{zul,3}$	[m]

Ziel ist es die Verschiebung der Mastspitze in senkrechter Richtung zur Leiterebene (falls vorhanden) infolge Horizontal- und Vertikallasten zu ermitteln. Um das System zu vereinfachen muss zuerst die Gesamtsteifigkeit berechnet werden. Es gibt mindestens drei Komponenten, nämlich:

- 5 1. die Mastbiegesteifigkeit
2. die Mastrotationssteifigkeit
3. die Leitersteifigkeit
4. (zusätzlich ggf. Abspannungen oder Hausanschlüsse etc.)

10 Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze mit Masten 1, die im Untergrund 2 verankert sind. Die Masten tragen Seile bzw. Stromleiter 3. Die Stromleiter 3 sind mit Hilfe von Isolatoren 4 an den Masten 1 befestigt.

Sind Abspannungen vorhanden, so werden diese ebenfalls berücksichtigt.
15 Dies ist ein Sonderfall, der nachfolgend nicht näher behandelt wird.

Es ist möglich, auch Masten zu bewerten die durch Hoch- oder Tiefzug beansprucht werden. Weiterhin können Masten berechnet werden, die an Knickstellen von Leitertrassen stehen. Die Rückstellkräfte aus den Leiterseilen werden dazu im Programm entsprechende angepasst. Damit ergeben sich
20 dann die korrekten zugehörigen Steifigkeiten aus den Seilen. Die Figuren 2a und 2b zeigen schematisch die angesprochenen Situationen, also die Geometrie bei Hoch- oder Tiefzug und bei Masten an Knicken in Leitertrassen. Die Berechnung dieser Steifigkeiten wird nachfolgend allerdings nicht näher erläutert.

25 Die Steifigkeit hängt zudem von den Materialeigenschaften ab. Aus diesem Grund werden bei Holzmasten zusätzlich die Feuchte des Materials und die Umgebungstemperatur gemessen, da beide Parameter wichtige Holzeigenschaften beeinflussen.

30 Die Umgebungstemperatur ist am Messtag zu messen, um die am Messtag vorhandene Steifigkeit der Beseilung richtig zu erfassen. Bei der statischen

Berechnung der Maste muss auch die Temperatur bei anderen Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Diese hat Einfluss auf den Seildurchhang und damit auch Einfluss auf die Rückstellkräfte durch die Seile. Bei Systemen ohne Beseilung kann die Temperatur in der Regel
5 vernachlässigt werden.

Die Berechnungen der Gesamtsteifigkeit und der Einzelanteile werden nachfolgend erläutert.

Nachfolgend wird auf den Einfluss der Materialfeuchte bei Holzmasten
10 eingegangen. Die Materialfeuchte beeinflusst sowohl den E-Modul des Holzes als auch die zulässigen Spannungen. Da für die Verformungen und, falls diese geführt werden, auch für die statischen Nachweise im Wesentlichen der äußere Ring des Querschnittes relevant ist (ca. 5cm), wird die Feuchte vorzugsweise auch nur dort bestimmt. Dies erlaubt die
15 Verwendung eines Messgerätes, welches beispielsweise mit Ultraschall arbeitet und damit ebenfalls keine Beschädigungen des Holzes hervorruft. Das Einschlagen oder Eindrücken von Elektroden ist also nicht erforderlich.

Die gemessene Holzfeuchte wird auch zur Bestimmung der korrekten Dichte des Materials und damit der Masse verwendet.

20 Figur 3 zeigt die prinzipielle Abhängigkeit des E-Moduls für Holz von der Holzfeuchte (für einen E-Modul von ca. 10.000 N/mm² bei der Feuchte 12% nach verschiedenen Quellen.

Ähnliche Abhängigkeiten finden sich z.B. in [12] (siehe Bild 4. Die dort angegebene Abhängigkeit der Biegesteifigkeit von der Feuchte ist dort
25 allerdings größer. Eigene Erfahrungswerte zeigen, dass die Feuchte in den Masten mit zunehmendem Alter abnimmt. Abnehmende Feuchte wiederum führt zu einem höheren E-Modul und damit zu einer höheren Feuchte. Vorteilhaft wird daher in einer Ausführungsform der Erfindung dieser Effekt durch einen beispielsweise empirisch ermittelten Altersfaktor kompensiert
30 und zwar vorteilhaft selbst dann, wenn die Korrektur des E-Moduls nach Figur 3 die tatsächliche Zunahme des E-Moduls bei geringer Feuchte unterschätzt.

Falls im Laufe der Entwicklung die E-Modul Korrektur abhängig von der Feuchte angepasst wird, wird deshalb auch der empirische Altersfaktor vorteilhaft angepasst.

- 5 Figur 4, die aus [12] bekannt ist (siehe Figure 4-11), zeigt die Abhängigkeit verschiedener Holzeigenschaften (property) von der Feuchte (moisture). Die Kurve A bezieht sich auf die Spannung (tension) parallel zur Holzfaser (grain), die Kurve B auf die Biegung (bending), die Kurve C auf die Kompression (compression) parallel zur Holzfaser, die Kurve D auf die Kompression senkrecht zur Holzfaser und die Kurve E auf die Spannung senkrecht zur Holzfas
- 10 Holzfas

Die Holzfeuchte u ist dabei wie folgt definiert:

$$u = \frac{m_w}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \text{in \%}$$

mit: m_w Wassermasse in kg

- 15 m_0 Holzmasse bei 0% Feuchte in kg

m_u Holzmasse nass, mit Feuchte u in kg

Die tatsächliche Dichte des Holzes bei einer bestimmten Feuchtigkeit u (in %) ergibt sich damit wie folgt:

$\rho_u = \rho_0 \cdot (1 + u/100)$ bei einer Feuchte von 0% (darrtrocken), oder

- 20 $\rho_u = \rho_{12} \cdot (1 + u/100) / 1,12$ bei einer Feuchte von 12% (Raumklima)

Nimmt man die Dichte bei 0% Feuchte und rechnet sie auf Raumklima um, so erhält man folgende Werte für Dichten abhängig von der Holzfeuchte für 4 verschiedene Holzarten.

Holzart	Dichte (0%) kg/m ³	Dichte (12%) kg/m ³
Fichte	429	480,5
Tanne	411	460,3
Kiefer	465	520,8
Lärche	527	590,2

Die nachfolgende Tabelle enthält typische Angaben aus diversen Quellen für den E-Modul und die Dichte verschiedener Holzarten bei der Feuchte von 12% (siehe [6]).

Angaben für Feuchte =12%, T=20°, Luftfeuchte 65%		
parallel		
Holzart	E-Modul (12%)	Dichte (12%)
	N/mm ²	kg/m ³
Fichte	10000	470
Tanne	10000	470
Kiefer	11000	520
Lärche	12000	590

5

Bei Spannungsnachweisen wird vorteilhaft der Einfluss der Feuchte auf die mechanischen Eigenschaften (Zug- und Druckfestigkeiten) ebenfalls
10 berücksichtigt.

Nachfolgend wird der Einfluss der Umgebungstemperatur erläutert.

Bei einer Beseilung, die spannungsfrei ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Seile die gleiche Temperatur wie die Umgebung haben. Die
15 Temperatur der Umgebung wird daher dann am Messtag gemessen und als Temperatur der Seile angenommen.

Bei einer Beseilung unter Spannung ergibt sich die Seiltemperatur theoretisch korrekt auch durch die Leistung, die zum Messzeitpunkt in den Seilen anliegt. Diese Temperatur kann aus Angaben des Netzbetreibers berechnet werden.

20 Für die statischen Nachweise wird also in der Regel die Temperatur zum Messzeitpunkt berücksichtigt, um die Seildurchhänge bei den maßgebenden Temperaturen berechnen zu können. Basis hierfür sind die zum Messzeitpunkt gemessenen Feldlängen und Seildurchhänge.

Bei Holzmasten wird vorteilhaft ggf. die Temperatur zur Bestimmung der
25 Holzkenngößen mit berücksichtigt. Streng genommen hängen auch der E-Modul und die zulässigen Spannungen von der Temperatur ab. Bei der hier vorkommenden Variation der Temperatur während der Messungen ist der

Einfluss aber in der Regel vernachlässigbar klein. Detaillierte Angaben zum Einfluss der Feuchte und der Temperatur finden sich z.B. in [12]. Diese können in einer Ausführungsform der Erfindung ebenfalls berücksichtigt werden.

5

Die nachfolgende, aus [12] entnommene Tabelle 4-16 verdeutlicht die Abhängigkeit des E-Moduls (MOE) von der Temperatur T.

Table 4-16. Percentage change in bending properties of lumber with change in temperature^a

Property	Lumber grade ^b	Moisture content	$((P-P_{70}) / P_{70})100 = A + BT + CT^2$			Temperature range	
			A	B	C	T _{min}	T _{max}
MOE	All	Green	22.0350	-0.4578	0	0	32
		Green	13.1215	-0.1793	0	32	150
		12%	7.8553	-0.1108	0	-15	150
MOR	SS	Green	34.13	-0.937	0.0043	-20	46
		Green	0	0	0	46	100
		12%	0	0	0	-20	100
	No. 2 or less	Green	56.89	-1.562	0.0072	-20	46
		Green	0	0	0	46	100
		Dry	0	0	0	-20	100

^aFor equation, P is property at temperature T in °F; P₇₀, property at 21°C (70°F).

^bSS is Select Structural.

10 Da der Temperatureinfluss berücksichtigt wird, werden selbst bei sehr großen Temperaturdifferenzen zutreffende Ergebnisse erzielt.

Nachfolgend wird der Einfluss des Alters erläutert. Bei Holz beeinflusst das Alter sowohl die Feuchtigkeit im Material als auch die Festigkeit. Ältere Masten weisen eine deutlich höhere Steifigkeit auf als junge Masten.

15

Der Einfluss des Alters auf die Steifigkeit wurde aus den Messdaten empirisch abgeleitet. Durch eine zunehmende Anzahl an Messdaten kann der Einfluss des Alterungseffektes kontinuierlich zugeschärft werden. Figur 5 zeigt einen empirisch ermittelten Einfluss, der die Zunahme des E-Moduls abhängig vom Alter in Jahren zeigt. Der Einfluss dieses Alterungseffektes wird in der Software durch die in Figur 5 gezeigte Korrekturfunktion berücksichtigt.

20

Der zu untersuchende Mast wird für die weitere Analyse zunächst in ein generalisiertes System transformiert. Dies ist ein gängiges Verfahren, um ein komplexes System, das aus vielen Stäben, Knoten und Massen besteht, in einen äquivalenten Einmassenschwinger zu überführen. Der Einmassenschwinger hat die gleichen dynamischen Eigenschaften wie das komplexe Ursprungssystem. Dies bezieht sich insbesondere auf die Steifigkeit und auf die Eigenfrequenz des Systems. Üblicherweise wird der virtuelle Einmassenschwinger an der Stelle der maximalen Verformung der zugrunde gelegten Schwingungsform des Systems positioniert. Das ist hier die Mastspitze. Figur 6 verdeutlicht das Ausgangssystem und das generalisierte System.

Durch eine Energiebetrachtung und der Forderung, dass die Energie während einer Schwingperiode für beide Systeme gleich sein muss, ergeben sich die entsprechenden Formeln zur Bestimmung der Kenngrößen des generalisierten Ersatzsystems. Dies sind:

M_{gen} generalisierte Masse und

C_{gen} generalisierte Steifigkeit

Die Formeln zur Bestimmung der generalisierten Masse lauten:

$$E = \int_0^H \frac{1}{2} \cdot m(z) \cdot \dot{y}^2(z) dz = \frac{1}{2} \cdot M_{\text{gen}} \cdot \dot{y}^2(H)$$

$$\dot{y}(z) = y(z) \cdot \omega_e = y_{\text{max}} \cdot \phi(z) \cdot \omega_e$$

Die Energie E ist für beide Systeme gleich. Da das generalisierte System hier an der Stelle der maximalen modalen Verformung angebracht ist, gilt:

$$\dot{y}(H) = y(H) \cdot \omega_e = y_{\text{max}} \cdot \phi(H) \cdot \omega_e = y_{\text{max}} \cdot 1,0 \cdot \omega_e$$

Die generalisierte Masse ist dann:

$$M_{\text{gen}} = \int_0^H m(z) \cdot \phi^2(z) dz$$

Nimmt man für die Schwingungsform beispielsweise $\phi(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^2$ an (parabelförmiger Verlauf), so erhält man folgende Gleichung für M_{gen} :

$$M_{\text{gen}} = \int_0^H m(z) \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^4 dz$$

für $m(z) = m = \text{const.}$ folgt dann

$$M_{\text{gen}} = m \cdot \frac{H}{5}$$

Die Eigenfrequenz f_e des generalisierten Systems ist:

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{\text{gen}}}{M_{\text{gen}}}} = \frac{\omega_e}{2\pi}$$

Die Bestimmung von M_{gen} wird für die einzelnen Bauteile der Mastsysteme unten nochmals spezifisch erläutert. Die Bestimmung von C_{gen} erfolgt hier über die Messung der Eigenfrequenz des Systems. Hierzu wird die o.g. Formel umgestellt:

$$C_{\text{gen}} = (2\pi \cdot f_e)^2 \cdot M_{\text{gen}} = \omega_e^2 \cdot M_{\text{gen}}$$

Die so ermittelte generalisierte Steifigkeit C_{gen} ist die Gesamtsteifigkeit C_{Gesamt} des Systems. Diese wird zur weiteren Analyse in ihre Einzelbestandteile aufgeteilt.

Die Gesamtsteifigkeit setzt sich aus mehreren Einzelanteilen zusammen, und zwar:

1. der Mastbiegesteifigkeit C_B
2. der Drehfedersteifigkeit des Fundaments $C_{\varphi,B}$, und
3. der Steifigkeit der Seile $C_{L,Gesamt}$

5 Diese Anteile kann man sich wie Federn vorstellen, die zur Berechnung der Gesamtsteifigkeit kombiniert werden müssen. Dabei sind die Drehfedersteifigkeit und die Mastbiegesteifigkeit als Reihenschaltung und die Leitersteifigkeit additiv als Parallelschaltung zu berücksichtigen. Die Gesamtsteifigkeit kann dann folgendermaßen berechnet werden:

$$10 \quad C_{Gesamt} = C_{L,Gesamt} + \left(\frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_{\varphi,B}} \right)^{-1}$$

Für volle Einspannung, das heißt die Drehfedersteifigkeit ist unendlich, gilt:

$$C_{\varphi,B} = \infty \implies \frac{1}{C_{\varphi,B}} = 0$$

$$C_{Gesamt} = C_{L,Gesamt} + C_B$$

- 15 In den Figuren 7a bis 7c werden die Verformungsanteile schematisch dargestellt. Die Anteile C_B und $C_{L,Gesamt}$ ergeben sich rein analytisch. Der Anteil $C_{\varphi,B}$ ist dann die einzige Unbekannte. Diese kann mit Kenntnis der gemessenen Frequenz dann aus dem Messergebnis berechnet werden.
- 20 Die Mastbiegesteifigkeit wird analytisch bestimmt. Figur 8 verdeutlicht die Herleitung zur Berechnung der Biegesteifigkeit C_B exemplarisch für einen

konischen Mast mit kreiszylindrischem Vollquerschnitt. Die Mastbiegesteifigkeit berechnet sich wie folgt.

$$\begin{aligned}
 \delta &= \int_0^H \frac{M(z)m(z)}{EI(z)} dz \\
 &= \int_0^H \frac{z^2}{E \frac{\pi}{64} (d_o - \alpha z)^4} dz \\
 &= \frac{64}{E\pi} \int_{d_o}^{d_u} \frac{-\left(\frac{d_o - x}{\alpha}\right)^2}{x^4} \frac{dx}{\alpha} \\
 &= -\frac{64}{\alpha^3 E\pi} \int_{d_o}^{d_u} \frac{d_o^2 + x^2 - 2d_o x}{x^4} dx \\
 &= \frac{64}{\alpha^3 E\pi} \left[-\frac{1}{3d_o} + \frac{d_o^2}{3d_u^3} + \frac{1}{3d_u} - \frac{d_o}{d_u^2} \right]
 \end{aligned}$$

5

$$d_o - \alpha z = x$$

$$dz = \frac{-dx}{\alpha}$$

$$z = \frac{d_o - x}{\alpha}$$

$$\begin{aligned}
 C_B &= \frac{1}{\delta} \quad [N/m] \\
 &= \frac{\alpha^3 E\pi}{64} \left[-\frac{1}{3d_o} + \frac{d_o^2}{3d_u^3} + \frac{1}{3d_u} - \frac{d_o}{d_u^2} \right]^{-1}
 \end{aligned}$$

10

5 Die Biegesteifigkeit des Mastes ergibt sich alleine aus der Geometrie und den mechanischen Eigenschaften. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der E-Modul bei Holzwerkstoffen abhängig von der gemessenen Feuchte bestimmt wird. Über die Feuchtemessungen wird dieser Einfluss berücksichtigt.

Die genaue Erfassung geschädigter Querschnittswerte kann durch eine
10 genauere Messmethode erfasst werden. Für die Bewertung der Standsicherheit genügt es aber, die Schädigungen des Mastes vollständig der noch zu bestimmenden Drehfeder C_ϕ am Fuß zuzuweisen. Das heißt, der Mastschaft wird als nicht geschädigt in der Berechnung berücksichtigt. Alle Einflüsse, die die Steifigkeit des Gesamtsystems beeinflussen, werden virtuell
15 dem Fundament zugewiesen. Die Verformungen am Mastkopf ergeben sich dann trotzdem in der gleichen Größenordnung wie bei einer detaillierten Aufteilung der Schädigungen auf den Mastschaft und auf das Fundament. Dies wurde durch Untersuchungen verifiziert.

Figur 18 zeigt, dass die Gesamtverformung unabhängig von der Verteilung
20 der Steifigkeitsanteile untereinander praktisch gleich bleibt. Streuungen von Materialeigenschaften (z.B. beim E-Modul) wirken sich deshalb praktisch nicht auf die berechnete Verformung am Kopf aus, da hierfür die ermittelte Gesamtsteifigkeit maßgebend ist. Das heißt z.B.: Bei einer Überschätzung des tatsächlichen E-Moduls wird rechnerisch eine kleine Drehfedersteifigkeit
25 berechnet. Bei einer Unterschätzung des E-Moduls ist es umgekehrt. Die relevante Gesamtsteifigkeit ist in beiden Fällen ungefähr gleich, so dass auch die berechneten Verformungen in gleicher Größenordnung bleiben. Die berechnete Kopfverformung ist deswegen in besonderer Weise als Kriterium zur Bewertung der Standsicherheit geeignet.

30

Diese analytische Vorgehensweise erlaubt es, mit nur einer mechanischen Messgröße sowie der Holzfeuchte und der Umgebungstemperatur auf die Gesamtsteifigkeit des Gesamtsystems zu schließen.

- 5 Nachfolgend wird auf die Drehfedersteifigkeit des Fundamentes

$$C_{\varphi}$$

eingegangen.

- 10 Die Drehfedersteifigkeit wird in eine äquivalente horizontale Ersatzfeder transformiert. Hierdurch kann sie einfacher im generalisierten System berücksichtigt werden. Die Steifigkeit dieser Feder, die in Höhe des generalisierten Systems angebracht ist, kann wie folgt berechnet werden (Umrechnung der Drehfedersteifigkeit in eine äquivalente horizontale Ersatzfeder):

15

$$C_{\varphi} : \text{Drehfeder Boden} \left[\frac{N}{\text{rad}} \right]$$

$$C_{\varphi,B} : \text{Eq. Biegesteifigkeit} \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$\frac{PH}{C_{\varphi}} H = \frac{P}{C_{\varphi,B}}$$

$$C_{\varphi,B} = \frac{C_{\varphi}}{H^2}$$

- 20 Die Drehfeder soll die Fundamentsteifigkeit und die ggf. vorhandenen Schädigungen des Mastes repräsentieren. Da die Standsicherheit

5 letztendlich durch Berechnung der Maximalverformung unter quasi-statischen Lasten berechnet wird, werden die dynamischen Messungen so durchgeführt, dass nicht der dynamische E-Modul des Bodens aktiviert wird. Dies bedeutet, dass dann die angeregten Schwingamplituden klein bleiben müssen.

Hintergrund ist, dass der dynamische E-Modul je nach Bodenart um einen Faktor von 2 bis 4 (zum Teil auch mehr) größer sein kann als der statische E-Modul des Bodens.

10 Figur 9 zeigt schematisch das statische System zur Umrechnung der virtuellen Drehfedersteifigkeit in eine äquivalente horizontale Ersatzfeder. Betrachtet man nur den horizontalen Verschiebungsanteil aus der Drehfeder, so ergibt sich am Mastkopf eine Verschiebung von $H \cdot \phi$ (im Prinzip Mastlänge mal Verdrehwinkel).

15 Nachfolgend wird auf die Leitersteifigkeit (C_L) eingegangen. Um die gesamte Leitungssteifigkeit zu ermitteln, wird zuerst die Steifigkeit für eine einzige Leitung in senkrechter Richtung zur Leiterebene berechnet. Dabei werden ggf. unterschiedliche Längen der Seile im linken und rechten Feld berücksichtigt. Anschließend werden die Einzelsteifigkeiten zu einer generalisierten Gesamtsteifigkeit zusammengefasst. Das generalisierte
20 System wird gedanklich an der Stelle der maximalen modalen Verformung δ_G positioniert.

Die Leitersteifigkeiten aus dem linken und rechten Feld (vom Mast aus gesehen) werden wie folgt berechnet.

25

$$C_L = \frac{\rho_L A_L g L_L}{8d_L} + \frac{\rho_R A_R g L_R}{8d_R}$$

$$C_{L,Gesamt} = \sum_i \alpha_i^2 C_{L_i}$$

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{\delta_i}{\delta_G} \\ \delta_G = \max(\delta_i) = 1 \text{ (normierte modale Verformung)} \end{cases}$$

$$Z_i^* = \frac{Z_i}{H} \text{ (normierte Höhe)}$$

$$\delta_i = Z_i^{*2} \frac{C_{\varphi,B}}{C_B + C_{\varphi,B}} + Z_i^* \frac{C_B}{C_B + C_{\varphi,B}}$$

$$C_{L,Gesamt} = \sum_i \left[\left(Z_i^{*2} \frac{C_{\varphi,B}}{C_B + C_{\varphi,B}} + Z_i^* \frac{C_B}{C_B + C_{\varphi,B}} \right)^2 C_{L_i} \right]$$

$$= \frac{C_L}{(C_B + C_{\varphi,B})^2} (C_{\varphi,B}^2 \sum_i Z_i^{*4} + 2C_B C_{\varphi,B} \sum_i Z_i^{*3} + C_B^2 \sum_i Z_i^{*2})$$

$$\text{Annahme: } C_{L_i} = C_{L_j} \quad i \neq j$$

Die Leitersteifigkeiten für das linke und rechte Feld werden gleichzeitig berücksichtigt.

- 5 Die Berechnung der modalen Verformung δ_i ergibt sich aus der Reihenschaltung der Federn C_B und $C_{\varphi,B}$. Da die Leiterseile in der Regel nicht an der Mastspitze positioniert sind, ergibt sich die korrekte modale Verformung δ_i ebenfalls über eine Energiebetrachtung. Dies führt zu den Vorfaktoren Z_i^{*2} beim Drehfederanteil und Z_i^* beim Biegeanteil.
- 10 Figur 10 zeigt schematisch das System zur Berechnung der Leitersteifigkeit. Die Höhe h_1 in der Figur 10 entspricht der Höhe z_1 in der o.g. Formel. Die Höhen der beiden anderen Seile z_2 und z_3 sind in der Figur 10 nicht angegeben.

Mit den zuvor entwickelten Formeln kann eine Gleichung für C_{Gesamt} 15 aufgestellt werden in der nur der Drehfederanteil unbekannt ist. Die Steifigkeit C_{Gesamt} ergibt sich aus der gemessenen Frequenz und der generalisierten Masse.

Nachfolgend wird weiter auf die generalisierte Masse eingegangen.

Die generalisierte Masse setzt sich aus den Anteilen der an der Schwingung beteiligten Massen, Mast-, Leitungs-, Isolatoren- und zusätzlichen Massen, zusammen. Je nachdem wo die Massen im System positioniert sind, sind sie mehr oder weniger an der Schwingung beteiligt. Dies wird über die jeweils betrachtete Schwingungsform erfasst.

Nachfolgend wird auf die Schwingungsform und generalisierte Masse für den Mast eingegangen.

Die Schwingungsform setzt sich hier aus zwei Anteilen zusammen. Dies sind ein Anteil aus der reinen Biegung des Mastschaftes und ein Drehanteil aus der Verdrehung im Fundament. Durch die Kopplung diese Anteile entsteht bei der Herleitung ein zusätzlicher Mischanteil. Die für die Berechnung der generalisierten Masse anzusetzende Schwingungsform hat also letztendlich drei Komponenten:

1. Biegungsanteil
2. Verdrehungsanteil
3. und Mischanteile

Die generalisierte Masse ergibt sich ebenfalls wieder aus einer Energiebetrachtung für das schwingende komplexe System und das vereinfachte generalisierte System. Das nachfolgende Schema zeigt exemplarisch die Berechnung der generalisierten Masse für den Mastschaft eines konischen Mastes mit kreiszylindrischem Vollquerschnitt. Der Parameter $y(z)$ ist die anzusetzende normierte Schwingungsform (hier parabelförmig angesetzt $y(z)=(z/H)^2$), die an der Stelle der maximalen Verformung den Wert 1,0 annimmt.

Die generalisierte Masse für einen konischen Mast mit kreiszylindrischem Vollquerschnitt berechnet sich wie folgt.

$$\begin{aligned}
M_{Gen,M} &= \int M(z) y(z)^2 dz \\
M(z) &= \rho A(z) = \rho \frac{\pi}{4} d(z)^2 = \rho \frac{\pi}{4} (d_u + \alpha z)^2 \\
y(z) &= \left(\frac{z}{H}\right)^2 \frac{C_{\varphi,B}}{C_B + C_{\varphi,B}} + \left(\frac{z}{H}\right) \frac{C_B}{C_B + C_{\varphi,B}} \\
M_{Gen} &= \frac{\pi\rho}{4} \int_0^H \rho \frac{\pi}{4} (d_u + \alpha z)^2 \left[\left(\frac{z}{H}\right)^2 \frac{C_{\varphi,B}}{C_B + C_{\varphi,B}} + \left(\frac{z}{H}\right) \frac{C_B}{C_B + C_{\varphi,B}} \right]^2 dz \\
&= \frac{\pi\rho}{4} \left(\frac{d_u^2 C_{\varphi,B}^2}{5} H + \frac{d_u^2 C_B C_{\varphi,B}}{2} H + \frac{d_u^2 C_B^2}{3} H + \right. \\
&\quad \left. \frac{d_u \alpha C_{\varphi,B}^2}{3} H^2 + \frac{4 d_u \alpha C_B C_{\varphi,B}}{5} H^2 + \frac{d_u \alpha C_B^2}{2} H^2 + \right. \\
&\quad \left. \frac{\alpha^2 C_{\varphi,B}^2}{7} H^3 + \frac{\alpha^2 C_B C_{\varphi,B}}{3} H^3 + \frac{\alpha^2 C_B^2}{5} H^3 \right)
\end{aligned}$$

Zusätzlich zu den generalisierten Massen infolge translatorischer Verschiebungen werden die Rotationsmassen (Eigenträgheitsmomente und Steineranteile), bei weit auskragenden Bauteilen berücksichtigt. Massen mit großer Exzentrizität (z.B. Isolatoren an Weitspanntraversen im Mittelspannungsbereich) können das Ergebnis signifikant beeinflussen und werden deshalb vorteilhaft berücksichtigt.

Weiterhin werden zusätzlich zum Anteil des Mastes selbst die mitschwingenden Massen von Anbauteilen wie z.B.: Leiterseile, Isolatoren und weitere Massen (z.B. Verkehrszeichen) berücksichtigt.

Die verwendete Schwingungsform hat einen deutlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die Übereinstimmung mit theoretischen Werten umso besser wird, je genauer die Schwingungsform beschrieben wird. Stimmt die Schwingungsform mit der tatsächlichen Schwingungsform überein, so liegt eine nahezu 100%-ige Übereinstimmung zwischen theoretischer Verschiebung bzw. Auslenkung und berechneter Verschiebung bzw. Auslenkung vor. Aus diesem Grund wird die Schwingungsform des Biegeanteils in einer Ausführungsform vorteilhaft nicht vorgegeben, sondern jeweils spezifisch, abhängig von den Mastkenngrößen

(Geometrie, Querschnittswerte, Materialeigenschaften, Zusatzmassen etc) berechnet. Dies kann wie folgt geschehen.

- Zunächst wird die generalisierte Masse für Leiterseile betrachtet. Die generalisierte Masse der Leiterseile ergibt sich aus der anteiligen Seilmasse aus dem linken und rechten Feld (jeweils halbe Seilmasse im entsprechenden Feld) und aus der modalen Verschiebung z_i^* am Angriffspunkt der Masse.

$$M_{Gen,L} = \sum_i M_{L_i} z_i^{*2}$$

$$= \frac{M_L}{(C_{\varphi,B} + C_B)^2} (C_{\varphi,B}^2 \sum_i z_i^{*4} + 2C_B \sum_i z_i^{*3} + C_B^2 \sum_i z_i^{*2})$$

$$\text{Annahme: } M_{L_i} = M_{L_j} \quad i \neq j$$

- 10 Die generalisierte Masse der Leiterseile selbst M_L ergibt sich durch Ansatz einer linear veränderlichen Verschiebung. Dies bedeutet, es wird davon ausgegangen, dass sich nur der angeregte Mast bewegt und die benachbarten Maste in Ruhe bleiben. Außerdem werden Eigenbewegungen des Seiles vernachlässigt. Die generalisierte Masse der Leiterseile ist dann:

$$15 \quad M_{L,gen} = \int_0^L m_L \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^2 dz = m_L \cdot \frac{L}{3}$$

Die generalisierten Massen der Seile aus dem linken und rechten Feld werden überlagert. Damit ergibt sich:

$$M_{L,gen} = m_{L,links} \cdot \frac{L_{links}}{3} + m_{L,rechts} \cdot \frac{L_{rechts}}{3}$$

Die Länge L ist die Seillänge zwischen zwei Masten. Diese ist größer als der Abstand der Maste im Feld (geringfügig länger, <1%).

Nachfolgend wird die generalisierte Masse für die Isolatoren betrachtet. Die generalisierte Masse der Isolatoren ergibt sich aus Isolatormasse und aus der

5 modalen Verschiebung z_i^* an der Position des Isolators:

$$M_{Gen,I} = \sum_i M_{I_i} z_i^{*2} =$$

$$\frac{M_I}{(C_{\varphi,B} + C_B)^2} (C_{\varphi,B}^2 \sum_i z_i^{*4} + 2C_B \sum_i z_i^{*3} + C_B^2 \sum_i z_i^{*2})$$

Annahmen: $M_{I_i} = M_{I_j}$ $i \neq j$

*Die Leitung und die dazugehörige
Isolator liegen beide in der
gleichen Höhe.*

10

Nachfolgend werden die generalisierten Massen für zusätzliche Massen betrachtet. Die generalisierte Masse von zusätzlichen Massen ergibt sich aus der jeweiligen Masse und aus der modalen Verschiebung z_i^* an der Position der Zusatzmasse:

$$M_{Gen,Z} = \sum_i M_{Z_i} z_i^{*2} =$$

$$15 \frac{M_Z}{(C_{\varphi,B} + C_B)^2} (C_{\varphi,B}^2 \sum_i z_i^{*4} + 2C_B \sum_i z_i^{*3} + C_B^2 \sum_i z_i^{*2})$$

Nachfolgend wird auf die analytische Bestimmung der Drehfedersteifigkeit eingegangen. Die Drehfedersteifigkeit kann mit den zuvor beschriebenen Formeln analytisch bestimmt werden. Die entsprechende Entwicklung des Formelapparates wird nachfolgend dargestellt.

5

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{Gen,Gesamt} = C_{L,Gesamt} \omega^{-2} \\ \quad = [C_{L,Gesamt} + (\frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_{\varphi,B}})^{-1}] \omega^{-2} \\ \quad = \frac{C_{L,Gesamt} C_B + C_{L,Gesamt} C_{\varphi,B} + C_B C_{\varphi,B}}{C_B + C_{\varphi,B}} \omega^{-2} \quad \implies \\ M_{Gen,Gesamt} = M_{Gen,M} + M_{Gen,L} + M_{Gen,I} + M_{Gen,z} \end{array} \right.$$

10

$$\begin{aligned} & [\frac{\pi\rho}{4} (\frac{d_u^2}{5} H + \frac{d_u \alpha}{3} H^2 + \frac{\alpha^2}{7} H^3) + (M_L + M_I) \sum_i z_i^{*4} + M_Z \sum_j z_j^{*4}] C_{\varphi,B}^2 + \\ & [\frac{\pi\rho}{4} (\frac{d_u^2}{2} H + \frac{4d_u \alpha}{5} H^2 + \frac{\alpha^2}{3} H^3) + (M_L + M_I) \sum_i z_i^{*3} + M_Z \sum_j z_j^{*3}] C_B C_{\varphi,B} + \\ & [\frac{\pi\rho}{4} (\frac{d_u^2}{3} H + \frac{d_u \alpha}{2} H^2 + \frac{\alpha^2}{5} H^3) + (M_L + M_I) \sum_i z_i^{*2} + M_Z \sum_j z_j^{*2}] C_B^2 = \\ & \frac{1}{\omega^2} [(C_{L,Gesamt} \sum_i z_i^{*4} + C_B) C_{\varphi,B}^2 + (2C_{L,Gesamt} \sum_i z_i^{*3} + C_B) C_B C_{\varphi,B} + C_B^2 C_{L,Gesamt} \sum_j z_j^{*2}] \quad (\text{Verdrehungsanteil}) \\ & (A_1 - A_2) C_{\varphi,B}^2 + (B_1 - B_2) C_{\varphi,B} + (C_1 - C_2) = 0 \quad (\text{Mischanteil}) \\ & C_{\varphi,B} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{Biegungsanteil}) \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann ein statisches Ersatzsystem definiert werden. An diesem System werden dann die Verschiebungen infolge Vertikal- und Horizontallasten berechnet.

Die Ermittlung der Drehfedersteifigkeit bzw. die Ermittlung des Verhältnisses zwischen Drehfedersteifigkeit und Biegesteifigkeit wird vorteilhaft mit einem Iterationsverfahren bestimmt. Dieses Vorgehen hat gegenüber der analytischen Lösung den großen Vorteil, dass es universeller ist. Anpassungen aufgrund anderer Systemeigenschaften brauchen so in der analytischen Lösung nicht implementiert werden. Die Ergebnisse des Iterationsverfahrens und der analytischen Lösung für den oben gezeigten Fall sind identisch.

Die Horizontallasten sind im wesentlichen Windlasten auf das System, die Vertikallasten sind Mannlasten und/oder Montagelasten. Die Größenordnung dieser Lasten ergibt sich aus den entsprechenden Vorschriften.

Nachfolgend wird auf die Bewertung von Masten eingegangen. Die Bewertung der Standsicherheit der Masten erfolgt über Verformungskriterien, die je nach System variieren können. Die Verformungen bzw. Auslenkungen der Masten werden am statischen Ersatzsystem mit den aus den Messungen bestimmten Steifigkeiten berechnet.

Die anzusetzenden Lasten ergeben sich aus entsprechenden Vorschriften.

Die berechneten Verformungen werden mit zulässigen Verformungen verglichen. Hierdurch können die Masten in verschiedene Klassen eingestuft werden.

Für Stahlmasten werden die Kriterien aus EN 40 verwendet. Dort werden folgende Grenzwerte für die Verformungen unter charakteristischen Lasten definiert:

Verformungskriterien für Metallmaste

Klasse 1: zulässig $d = 4\% \cdot (H+w)$

Klasse 2: zulässig $d = 6\% \cdot (H+w)$

Klasse 3: zulässig $d = 10\% \cdot (H+w)$

w ist die horizontale Ausladung, kann hier zu 0 gesetzt werden

Verformungen über Klasse 3 sind unzulässig.

Für Freileitungsmasten aus Holz wurden Kriterien in Anlehnung an die EN 40 entwickelt. Aufgrund der stromführenden Beseilung und der Erfordernis zur Besteigbarkeit sind die Kriterien schärfer als bei Metallmasten.

Verformungskriterien für Holzmaste

5 Klasse 1: zulässig $d=1,5\%*H$

Klasse 2: zulässig $d=3,0\%*H$

Klasse 3: zulässig $d=5,0\%*H$

Die Konsequenzen der jeweiligen Einstufung sind beispielsweise wie folgt.

Konsequenzen der Einstufung für Holzmaste

10 Klasse 1: ohne Einschränkung;

Klasse 2: nicht mehr besteigbar, aber noch standsicher;

Klasse 3: nicht besteigbar, bedingt standsicher, muss innerhalb von 3 Monaten ausgetauscht werden;

>Klasse 4: nicht mehr standsicher, muss sofort ausgetauscht werden.

15

Nachfolgend werden Lastfälle betrachtet.

Es werden folgende Lastfälle untersucht:

1. Wind als Leiteinwirkung auf Mast, Leiterseile und Anbauteile
- 20 2. Wind auf vereiste Leiterseile + Wind auf Mast und Anbauteile
3. Montagelast (Mannlast)

Nachfolgend wird auf Windlast auf Mast, Leiterseile und Anbauteile eingegangen:

- Die Windlasten werden z. B. in Anlehnung an VDE 210 bestimmt. Die
- 25 Berechnung der Windlasten kann grundsätzlich allen zu berücksichtigenden Vorschriften angepasst werden. Dabei werden die Referenzwindgeschwindigkeiten v_{ref} standortabhängig berücksichtigt.

Die notwendigen Daten werden aus den entsprechenden Windzonenkarten (z.B. DIN 1055-4 neu [4], VDE 210 [3]) entnommen.

Die Windlasten auf den Mast ergeben sich wie folgt:

$$w_M = 1,1 \cdot q(z_H) \cdot c_M \cdot A_M$$

- 5 Der aerodynamische Beiwert c_M ist abhängig von der Querschnittsform. Für kreiszylindrische Querschnitte wird $c_M=0,7-0,8$ verwendet. Der genaue Wert wird abhängig von der Reynoldszahl bestimmt.

Die Windlasten auf die Seile werden wie folgt berechnet:

$$w_S = q(z_S) \cdot c_S \cdot A_S$$

- 10 Anbauteile werden berücksichtigt, wenn sie signifikante Lasteinzugsflächen aufweisen (z.B. Verkehrszeichen). Kleinflächige Bauteile wie z.B. Isolatoren werden vorzugsweise vernachlässigt. Die Lasten auf Anbauteile werden wie folgt berücksichtigt:

$$w_A = q(z_A) \cdot c_A \cdot A$$

- 15 Dabei ist $q(z_A)$ der Geschwindigkeitsdruck in Höhe des Anbauteils (Schwerpunkt maßgebend). c_A ist der aerodynamische Kraftbeiwert. Dieser wird für Anbauteile mit $c_A=2,0$ berücksichtigt. Er wird abhängig von der aerodynamischen Form des Anbauteils berücksichtigt. A ist die Lasteinzugsfläche. Folgende Querschnittsformen sind vorzugsweise
20 vorgesehen:

Wind auf vereiste Leiterseile + Wind auf Mast und Anbauteile:

- Bei Wind auf vereiste Seile wird die vergrößerte Querschnittsfläche der Seile berücksichtigt. Der Geschwindigkeitsdruck wird gleichzeitig abgemindert, so
25 zum Beispiel auf $0,7q$.

Montagelast (Mannlast):

Es wird davon ausgegangen, dass ein Mann inklusive Ausrüstung mit einem Gewicht von 100 kg den Mast besteigt. Die Ausmitte ist 0,3-0,5 m.

- 5 Nachfolgend wird eine Verschiebung bzw. Auslenkung des betrachteten Mastes infolge einer Horizontallast dargestellt.

Die Horizontallasten ergeben sich bei Freileitungsmasten im Wesentlichen aus den Windlasten auf die Leiterseile. Das nachfolgende Schema zeigt die Berechnung der Verschiebungen infolge Windlast auf die Leiterseile. Dabei werden die Anteile infolge Mastbiegung und Verdrehung separat ermittelt.

Figur 11 zeigt schematisch das statische System zur Berechnung der Kopfverformung bei Ansatz einer Horizontallast in einer bestimmten Höhe h_1 (nur Biegeanteil). Das statische Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Verschiebung am Mastkopf basiert auf dem Prinzip der "virtuellen Kräfte".

15

$$\begin{aligned}
 \delta_{\text{Biegung}} &= \int_0^{h_1} \frac{M(z)m(z)}{EI(z)} dz \\
 &= \int_0^{h_1} \frac{pz(H-h_1+z)}{E \frac{\pi}{64} [d_o - \alpha(H-h_1+z)]^4} dz \\
 &= \frac{64p}{E\pi} \int_{d_o - \alpha(H-h_1)}^{d_u} \frac{\left(\frac{d_o - x}{\alpha} - H + h_1\right) \frac{d_o - x}{\alpha} - dx}{x^4} \frac{1}{\alpha} \\
 &= -\frac{64}{E\pi\alpha^3} \int_{d_o - \alpha(H-h_1)}^{d_u} \frac{(d_o - x - H\alpha + h_1)(d_o - x)}{x^4} dx \\
 &= \frac{64}{E\pi\alpha^3} \left[(d_o^2 - Hd_o\alpha + h_1d_o\alpha) \frac{1}{3x^3} + (-2d_o + H\alpha - h_1\alpha) \frac{1}{2x^2} - \frac{1}{x} \right]_{d_o - \alpha(H-h_1)}^{d_u}
 \end{aligned}$$

$$\delta_{\text{Rotation}} = \frac{M}{C_\varphi} H = \frac{ph_1H}{C_\varphi} = \frac{ph_1H}{C_{\varphi,B}H^2} = \frac{ph_1}{C_{\varphi,B}H}$$

$$d_o - \alpha(H - h_1 + z) = x$$

$$dz = \frac{-dx}{\alpha}$$

$$z = \frac{d_o - x}{\alpha} - H + h_1$$

In gleicher Weise werden die Windlasten auf den Mast selbst oder die
 5 Windlasten auf weitere Anbauteile (z.B. Verkehrszeichen) berücksichtigt. Die
 Berechnung ist also allgemeingültig. Sie kann in dieser Form insbesondere
 auch für alle Masten ohne Leiterseile verwendet werden.

Nachfolgend wird die Berechnung der Verschiebung bzw. Auslenkung des
 10 betrachteten Mastes infolge einer Vertikallast erläutert. Die Vertikallasten
 ergeben sich aus Mannlasten und aus weiteren Montagelasten. Die
 Berechnung der Verschiebungen wird nachfolgend dargestellt. Dabei
 werden wieder der Anteil aus Mastbiegung und Mastverdrehung separat
 ermittelt.

15 Figur 12 zeigt schematisch das statische System zur Berechnung der
 Kopfverformung bei Ansatz einer Vertikallast mit einer Ausmitte h_v . Diese
 Vertikallast bewirkt ein Moment M_v , welches am Mastkopf zu einer
 Horizontalverschiebung führt. Das statische Berechnungsverfahren zur
 Ermittlung der Verschiebung am Mastkopf basiert auf dem Prinzip der
 20 "virtuellen Kräfte".

$$\begin{aligned}
\delta_{\text{Biegung}} &= \int_0^{h_1} \frac{M_V z}{EI(z)} dz \\
&= \int_0^{h_2} \frac{p_V h_V z}{E \frac{\pi}{64} (d_o - \alpha z)^4} dz \\
&= \frac{64 M_V}{E \pi} \int_{d_o}^{d_u} \frac{z}{(d_o - \alpha z)^4} \frac{-dx}{\alpha} \\
&= -\frac{64 M_V}{E \pi \alpha^2} \left[-\frac{1}{2x} + \frac{d_o}{3x^3} \right]_{d_o}^{d_u}
\end{aligned}$$

$$\delta_{\text{Rotation}} = \frac{M_V}{C_\varphi} H = \frac{p_V h_V H}{C_\varphi} = \frac{p_V h_V H}{C_{\varphi,B} H^2} = \frac{p_V h_V}{C_{\varphi,B} H}$$

$$d_o - \alpha z = x$$

$$dz = \frac{-dx}{\alpha}$$

$$z = \frac{d_o - x}{\alpha}$$

5

- 10 Es werden nachfolgend zwei Maste untersucht und zwar einmal mit einem Hohlquerschnitt und einmal mit einem Vollquerschnitt. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen eines numerischen Modells auf Basis der Finiten Elemente verglichen.

1. Stahlmast mit Kreisringquerschnitt

Der Stahlmast ist 4,48 m hoch und hat eine Wandstärke von 2,3 mm (0). Die Material- und Masteigenschaften sind in den nachfolgenden beiden Tabellen „Materialeigenschaften“ bzw. „Masteigenschaften“ angegeben. Bei der numerischen Simulation mit dem kommerziell erhältlichen SAP2000 Programm wird außerdem eine Drehfedersteifigkeit vorgegeben. Die mit dem kommerziell erhältlichen SAP2000 Programm berechnete erste Eigenfrequenz des Systems wird als Eingabe für die dargestellten erfindungsgemäßen Berechnungen bzw. numerischen Ermittlungen benutzt.

10 Figur 13 skizziert die Geometrie des betrachteten Stahlmastes mit Kreisringquerschnitt.

Materialeigenschaften:

Dichte [to/m ³]	E-Moduli [kN/m ²]
7,846	2,1*10 ⁸

Masteigenschaften:

Frequenz [Hz]	Masse [to]	Durchmesser [m]	Konizität [-]
2,67	0,0144	0,0603	0,0

15 In einer Höhe von 3,48 m wird eine Horizontallast eingeleitet, und es wird in dieser Höhe die Verschiebung berechnet. Die Berechnung der Verschiebung erfolgt sowohl im Programm SAP2000 als auch mit einem zweiten Programm „MaSTaP“, welches die zuvor beschriebenen Berechnungen durchführt. 0 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse. Dabei sind im zweiten Programm zwei verschiedene Schwingungsformen für den Biegeanteil angesetzt worden

20 (parabelförmig und sinusförmig).

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Ergebnisse:

	Horizontalverschiebung [m]	Drehfedersteifigkeit [kN/m]	Frequenz mit voller Einspannung [Hz]
SAP2000	0,0315	100,00	3,1
MaSTaP*	0.0334	80,437	3,2
Abweichung	5,7%	19,5%	3,1%
MaSTaP**	0,0362	62,156	3,4
Abweichung	14,8%	37,8%	8,8%

*: Biegeeigenform mit Sinusansatz

** : Biegeeigenform mit parabolischem Ansatz

Für den hier gewählten Fall zeigen die Ergebnisse mit dem sinusförmigen Ansatz eine bessere Übereinstimmung mit dem theoretischen Ergebnis (SAP2000). Die Abweichung bei der für die Bewertung maßgebenden Horizontalverschiebung beträgt lediglich 5,7%. Da die Verschiebung etwas überschätzt wird, liegt das Ergebnis zudem auf der sicheren Seite. Das Ergebnis zeigt noch einmal den Einfluss der angesetzten Schwingungsform auf das Ergebnis. Stimmt die Schwingungsform im Programm, welches „MaSTaP“ genannt wurde, mit der tatsächlichen Schwingungsform überein, so liegt eine nahezu 100%-ige Übereinstimmung vor. Aus diesem Grund wird die Schwingungsform des Biegeanteils vorteilhaft nicht vorgegeben, sondern jeweils spezifisch, abhängig von den Mastkenngrößen (Geometrie, Querschnittswerte, Materialeigenschaften, Zusatzmassen etc.) berechnet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt weitere Ergebnisse aus dem MaSTap Programm. Es werden die Steifigkeitsanteile für die Biegung und die Rotation, die Gesamtsteifigkeit für das generalisierte System am Mastkopf sowie die Verformungsanteile angegeben.

	Steifigkeit infolge Biegung [kN/m]	Steifigkeit infolge Rotation* [kN/m]	Gesamte Steifigkeit [kN/m]	Def_bieg Höhe zp [m]	Def_Rot Höhe zp [m]	gen_masse [to]
¹	1,3233	4,1929	1,0059	0,0239	0,0094	0,0036
²	1,3233	3,2399	0,93957	0,0239	0,0122	0,0033

¹: Biegeeigenform mit Sinusansatz

²: Biegeeigenform mit parabolischem Ansatz

*: Äquivalente Steifigkeit in Höhe H infolge der elastischen Einspannung.

Die Verschiebung ergibt sich für den Ansatz einer sinusförmigen Schwingungsform in Höhe H zu 72% aus Biegung und 28% aus Rotation.

- 5 Es wird nachfolgend eine ähnliche Vergleichsrechnung für einen Mast mit einem Vollquerschnitt durchgeführt (siehe Figur 14, die die Geometrie eines Stahlmastes mit Vollquerschnitt darstellt). Der Stahlmast ist wieder 4,48 m hoch und hat einen Durchmesser von 60,3 mm. Die Material- und Masteigenschaften sind in den nachfolgenden beiden Tabellen
- 10 „Materialeigenschaften“ bzw. „Masteigenschaften“ angegeben. Bei der numerischen Simulation mit dem SAP2000 Programm wird wieder eine Drehfedersteifigkeit vorgegeben. Die mit dem Programm SAP2000 berechnete erste Eigenfrequenz des Systems wird als Eingabe für das MaSTaP Programm benutzt.

15

Materialeigenschaften:

Dichte [to/m ³]	E-Moduli [kN/m ²]
7,846	2,1*10 ⁸

Masteigenschaften

Frequenz [Hz]	Masse [to]	Durchmesser [m]	Konizität [-]
1,51	0,098	0,0603	0,0

- 20 In einer Höhe von 3,48 m wird eine Horizontallast eingeleitet, und es wird in dieser Höhe die Verschiebung berechnet. Die Berechnung der Verschiebung erfolgt sowohl im Programm SAP2000 als auch mit dem Programm MaSTaP. Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Ergebnisse. Dabei sind im Programm MaSTaP wieder zwei verschiedene Schwingungsformen für den Biegeanteil angesetzt worden (parabelförmig und sinusförmig).

25

Vergleich der Ergebnisse:

	Horizontal Verschiebung [m]	Drehfedersteifigkeit [kN/m]	Frequenz mit voller Einspannung [Hz]
SAP2000	0,0143	100,00	2,26
MaSTaP*	0,0147	92,756	2,35
Abweichung	2,7%	7,2%	3,8%
MaSTaP**	0,0155	84,485	2,51
Abweichung	7,7%	15,5%	10%

*: Biegeeigenform mit Sinusansatz

** : Biegeeigenform mit parabolischem Ansatz

Auch für den hier gewählten Fall zeigen die Ergebnisse mit dem sinusförmigen Ansatz eine bessere Übereinstimmung mit dem theoretischen Ergebnis (SAP2000). Die Abweichung bei der für die Bewertung maßgebenden Horizontalverschiebung beträgt lediglich 2,7%. Da die Verschiebung auch hier etwas überschätzt wird, liegt das Ergebnis zudem auf der sicheren Seite.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die weiteren Ergebnisse aus dem MaSTaP Programm. Es werden die Steifigkeitsanteile für die Biegung und die Rotation, die Gesamtsteifigkeit für das generalisierte System am Mastkopf sowie die Verformungsanteile angegeben.

Die Ergebnisse aus dem MaSTaP Programm:

	Steifigkeit infolge Biegung [kN/m]	Steifigkeit infolge Rotation* [kN/m]	Gesamte Steifigkeit [kN/m]	Def_bieg Höhe zp [m]	Def_Rot Höhe zp [m]	gen_masse [to]
¹	4,8658	4,8352	2,4252	0,0065	0,0082	0,0269
²	4,8658	4,4039	2,3117	0,0065	0,009	0,0257

¹: Biegeeigenform mit Sinusansatz

²: Biegeeigenform mit parabolischem Ansatz

*: Äquivalente Steifigkeit in Höhe H infolge der elastischen Einspannung.

Die Verschiebung ergibt sich für den Ansatz einer sinusförmigen Schwingungsform in Höhe H zu 44% aus Biegung und 56% aus Rotation.

15

Zur weiteren Validierung wurden Kraft-Weg Messungen an ausgewählten Masten durchgeführt. Hierzu wurde in einer bestimmten Höhe eine definierte

horizontal wirkende Kraft in den Mast eingeleitet. Die zugehörige Verschiebung in Höhe der Last wurde gemessen.

Für den gleichen Mast wurden dann Frequenzmessungen durchgeführt und die Verschiebung für die gleiche Last mit Hilfe des erstellten Programms MaSTaP berechnet.

Die Übereinstimmung zwischen den direkt gemessenen Verschiebungen und den aus der Frequenzmessung bestimmten Verschiebungen ist gut. Die Abweichungen liegen bei maximal 10%, obwohl die Messungen an Holzmasten durchgeführt wurden, bei denen naturgemäß eine große Streuung der Materialkennwerte vorliegt.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen eine Gegenüberstellung der gemessenen Verschiebungen infolge einer Einzellast mit den rechnerisch ermittelten Verschiebungen, die mit den aus der Frequenzmessung ermittelten Systemsteifigkeiten ermittelt wurden.

Material	Querschnitt	Umfang		Wandstärke	Feuchte	Mastlänge	HöheEOK	f gemessen	zp Höhe Lasteinleitung	Last		Horizontaiverschiebung gemessen	Gesamtverformung an Lasteinleitung, gerechnet	Abweichung
		in mm	in mm							in mm	in %			
Kiefer	Kreisvollquerschnitt	310,0	98,7		4,5	4,000	3,200	5,763	3,015	6,5	63,8	18,0	19,2	1,07
Kiefer	Kreisvollquerschnitt	310,0	98,7		4,5	4,000	3,200	5,763	3,015	13,0	127,5	34,0	36,9	1,09
Kiefer	Kreisvollquerschnitt	310,0	98,7		4,5	4,000	3,200	5,763	3,015	19,5	191,3	52,0	56,1	1,08
Stahl	Kreisringquerschnitt	190,0	60,5	2,3	0	5,060	4,380	2,67	3,48	6,5	63,8	32,0	33,2	1,04
Stahl	Kreisringquerschnitt	191,0	60,8	2,3	0	5,060	4,380	2,67	3,48	13,0	127,5	61,0	63,1	1,03

Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist gut. Die maximalen Abweichungen liegen unter 10%. Bei Stahlmasten sind die Abweichungen deutlich kleiner, was auf das homogenere Material zurückzuführen ist.

Diese Ergebnisse wurden noch mit einer vorgegebenen Schwingungsform ermittelt. Test mit einer geänderten Programmversion, die spezifische

Schwingungsformen verwendet, haben zu einer weiteren Verbesserung der Übereinstimmung geführt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für zwei tatsächlich gemessene und bewertete Masten vorgestellt. Die Figuren 15 und 16 zeigen die gemessenen Frequenzspektren der Beschleunigungen. Figur 15 zeigt das Ergebnis eines Beschleunigungsspektrums für einen Mast 1 mit einer gemessenen Eigenfrequenz $f_e = 1,368$ Hz. Figur 16 zeigt das Ergebnis eines Beschleunigungsspektrums für einen Mast 2 mit einer gemessenen Eigenfrequenz $f_e = 1,953$ Hz. Die Peaks bei der ersten- und zweiten Eigenfrequenz sind deutlich zu erkennen.

Der Mast 2 wird einmal ohne und einmal mit Seilen bewertet. Die Bewertung ohne Seile zeigt, dass die Seile einen deutlichen Einfluss auf die korrekte Bewertung haben. In diesem Fall ist der Mast 2 mit Seilen in Klasse 2 einzustufen, während er ohne Seile in Klasse 1 eingestuft worden wäre. Da er aber mit Seilen gemessen wurde, ist die Klasse 2 die richtige Einstufung. Die Seile bewirken eine Vergrößerung der Steifigkeit. Da aber gleichzeitig die anzusetzenden Windlasten deutlich steigen (wg. der Windlast auf die Seile), tritt insgesamt eine größere Verformung auf, die zu einer schlechteren Klasse führt.

Der Vergleich mit den Bewertungen, die auf einer rein visuellen Einschätzung des Mastzustandes beruhen, zeigt eine gute Übereinstimmung.

		Mast 1	Mast 2	Mast 2
Spannung	(NS=Niederspannung)	NS	NS	NS
Beseilung, Querschnitt	in mm ²	35	35	35
Seilgewicht (Dichte)	kg/m ³	3560	3560	3560
Durchhang Links	in m	0,65	0	0,55
Durchhang Rechts	in m	0,65	0	0,55
Holztyp	(KI=Kiefer)	KI	KI	KI
Masttyp	(T=Tragmast	T	T	T
Mastlänge (Nennlänge)	in m	10,00	10,00	10,00
Umfang unten	in cm	67	72	72
Durchmesser unten	in m	0,214	0,230	0,230
Durchmesser oben	in m	0,181	0,197	0,197
Baujahr		1977	1979	1979
Höhe H GOK	in m	8,40	8,25	8,25
Feldlänge links LL	in m	45	39	39
Feldlänge rechts LR	in m	45	39	39
Mastbild	(1=3 Seile)	1	0	1
Höhe unterste Phase über GOK	in m	6,9	0	7,0
Bemerkungen			Mast ohne Seile	
Temperatur	in °C	13,5	13,5	13,5
Feuchte am Fuss	in %	17,3	16,4	16,4
Feuchte am Schaft	in %	13,1	13,9	13,9
Eigenfrequenz gemessen	in Hz	1,368	1,953	1,953
Eigenfrequenz für Volleinspannung (unkorrigiert)	in Hz	1,850	2,431	2,431
E-Modul (Ausgangswert)	in kN/m ²	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07
korrigierter E-Modul (inkl. Feuchteinfluss und Altersfaktor)	in kN/m ²	1,34E+07	1,32E+07	1,32E+07
Dichte (Ausgangswert)	in t/m ³	0,520	0,520	0,520
Dichte (inkl. Feuchtekorrektur)	in t/m ³	0,525	0,529	0,529
Altersfaktor		1,257	1,249	1,249
Eigenfrequenz für Volleinspannung (korrigiert)	in Hz	2,072	2,717	2,717
Biegesteifigkeit (korrigiert)	in kN/m	6,297	8,854	8,854
Gesamtsteifigkeit	in kN/m	3,288	5,384	7,201
Windzone		2	2	2
Windlast (Summe auf Gesamtsystem)	in kN	2,31	1,44	2,36
Kopfpunktverschiebung max y infolge Windlast	in m	0,396	0,099	0,194
bezog. Verschiebung max y/H GOK		4,72%	1,20%	2,35%
Klasse 1 zul max y/H GOK		1,50%	1,50%	1,50%
Klasse 2 zul max y/H GOK		3,00%	3,00%	3,00%
Klasse 3 zul max y/H GOK		5,00%	5,00%	5,00%
MaStAp Bewertung		3	1	2
Fusszustand	visuelle Bewertung	3	2	2
Schaftzustand		3	2	2
Zopfzustand		3	2	2
Mastzustand		3	2	2

5 Basis des erfindungsgemäßen Verfahrens ist die Tatsache, dass in den Eigenfrequenzen, die durch Schwingungsmessungen bestimmt werden können, Informationen zur Systemsteifigkeit und zur mitschwingenden Masse

enthalten sind. Die mitschwingende Masse der Systeme wird bestimmt, so dass als einzige Unbekannte die Systemsteifigkeit verbleibt. Mit den gemessenen Eigenfrequenzen kann also auf die Systemsteifigkeit geschlossen werden.

- 5 Mit Hilfe der Messergebnisse wird ein numerisches System des tatsächlichen Mastes beispielsweise in einem Rechner kalibriert. Dies geschieht insbesondere durch Justierung der Steifigkeit einer virtuell angenommenen Drehfeder. Der Drehfeder werden also alle steifigkeitsmindernd wirkenden Einflüsse zugewiesen. Es spielt dabei keine Rolle, an welcher Stelle im System
- 10 z.B. Schädigungen vorhanden sind. Detaillierte Vergleichsrechnungen (vereinfachtes System mit kalibrierter Drehfeder und detaillierte Systeme mit Schädigungen an verschiedenen Stellen des Mastes) haben gezeigt, dass dieses Vorgehen ausreichend genau ist, um die Kopfverschiebungen an dem so kalibrierten numerischen System zutreffend zu berechnen.
- 15 Für die Messungen werden die Masten beispielsweise manuell angeregt, und es werden die Systemantworten mit geeigneten Sensoren gemessen. Die Auswertung dieser Daten kann nach Eingabe aller notwendigen Parameter (z.B. Geometrie des Mastes, Material etc.) automatisch in einem Rechner durch eine entsprechende Software durchgeführt werden.
- 20 Eine solche Software berechnet die maximalen Verschiebungen bzw. Auslenkungen am Mastkopf für verschiedene Lastfälle. Eine solche Verschiebung wird dann zur Bewertung herangezogen. Es werden bei Holzmasten mehrere Klassen, vorzugsweise 4 Klassen unterschieden.
- Das Verfahren ist für eine Vielzahl von Masttypen und Mastmaterialien
- 25 geeignet.

2. Literatur

- [1] Petersen, Ch. : *Dynamik der Baukonstruktionen*; Neubiberg, 1996
- [2] EN 40, Lichtmaste, Teile 3.1-3.3, DIN, 2005
- [3] VDE 0210, Freileitungen über AC-45 kV, Teile 1-12, 2007
- 5 [4] DIN 1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 4 Windlasten, DIN 2005
- [5] prEN 14229:2007, Structural timber – Wood Poles for overhead lines, European Standard, Technical Committee CEN/TC 124, 2007
- [6] Neuhaus Helmut, *Lehrbuch des Ingenieurholzbaus*, B. G. Teubner 1994
- 10 [7] Neuhaus, H.: Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit, Diss., in: technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Nr 81-8, Inst. für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität-Bochum, 1981
- [8] Neuhaus, H.: Über das elastische Verhalten von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit, *Holz als Roh- und Werkstoff* 41 (1983), S. 21-25
- 15 [9] Neuhaus, H.: Über das elastische Verhalten von Holz und Kunststoffen, in: Strathmann, L. (Hrsg.), *Ingenieurholzbau, Fachtagung*, FB Bauingenieurwesen, Münster: FH, 1987
- [10] Noack D., Geissen, A.: Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf den E-Modul des Holzes im Gefrierbereich, *Holz als Werkstoff* 34 (1976), S. 55-62
- 20 [11] Möhler, K.: Grundlagen der Holz-Hochbaukonstruktionen, in: Götz K.-H., Hoor D., Möhler K., Natterer J.; *Holzbauatlas*, München Inst. Für internationale Architektur-Dokumentation, 1980
- 25 [12] David W. Green, Jerrold E. Winandy, and David E. Kretschmann: *Mechanical Properties of Wood*, Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material, .Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.

Patentansprüche

1. Verfahren für die Prüfung der Standsicherheit eines stehenden Systems, insbesondere eines Mastes, bei dem eine Eigenfrequenz eines zu prüfenden Mastes ermittelt wird,
5
dadurch gekennzeichnet, dass

mit Hilfe der Eigenfrequenz ein Maß für die Standsicherheit rechnerisch und/ oder numerisch ermittelt wird und anhand des
10
ermittelten Maßes die Standsicherheit beurteilt wird.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, bei dem die Auslenkung des Mastes aufgrund einer externen Belastung als Maß für die Standsicherheit ermittelt wird.
15
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung von Systemparametern des Mastes ermittelt wird.
- 20 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung der Gewichte ermittelt, die ein Mast einschließlich des Eigengewichtes des Mastes zu tragen hat.
- 25 5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung von wenigstens einer Höhe eines Gewichtes ermittelt wird, die ein zu prüfender Mast zu tragen hat.

30

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung von wenigstens einer Größe und/ oder Form eines Gewichtes ermittelt wird, die ein zu prüfender Mast zu tragen hat.

5

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung eines temperaturabhängigen Seildurchhangs ermittelt wird.

- 10 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung der generalisierten Masse des Mastes ermittelt wird und zwar insbesondere gemäß

$$15 \quad \Omega^2 \sim \frac{1}{\text{generalisierte Masse}}$$

mit $\Omega = 2\pi \cdot$ Eigenfrequenz f_e ,

20 besonders bevorzugt gemäß

$$\Omega^2 \sim \frac{C_{\text{gen}}}{\text{generalisierte Masse}}$$

25 mit $C_{\text{gen}} =$ generalisierte Steifigkeit.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung der Materialfeuchtigkeit des Mastes ermittelt wird.

30

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit unter Berücksichtigung der Alters des Mastes ermittelt wird.

35

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit eines Mastes mit Beseilung unter

Berücksichtigung von Kräften ermittelt wird, die durch die Seile auf den Mast ausgeübt werden.

- 5 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit eines Mastes mit Strom leitender Beseilung unter Berücksichtigung der elektrischen Leistung erfolgt, die durch die Beseilung geleitet wird.
- 10 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Standsicherheit eines Mastes mit Strom leitender Beseilung eine Auslenkung des Mastes aufgrund einer externen Belastung ist, die senkrecht zum Verlauf eines Seils, welches vom Mast getragen wird, erfolgt.
- 15 14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem für die Ermittlung einer Eigenfrequenz eines zu prüfenden Mastes zunächst solche Schwingungen aufgezeichnet werden, die aus natürlichen Umwelteinflüssen herrühren, und anschließend solche Schwingungen aufgezeichnet werden, die aus einer
20 künstlichen Anregung resultieren.
- 15 15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem für die Ermittlung einer Eigenfrequenz des zu prüfenden Mastes nur solche Schwingungen aufgezeichnet werden, die eine
25 vorgegebene Obergrenze für eine Schwingungsfrequenz nicht überschreiten.
- 30 16. Verfahren insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Drehsteifigkeit eines zu prüfenden Mastes ermittelt wird, um basierend auf diesem Ergebnis die Standfestigkeit des Mastes zu beurteilen.

17. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Schritte mit einer so programmierten Recheneinheit, dass nach Eingabe von benötigten Eingangsinformationen und/ oder Systemparametern automatisiert ein gesuchtes Maß für die Standsicherheit ermittelt wird.
18. Vorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch mit Beschleunigungssensoren und Mitteln zur Übergabe von durch die Sensoren ermittelte Schwingungen an die Recheneinheit.
19. Vorrichtung nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche mit Feuchtigkeitssensoren zur Messung der Materialfeuchte eines Mastes sowie Mitteln zur Übergabe von Materialfeuchtwerten an die Recheneinheit.
20. Vorrichtung nach einem der drei vorhergehenden Ansprüche mit Ausgabemitteln für die Ausgabe eines Prüfergebnisses über die Standsicherheit eines Mastes.

20

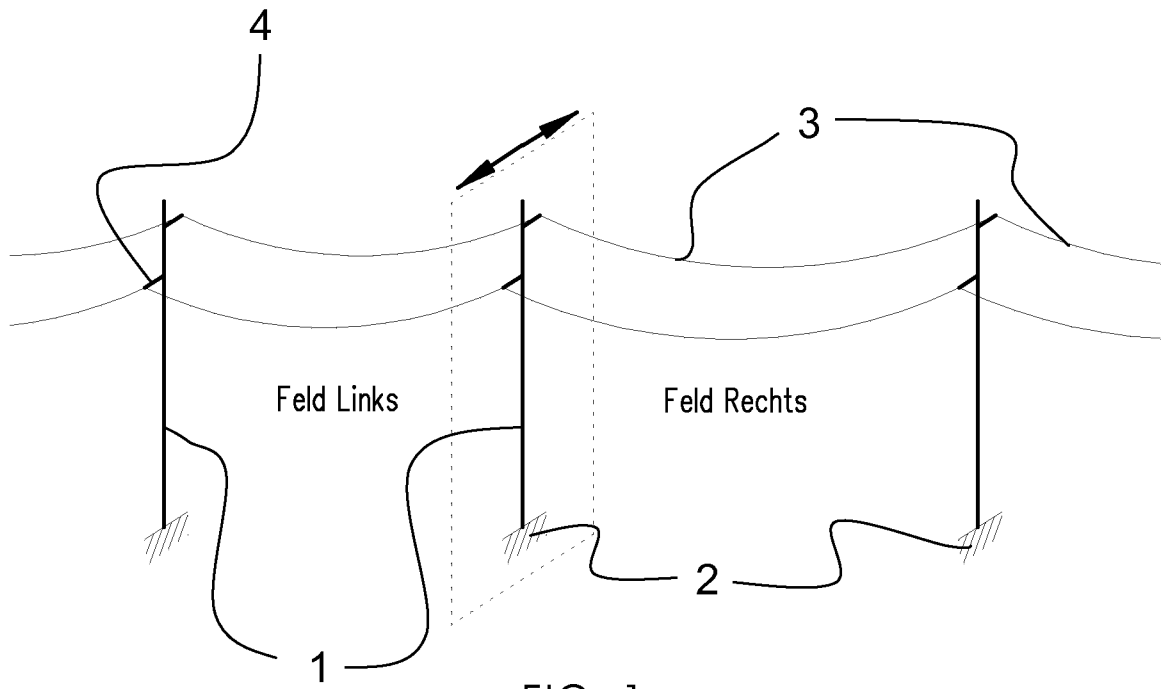


FIG. 1

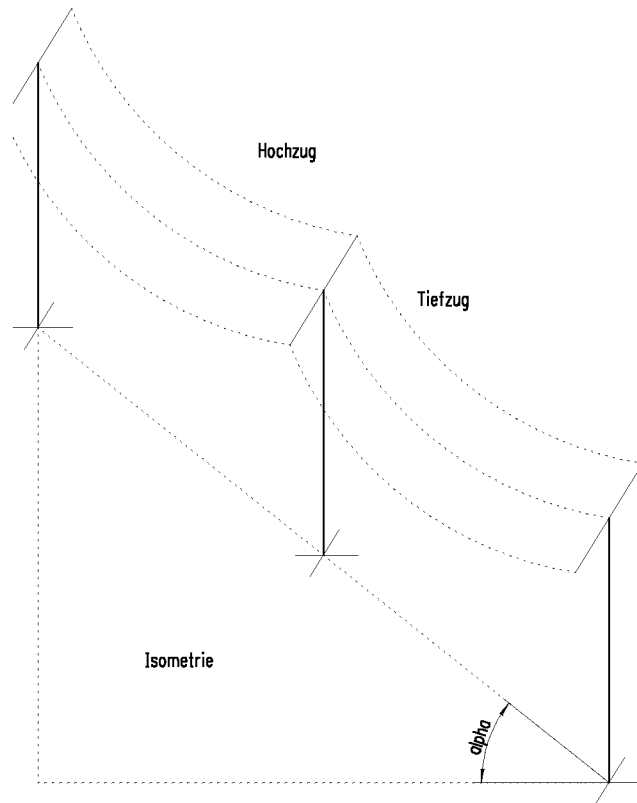


Fig. 2a

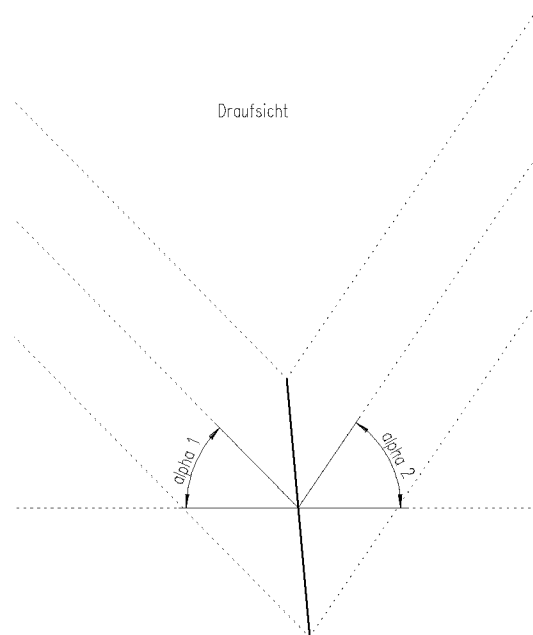


Fig. 2b

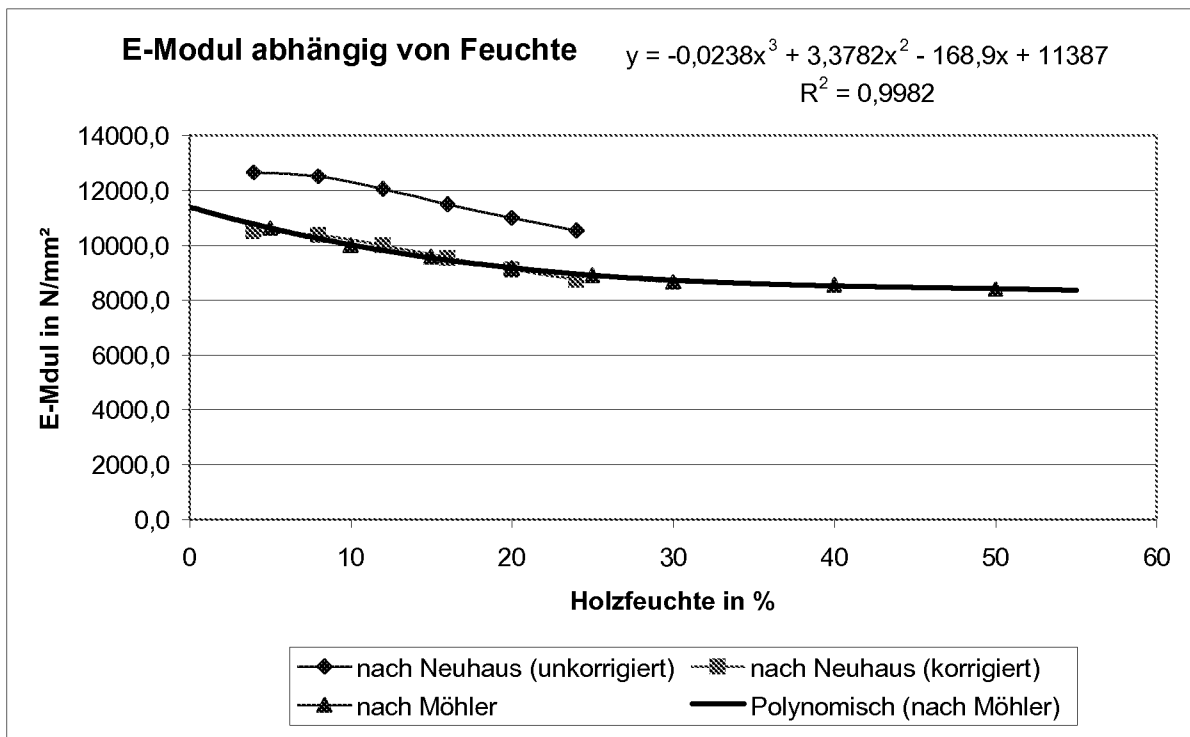


FIG. 3

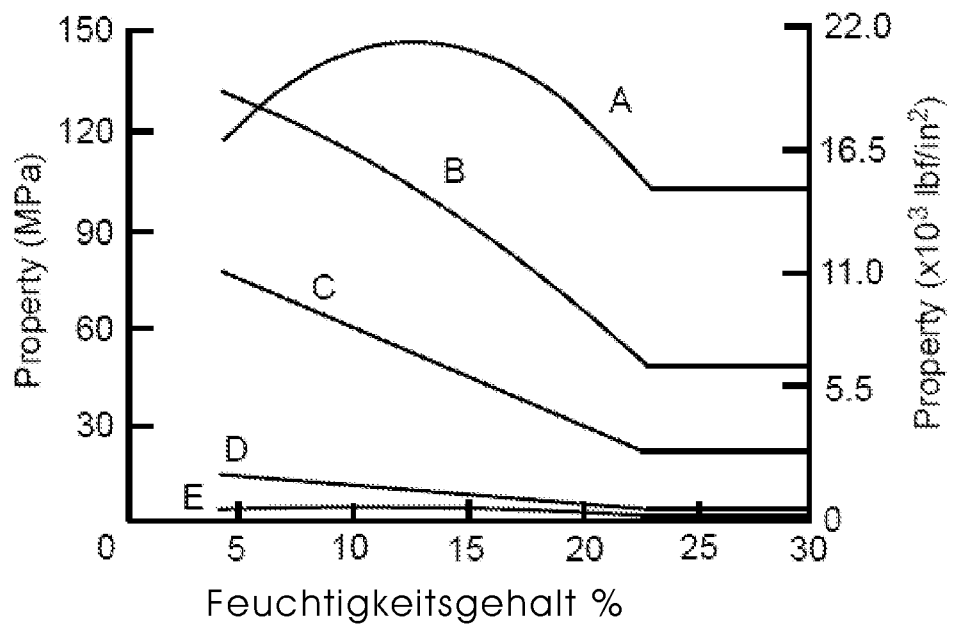


FIG. 4

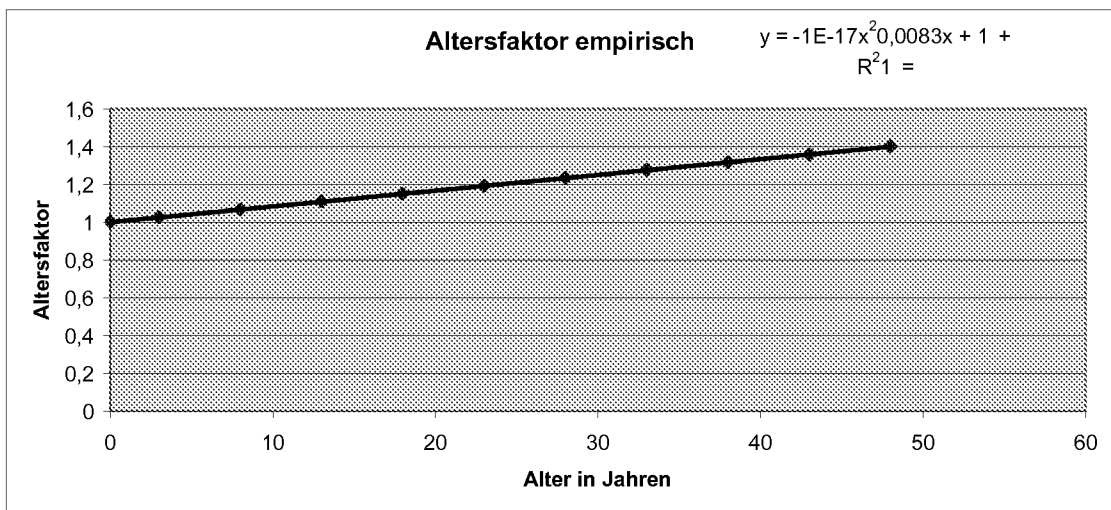


FIG. 5

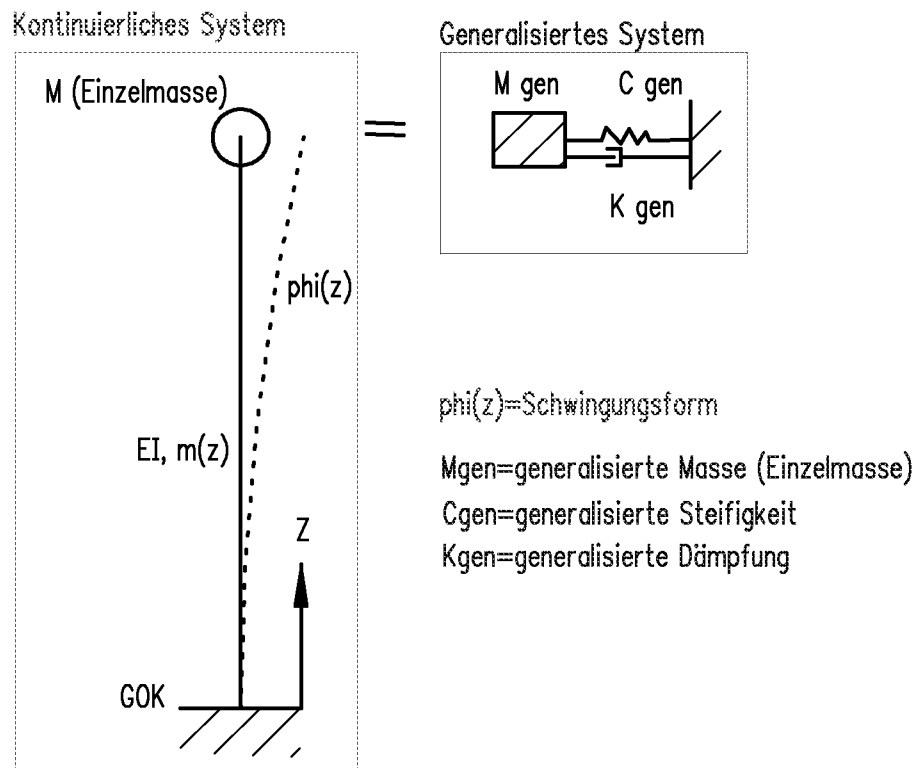


FIG. 6

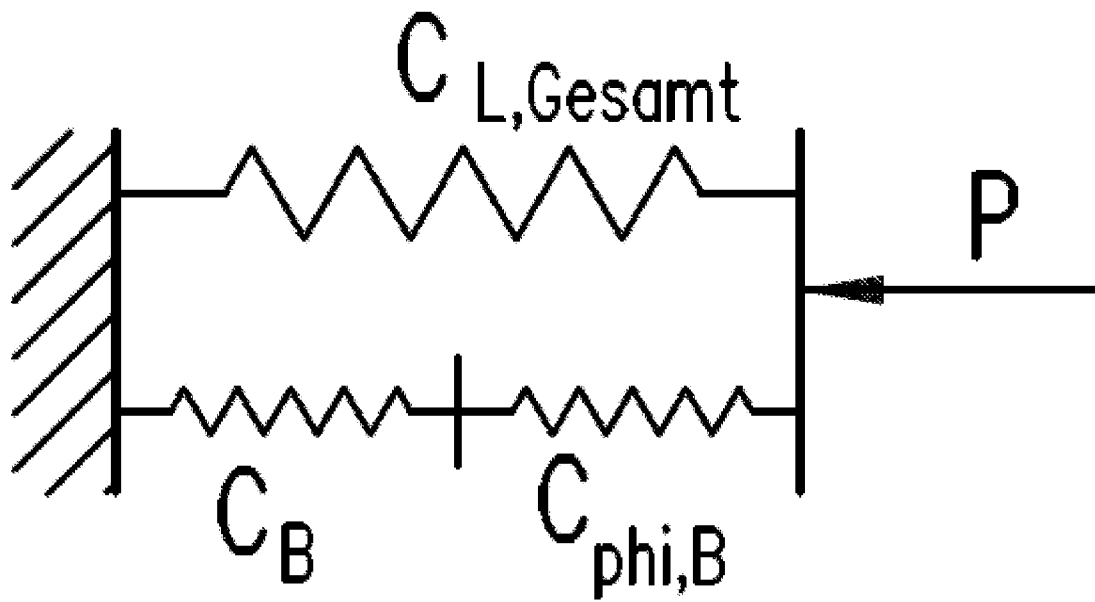


FIG. 7a

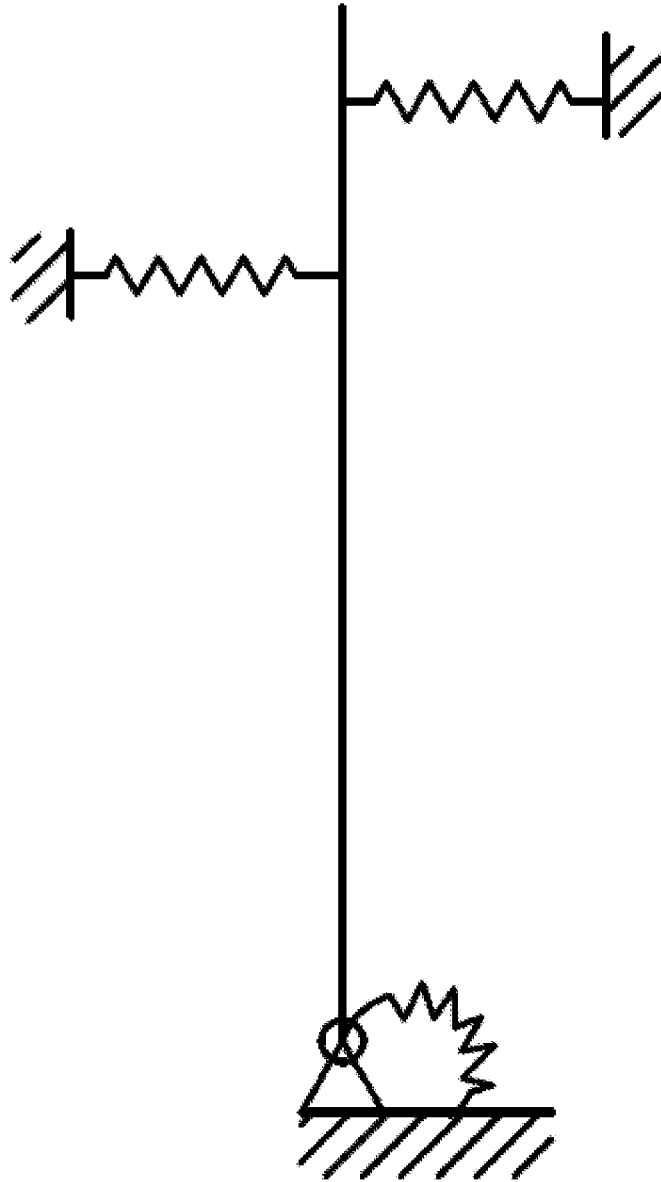


FIG. 7b

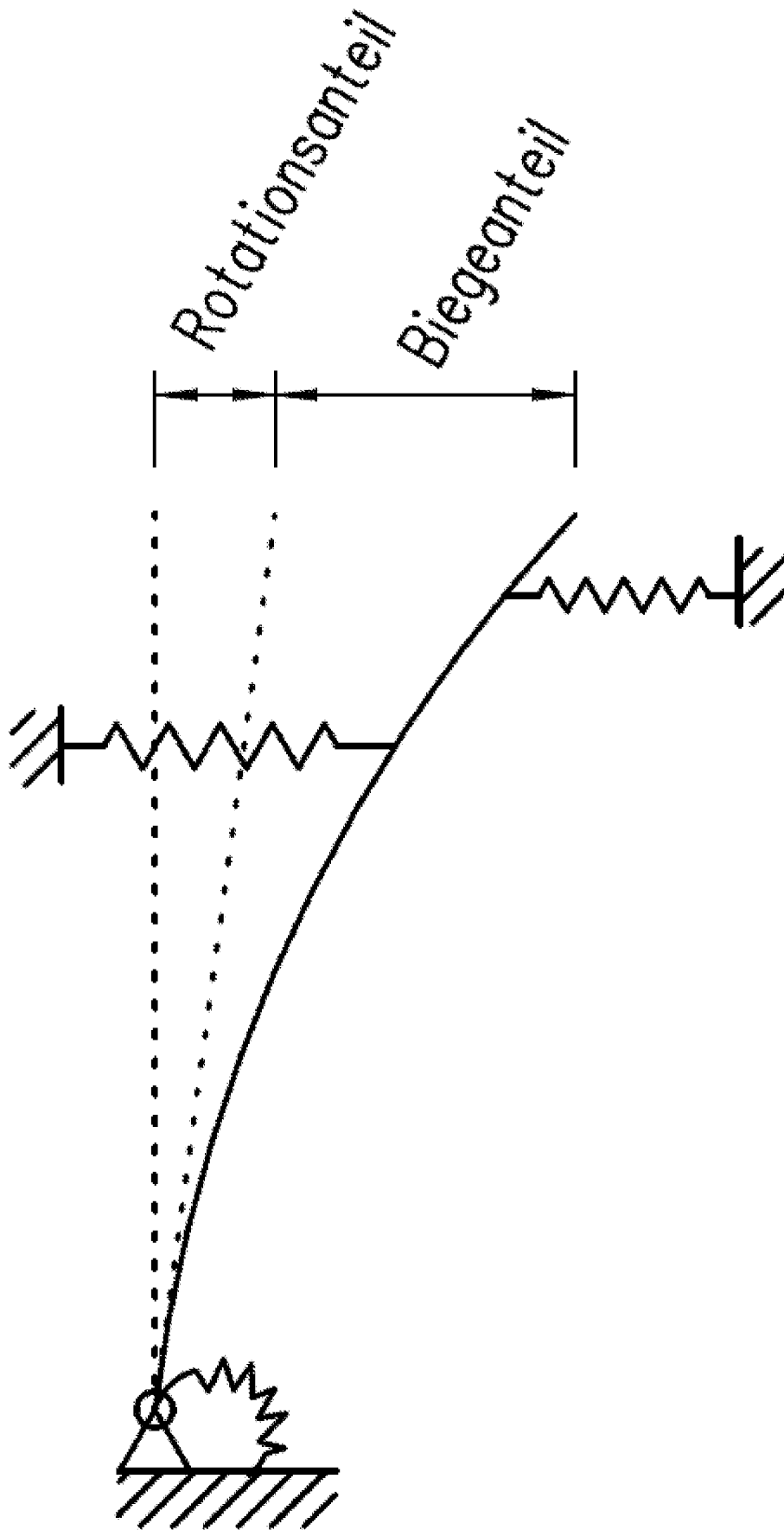


FIG. 7c

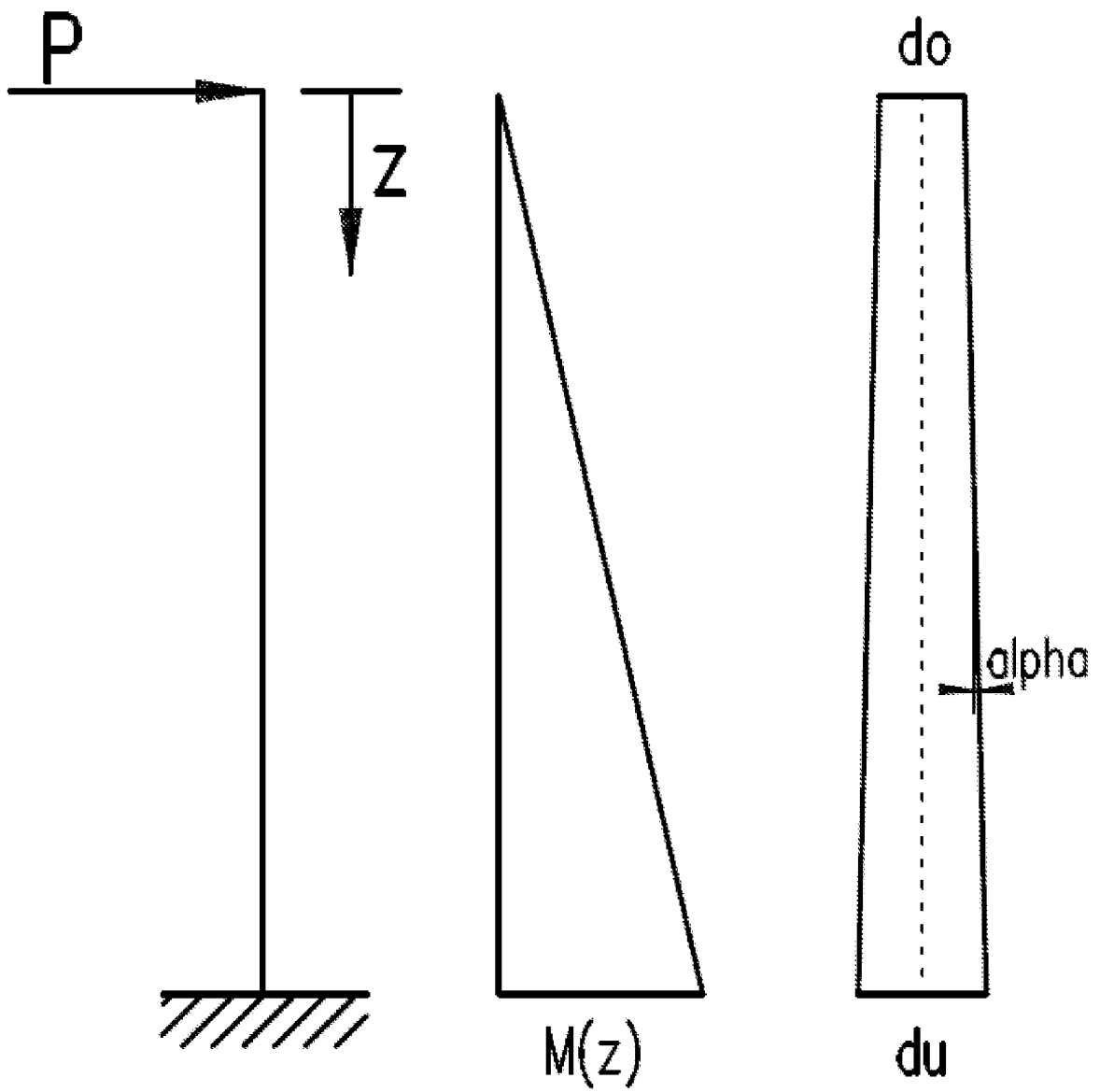


FIG. 8

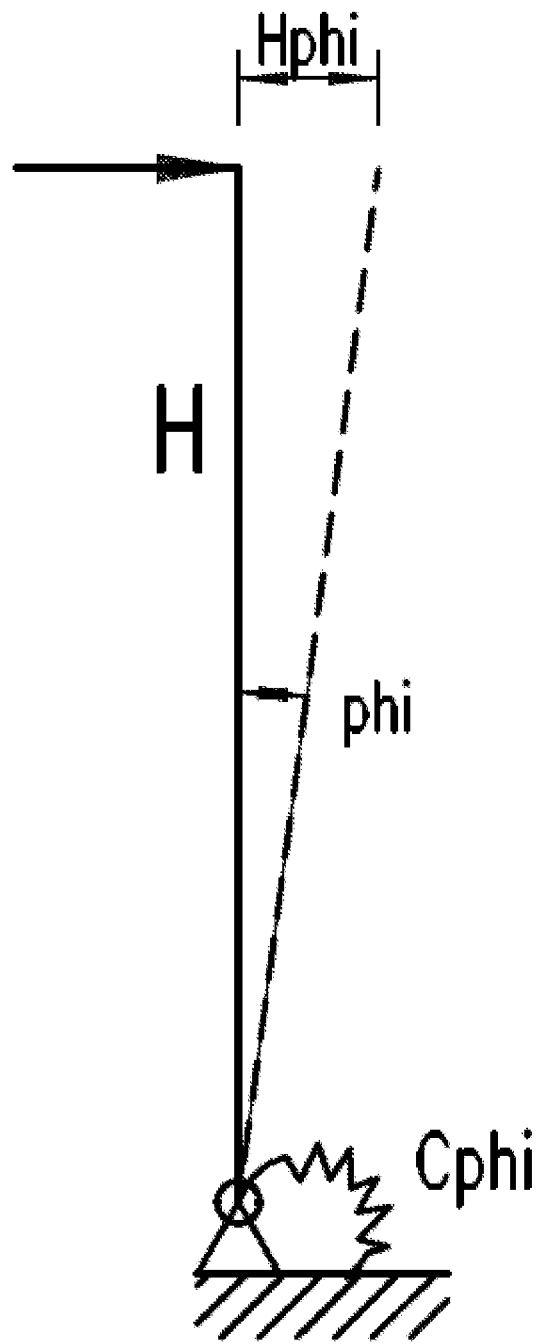


FIG. 9

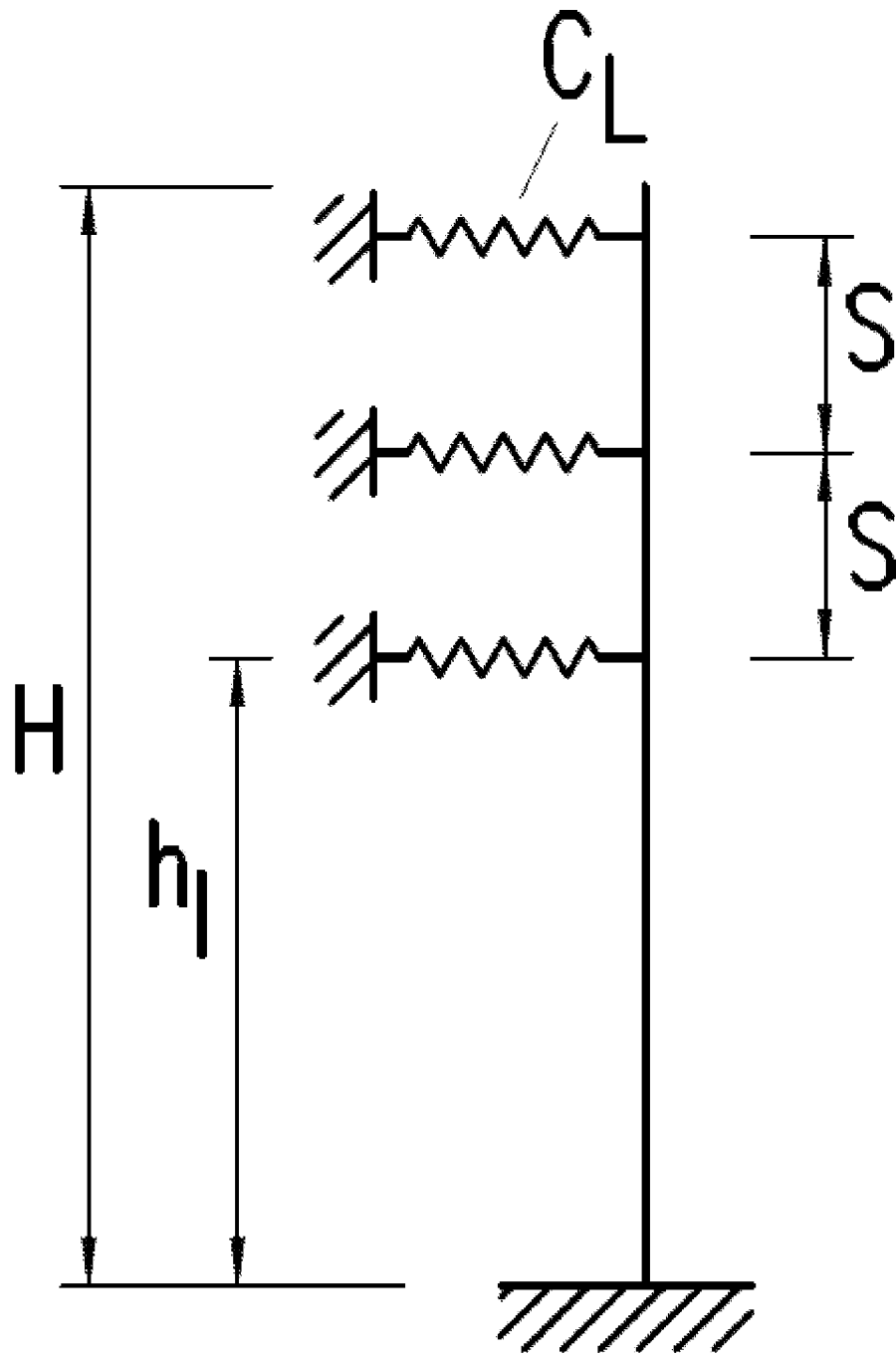


FIG. 10

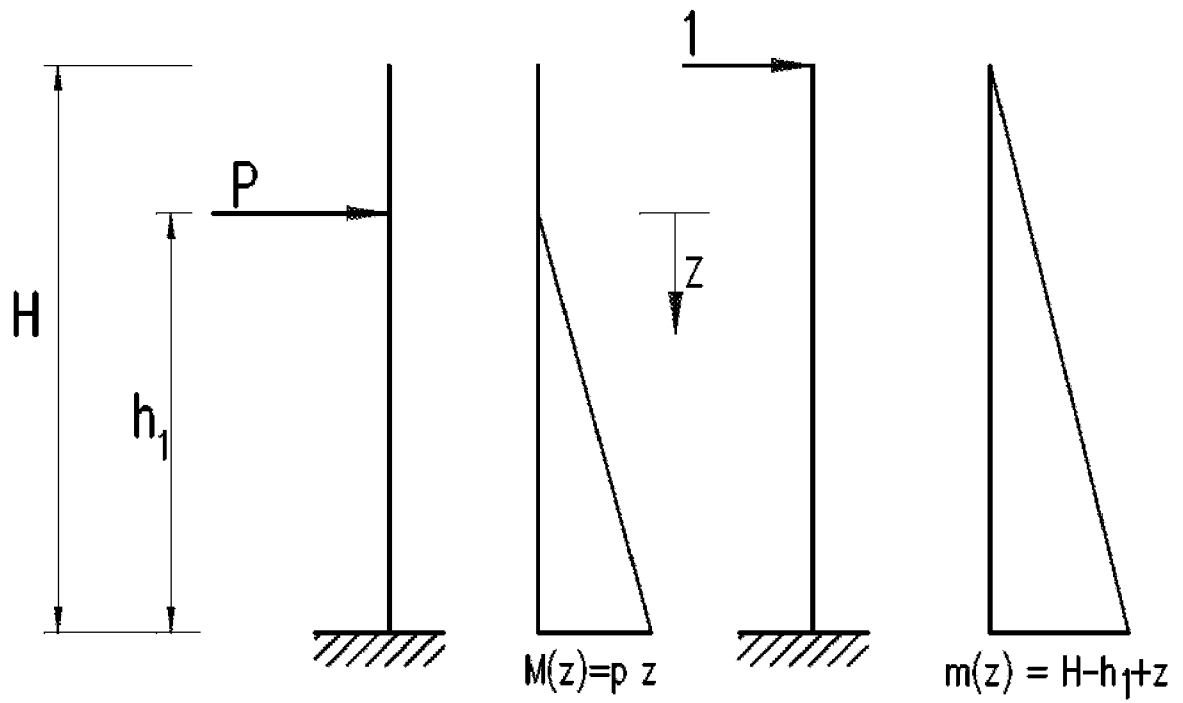


FIG. 11

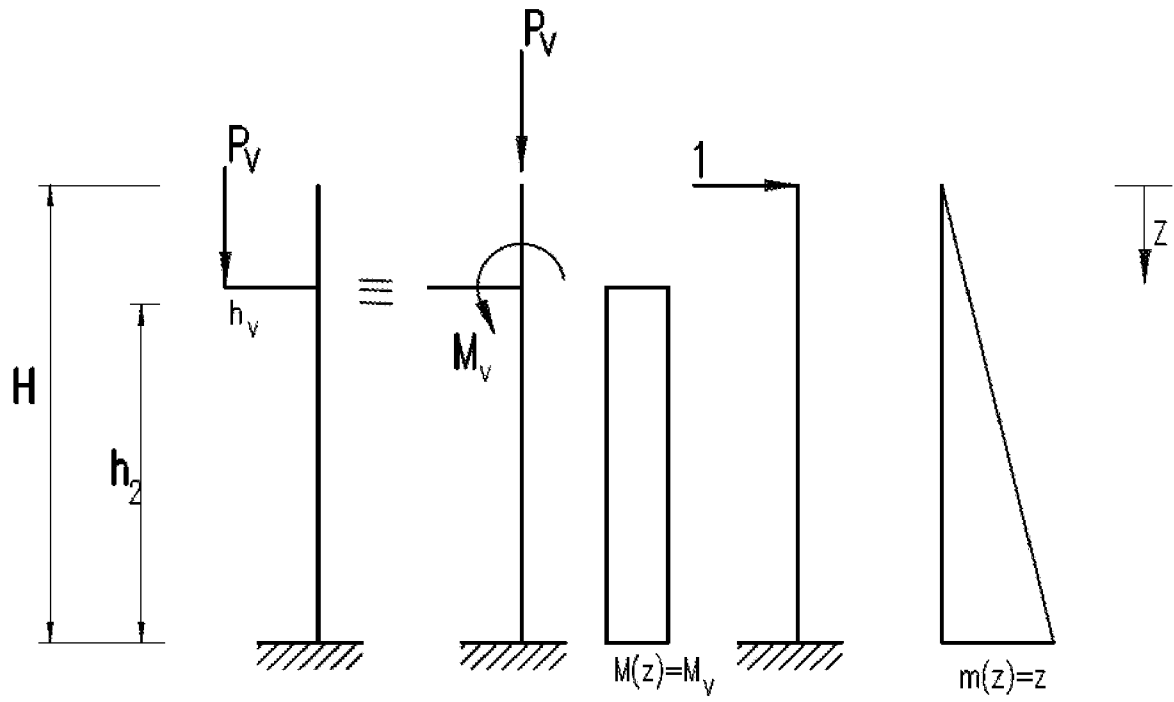


FIG. 12

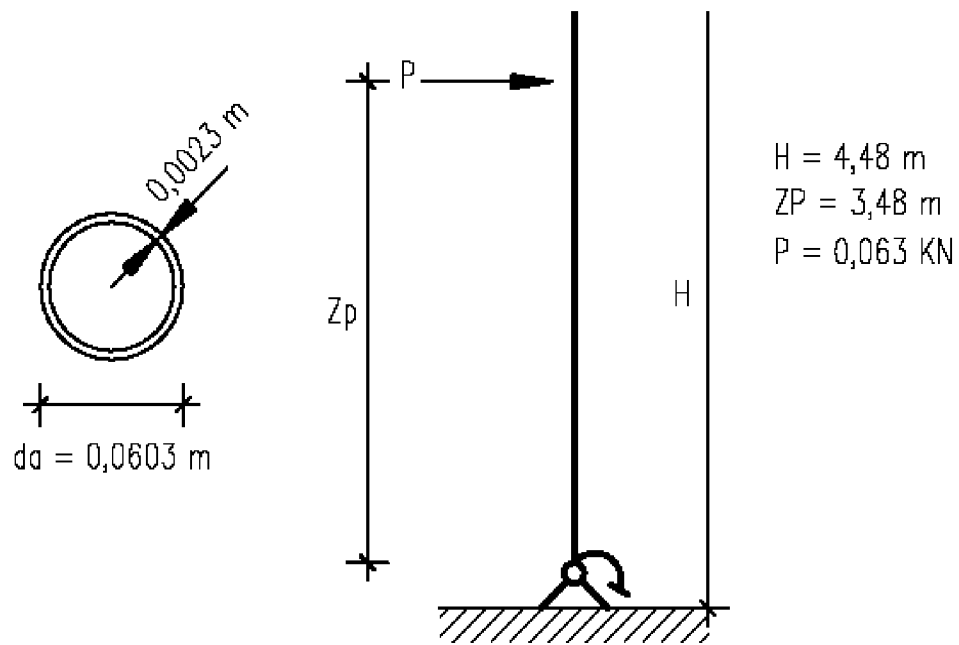


FIG. 13

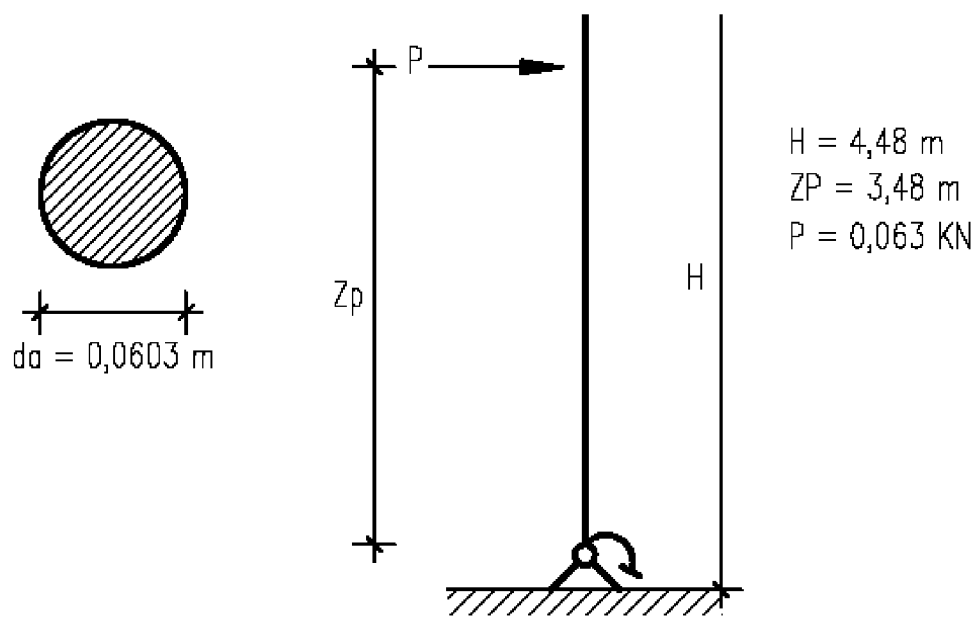


FIG. 14

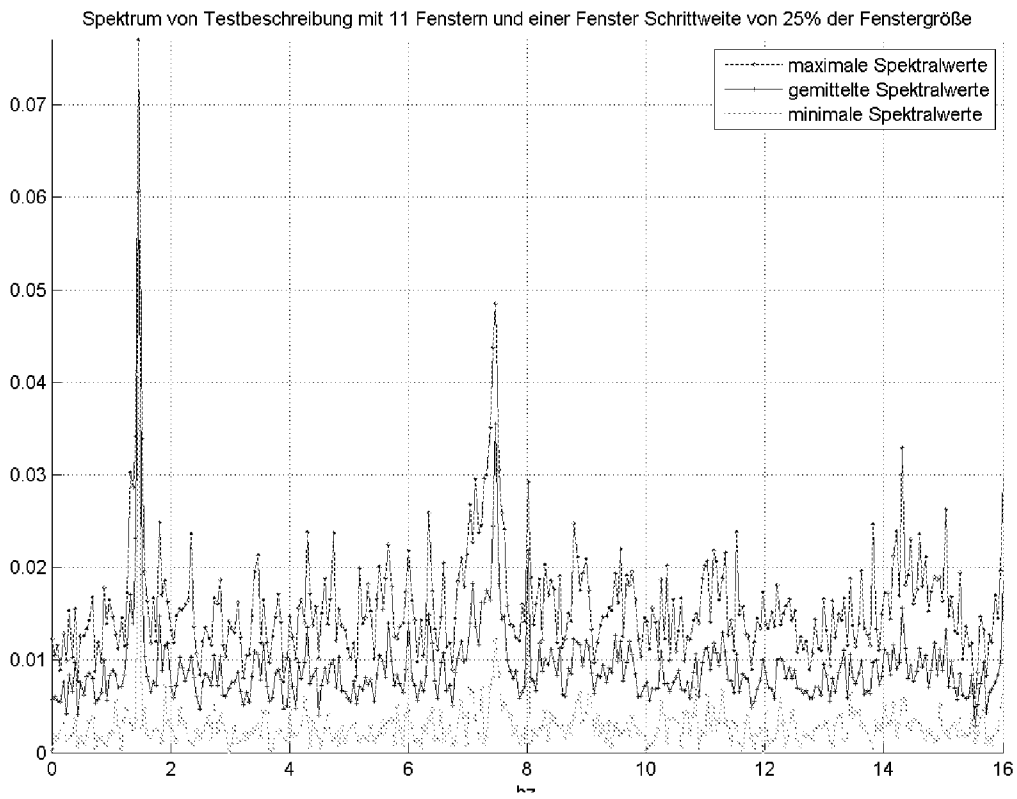


Fig. 15

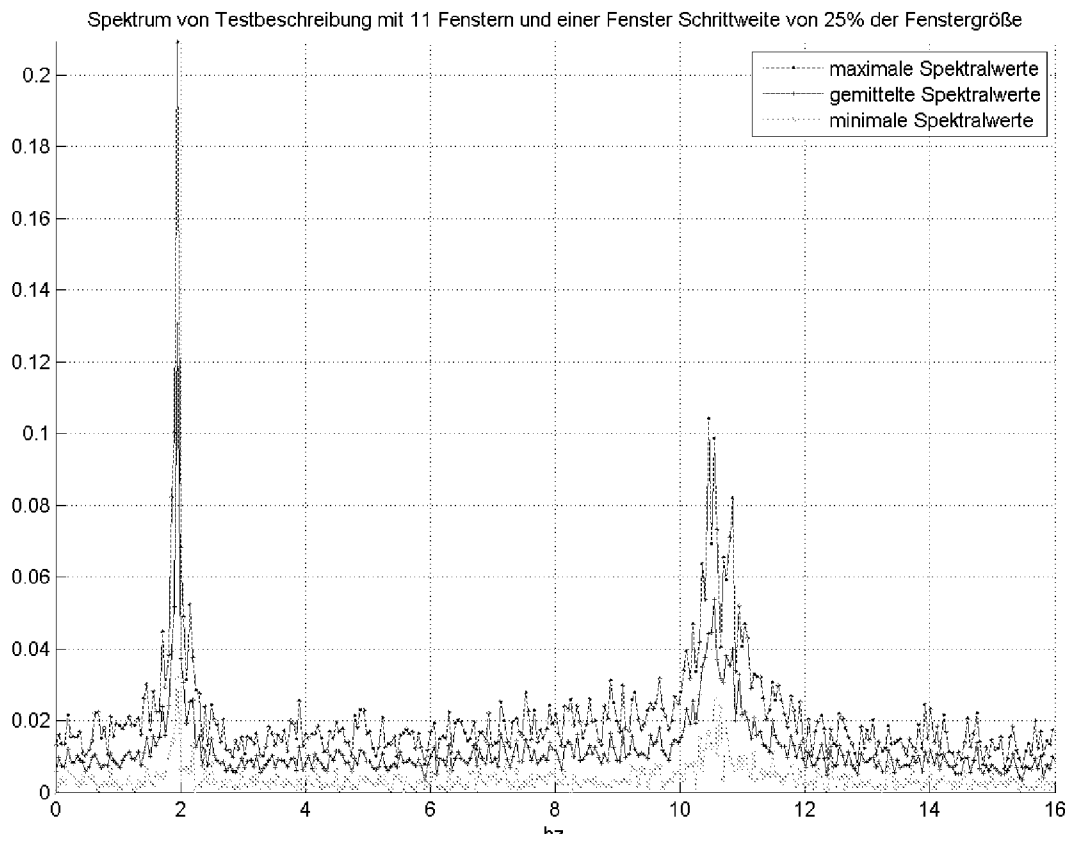


FIG. 16

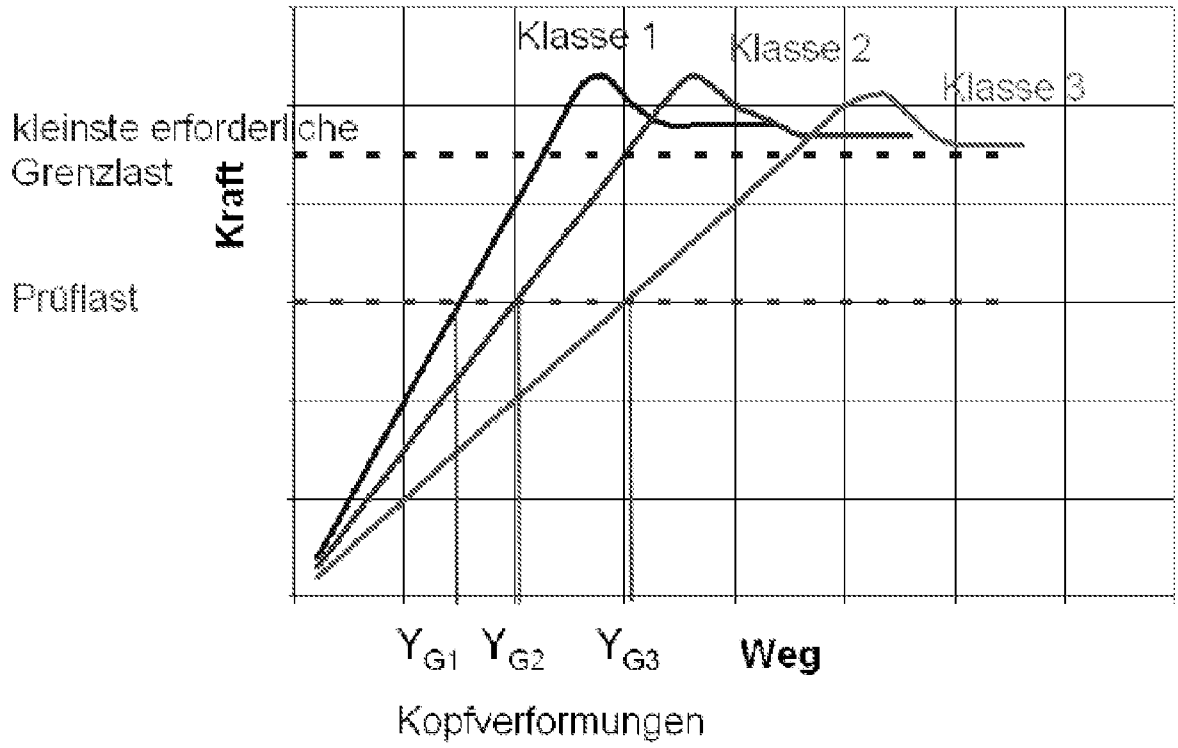


FIG. 17

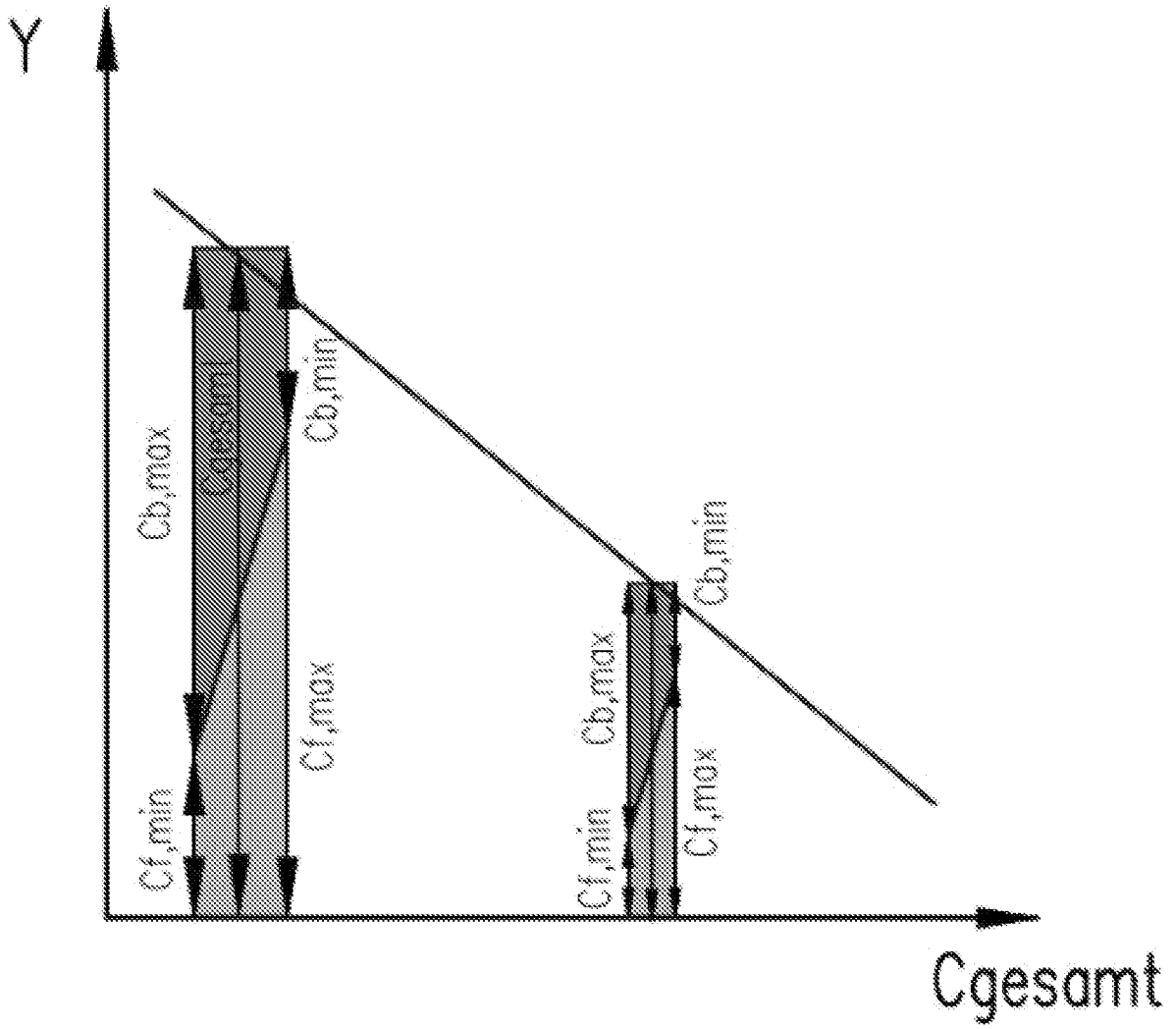


FIG. 18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/056052

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
INV. G01M5/00	G01M7/00	G01H13/00 G01N29/04
ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01M G01H G01N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0 379 622 A1 (POWERTECH LABS INC [CA]) 1 August 1990 (1990-08-01) page 3, line 41 - page 6, line 57; figures 1-4	1-20
X	WO 2007/052239 A2 (TORINO POLITECNICO [IT]; UNIV DEGLI STUDI TORINO [IT]; FONDAZIONE TORI) 10 May 2007 (2007-05-10) page 6, line 1 - page 13, line 12; figures 1-6	1-20
X	DE 100 08 201 A1 (REINERS CHRISTA [DE]) 30 August 2001 (2001-08-30) column 4, line 3 - column 5, line 48; figures 1-5	1-20
	----- -/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. "&" document member of the same patent family	
Date of the actual completion of the international search 24 August 2010	Date of mailing of the international search report 01/09/2010	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Gruss, Christian	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International application No
 PCT/EP2010/056052

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 1 070 961 A1 (BRITISH TELECOMM [GB]) 24 January 2001 (2001-01-24) paragraph [0012] - paragraph [0030]; figures 1-5 -----	1-20
X	EP 1 630 537 A1 (REINERS CHRISTA [DE]) 1 March 2006 (2006-03-01) paragraph [0021] - paragraph [0027]; figures 1-3 -----	1-20
X	DE 10 2005 038033 A1 (LGA BETEILIGUNGS GMBH [DE]) 15 February 2007 (2007-02-15) paragraph [0071] - paragraph [0100]; figures 1-4 -----	1-20
X	FR 2 876 797 A1 (SANDOZ JEAN LUC [CH]) 21 April 2006 (2006-04-21) page 3, line 8 - page 7, line 7 -----	1-20
X	DE 195 31 858 A1 (DEUTSCHE TELEKOM AG [DE]) 6 March 1997 (1997-03-06) column 3, line 41 - column 9, line 14; figures 1-6 -----	1-20
A	US 6 505 130 B1 (SPRINGER III PAUL LEBARON [US] ET AL) 7 January 2003 (2003-01-07) the whole document -----	1-20
A	US 2003/128149 A1 (MICELI GILBERT F [US] ET AL) 10 July 2003 (2003-07-10) the whole document -----	1-20
A	CA 2 484 456 A1 (AIR2 LLC [US]) 12 April 2006 (2006-04-12) the whole document -----	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No PCT/EP2010/056052

Patent document cited in search report	Publication date	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0379622	A1	01-08-1990	CA 1249664 A1	31-01-1989
WO 2007052239	A2	10-05-2007	CA 2623402 A1 EP 1943497 A2 US 2008255806 A1	10-05-2007 16-07-2008 16-10-2008
DE 10008201	A1	30-08-2001	NONE	
EP 1070961	A1	24-01-2001	NONE	
EP 1630537	A1	01-03-2006	DE 102004041061 A1	16-03-2006
DE 102005038033	A1	15-02-2007	EP 1913356 A1 WO 2007017090 A1 US 2008223134 A1	23-04-2008 15-02-2007 18-09-2008
FR 2876797	A1	21-04-2006	CA 2584043 A1 EP 1807695 A2 WO 2006042996 A2 US 2008028836 A1	27-04-2006 18-07-2007 27-04-2006 07-02-2008
DE 19531858	A1	06-03-1997	NONE	
US 6505130	B1	07-01-2003	US 2003074145 A1	17-04-2003
US 2003128149	A1	10-07-2003	US 2001035836 A1	01-11-2001
CA 2484456	A1	12-04-2006	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/056052

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G01M5/00 G01M7/00 G01H13/00 G01N29/04
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G01M G01H G01N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 0 379 622 A1 (POWERTECH LABS INC [CA]) 1. August 1990 (1990-08-01) Seite 3, Zeile 41 - Seite 6, Zeile 57; Abbildungen 1-4	1-20
X	WO 2007/052239 A2 (TORINO POLITECNICO [IT]; UNIV DEGLI STUDI TORINO [IT]; FONDAZIONE TORI) 10. Mai 2007 (2007-05-10) Seite 6, Zeile 1 - Seite 13, Zeile 12; Abbildungen 1-6	1-20
X	DE 100 08 201 A1 (REINERS CHRISTA [DE]) 30. August 2001 (2001-08-30) Spalte 4, Zeile 3 - Spalte 5, Zeile 48; Abbildungen 1-5	1-20
	-/--	

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- | | |
|--|---|
| <p>* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen</p> <p>"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist</p> <p>"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)</p> <p>"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> | <p>*T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>*X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>*Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>*G* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist</p> |
|--|---|

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
24. August 2010	01/09/2010
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Gruss, Christian

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/056052

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 1 070 961 A1 (BRITISH TELECOMM [GB]) 24. Januar 2001 (2001-01-24) Absatz [0012] - Absatz [0030]; Abbildungen 1-5	1-20
X	EP 1 630 537 A1 (REINERS CHRISTA [DE]) 1. März 2006 (2006-03-01) Absatz [0021] - Absatz [0027]; Abbildungen 1-3	1-20
X	DE 10 2005 038033 A1 (LGA BETEILIGUNGS GMBH [DE]) 15. Februar 2007 (2007-02-15) Absatz [0071] - Absatz [0100]; Abbildungen 1-4	1-20
X	FR 2 876 797 A1 (SANDOZ JEAN LUC [CH]) 21. April 2006 (2006-04-21) Seite 3, Zeile 8 - Seite 7, Zeile 7	1-20
X	DE 195 31 858 A1 (DEUTSCHE TELEKOM AG [DE]) 6. März 1997 (1997-03-06) Spalte 3, Zeile 41 - Spalte 9, Zeile 14; Abbildungen 1-6	1-20
A	US 6 505 130 B1 (SPRINGER III PAUL LEBARON [US] ET AL) 7. Januar 2003 (2003-01-07) das ganze Dokument	1-20
A	US 2003/128149 A1 (MICELI GILBERT F [US] ET AL) 10. Juli 2003 (2003-07-10) das ganze Dokument	1-20
A	CA 2 484 456 A1 (AIR2 LLC [US]) 12. April 2006 (2006-04-12) das ganze Dokument	1-20

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/056052

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0379622	A1	01-08-1990	CA 1249664 A1	31-01-1989
WO 2007052239	A2	10-05-2007	CA 2623402 A1	10-05-2007
			EP 1943497 A2	16-07-2008
			US 2008255806 A1	16-10-2008
DE 10008201	A1	30-08-2001	KEINE	
EP 1070961	A1	24-01-2001	KEINE	
EP 1630537	A1	01-03-2006	DE 102004041061 A1	16-03-2006
DE 102005038033	A1	15-02-2007	EP 1913356 A1	23-04-2008
			WO 2007017090 A1	15-02-2007
			US 2008223134 A1	18-09-2008
FR 2876797	A1	21-04-2006	CA 2584043 A1	27-04-2006
			EP 1807695 A2	18-07-2007
			WO 2006042996 A2	27-04-2006
			US 2008028836 A1	07-02-2008
DE 19531858	A1	06-03-1997	KEINE	
US 6505130	B1	07-01-2003	US 2003074145 A1	17-04-2003
US 2003128149	A1	10-07-2003	US 2001035836 A1	01-11-2001
CA 2484456	A1	12-04-2006	KEINE	