

GUTACHTEN

Eignung von Kompaktmasten im deutschen Übertragungsnetz unter Berücksichtigung des §49 EnWG und der 26. BimSchV

Beauftragt durch

Bundesverband Kompaktleitung e.V.
Friedrichstraße 90
D-10117 Berlin

Erstellt durch

Ingenieurbüro Sumereder e.U.
office@sumederer.eu
Rudolfstraße 198
A-8047 Graz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sumereder
FH-Professor an der FH Joanneum
Privatdozent an der TU Graz

Inhalt des Gutachtens

1	Einleitende Betrachtungen.....	3
1.1	Begriffsdefinition und Inhalt des Gutachtens	4
1.2	Vorliegende Berichte für die Erstellung des Gutachtens	5
2	Kompaktmastleitungen	6
2.1	Ausführungsformen von Kompaktmasten: Aufbau, Design, Materialien, Ausführungsformen	6
2.2	Vergleich mit konventionellen Stahlgittermasten und gängigen Mastbildern (Donau und Tonne)	6
2.3	Eingesetzte Kompaktmasten im Höchstspannungsnetz in Europa, Referenzleitungen	7
2.4	Referenzprojekte mit vergleichbarer Ausführung der Masten im Höchstspannungsnetz	9
3	Technische, ökologische und wirtschaftliche Bewertung von Kompaktmastleitungen.....	13
3.1	Elektromagnetische Felder.....	13
3.2	Standicherheit und mechanische Belastungen	14
3.3	Betriebsführung und Instandhaltung	15
3.4	Grundinanspruchnahme und Leitungserrichtung.....	16
3.5	Geräuschemission	17
3.6	Ökologische Bewertung hinsichtlich Fauna, Flora und möglicher Umweltbeeinflussungen im unmittelbaren Nahbereich der Leitung.....	18
3.7	Raumplanerische Aspekte und Akzeptanz unterschiedlicher Leitungen seitens der Bevölkerung bzw. Anrainer und Betreiber	19
3.8	Wirtschaftliche Bewertung.....	20
4	Bewertung hinsichtlich „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und „Stand der Technik“ ..	22
4.1	Gesetzliche Anforderungen gemäß §49 EnWG und der 26. BImSchV	22
4.2	Zum Begriff „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und technische Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.....	22
4.3	Zum Begriff „Stand der Technik“ und Minimierungsgebot.....	25
4.4	Bedeutung für den Einsatz von Kompaktmasten.....	29
5	Zusammenfassende Betrachtung.....	31
5.1	Technische, raumplanerische und ökologische Aspekte.....	31
5.2	Aspekte hinsichtlich §49 EnWG und 26. BImSchV	31
5.3	Eignung der Kompaktmasten für den Einsatz im deutschen Übertragungsnetz	31
6	Literatur	33

1 Einleitende Betrachtungen

In der Energieübertragungskette bilden Stromleitungen das Bindeglied zwischen den Energieeinspeisepunkten in der Nähe von dezentralen Kraftwerken einerseits und den Lastschwerpunkten bei Industriestandorten und in Ballungszentren andererseits. Erst durch ein elektrisches Netz ist eine stabile Energieübertragung und Netzregelung möglich. In Deutschland werden Höchstspannungsleitungen in der Spannungsebene 380kV seit 60 Jahren betrieben, wobei vorerst ausschließlich Freileitungen im Einsatz waren, seit etwa 40 Jahren auch 380kV Kabel. Innovative Technologien wie die Gasisolierte Rohrleitung (GIL) werden mittlerweile auch bis zur 380kV-Netzebene für topologisch kritische Bereiche eingesetzt. Die Auflagen und Verfahren zur Errichtung neuer und unbestritten notwendiger Höchstspannungsleitungen sind hoch bzw. aufwendig und damit kostenintensiv. Die Netzbetreiber sind daher bestrebt Leitungstechnologien einzusetzen, die einerseits technologisch bewährt sind und damit die allgemein anerkannten Regeln der Technik erfüllen. Andererseits ist es notwendig zukunftsorientierten Technologien offen gegenüber zu stehen, um am Stand der Technik zu bleiben. Im Bereich der Freileitungstechnologie wird in Deutschland der Stahlgittermast in unterschiedlichsten Bauweisen als allgemein anerkannter Standard angesehen. Daneben existiert die sogenannte Kompaktmastleitung, die in Deutschland bei 110kV Hochspannungsnetzen verstärkt eingesetzt werden, da diese Bauart viele Vorteile gegenüber dem Stahlgittermast bietet.

Der Kompaktmast stellt eine innovative Bauform dar, seitens der Übertragungsnetzbetreiber ist eine kritische Betrachtung daher verständlich. In vorangegangenen Diskussionen und Veröffentlichungen waren häufig folgende Argumente gegen die Bauform Kompaktmast auszugsweise zu finden:

Quelle [1]:

Bei einer zunehmenden kompakteren Anordnung können sich jedoch witterungsbedingt Geräuschmissionen der Leitung erhöhen.

Im Allgemeinen werden bei der Verwendung von Kompaktmasten um den Faktor 1,5 bis 3 erhöhte Investitionskosten im Vergleich zu herkömmlichen Gittermasten erwartet. In Deutschland liegen bislang noch keine langfristigen Erfahrungen mit kompakten Mast-/Leitungsbauweisen auf der Höchstspannungsebene vor.

Die elektrischen Parameter von Trassen in Kompaktbauweise bewirken wegen der modifizierten Leiteranordnung einen gegenüber konventionellen Freileitungssystemen veränderten Blindleistungsbedarf (je nach konkreter Ausführungsform der Kompakt-Freileitung und des Betriebspunkts).

Durch das kompakte Design kann unter Umständen bei Wartungsarbeiten das Freischalten mehrerer (gegebenenfalls sogar aller) Stromkreise notwendig sein. Dies muss aus betrieblicher und versorgungstechnischer Sicht möglich sein.

Quelle [2]:

Gewisse Kompaktmasten haben keine Traversen, sondern die Leiterseile werden von an den Masten beweglich befestigten Isolatoren gehalten, die übereinander angebracht werden. Aufgrund der übereinander angeordneten Stromkreise wäre bei Wartungsarbeiten eine Komplett-Freischaltung der Leitung (aller 6 Stromkreise) erforderlich. Dies kann aus betrieblicher und versorgungstechnischer Sicht aufgrund der in Deutschland geltenden hohen Sicherheitsstandards und der Bedeutung der Freileitung nicht akzeptiert werden. Darüber hinaus ist die Befestigungsform von beweglichen Isolatoren, insbesondere in Kreuzungs- und Näherungsbereichen zu anderen Objekten wie Straßen, Wegen und Bebauungsobjekten, in Deutschland derzeit nicht normkonform. Die geplante Leitung wird in einem freiwerdenden Trassenraum neben bzw. zwischen vorhandenen Freileitungen mit Stahlgittermasten errichtet. Die mit dem Projekt geplante Anpassung und Abstimmung der Masten aufeinander und zueinander (Gleichschritt) führt zu einer Harmonisierung des Landschaftsbildes. Vollwandmasten und Gittermasten parallel hätten hier eher negative Effekte.

Als weiterer Kritikpunkt war die unzureichende oder fehlende Besteigbarkeit für Instandhaltungszwecke zu finden und dadurch das Erfordernis einen mit Hebebühnen befahrbaren Begleitweg erhalten zu müssen.

1.1 Begriffsdefinition und Inhalt des Gutachtens

Zur Unterscheidung der verschiedenen Bauformen in diesem Gutachten sollen eingangs folgende Begriffe bzw. Masttypen definiert werden:

Gittermast: ein Gittermast bzw. Stahlgittermast besteht aus einzelnen Stahlstäben (zumeist aus Winkelprofilen gefertigt), die miteinander wie ein Fachwerk verschraubt sind. Der Mastkopf kann unterschiedlich ausgeführt sein, die Mastbilder Donau und Tonne sind weit verbreitet.

Kompakter Gittermast: Wird der Mastkopf geometrisch schmaler als üblich ausgeführt, so wird dieser auch als kompakter Gittermast bezeichnet.

Kompaktmast: Dieser besteht aus einem einstieligen Mastschaft, der aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sein kann: Vollwandstahl, ultrafester Schleuderbeton, Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder andere Werkstoffe. Dieser wird aufgrund der geringeren Breite des Mastschafts immer eine geringere Trassenbreite als der Gittermast ermöglichen.

Kompakter Vollwandmast bzw. Schleuderbetonmast: Darunter wird ein einstieliger Mast aus Vollwandstahl oder Schleuderbeton mit schmalen Mastkopfbild verstanden.

Kompakter Hybridmast: Es handelt sich um einen Kompaktmasten bei dem der Mastschaft und der Mastkopf aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammengebaut ist.

In diesem Gutachten sollen vorliegende Forschungsberichte zum Thema Kompaktmast hinsichtlich der Eignung für den Einsatz im deutschen 380kV Übertragungsnetz zusammengefasst und unter Bezugnahme auf die 26. BImSchV und das EnWG evaluiert werden.

1.2 Vorliegende Berichte für die Erstellung des Gutachtens

Für die Erstellung des Gutachtens wurden vom Auftraggeber folgende Dokumente übergeben:

- Elektromagnetische Felduntersuchungen an vier verschiedenen Varianten von Stahlvollwandmasten, erstellt durch Dr.rer.nat. Olaf Plotzke, 05.09.2016
- Magnetische und elektrische Felder und Koronaschallemissionen einer Kompaktfreileitung, Vergleich mit einem Donaumastbild (Fachkommission für Hochspannungsfragen – FKH), erstellt durch Reinhold Bräunlich
- Schlussberichte (03ET7516E): Untersuchungen zum Einfluss elektrischer und thermischer Belastungen auf die Materialparameter und die elektrische Lebensdauer des bewehrten UHPC (TU Dresden-IEEH) und Entwurf einer Referenzfreileitung und Bestimmung von Grundparametern
- Schlussbericht 03ET7516C (Fichtner): Kompakthöchstspannungsmasten und -Traversen (KoHöMaT): Teilprojekte Entwurf einer Referenz-Freileitung und Bestimmung von Grundparametern und Sicherstellung des Transfers für eine Pilotanwendung (Umweltverträglichkeit)
- Ermittlung umweltrelevanter Auswirkungen (Fichtner)
- Schlussbericht 03ET7516G (Karlsruhe Institut für Technologie): Standsicherheit und Statik von polygonen Stahlmasten
- Gutachten Schleuderbetonmasten (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nguyen Viet Tue, Institut für Betonbau, TU Graz)
- Referenzliste Kompaktmasten und Mastskizzen vom Bundesverband Kompaktleitung e.V.

2 Kompaktmastleitungen

Kompaktmastleitungen unterscheiden sich von konventionellen Freileitungen mit Stahlgittermasten in mehreren Kriterien: Um ein kompaktes Design technisch ausführen zu können, müssen andere Materialien und Konstruktionen verwendet werden. Im Wesentlichen wird die Stahlgitterkonstruktion des Mastes durch Materialien ersetzt, die eine einstielige Bauweise bzw. einen schlanken Mastschaft ermöglichen. Auch der Mastkopf wird nicht als Stahlgitterkonstruktion ausgeführt, je nach Bedarf kommt man sogar ohne Traversen aus. Kompaktmasten können sowohl mit Porzellanisolatoren als auch mit Verbundisolatoren bestückt werden. In manchen Fällen werden neuartige Leiterseile mit einer höheren Zugfestigkeit oder speziellen Oberflächenbeschichtung eingesetzt.

2.1 Ausführungsformen von Kompaktmasten: Aufbau, Design, Materialien, Ausführungsformen

Zur Realisierung eines einstieligen Masts kann Beton, Vollwandstahl oder auch GFK eingesetzt werden. Neuere Konstruktionen (Hybridmast) ermöglichen auch den Einsatz unterschiedlicher Materialien, beispielsweise werden der Mastschaft aus Beton und der Mastkopf in Vollwandstahlbauweise gefertigt. Mit der Verwendung neuer Materialien können innovative Bauformen umgesetzt werden, die eine schmalere oder auch höhere Bauart zulassen. Auch im Mastkopfbereich sind sowohl klassische Geometrien als auch gänzlich neue Lösungen umsetzbar, wodurch eine geringere Trassenbreite realisiert werden kann.

In einigen Fällen wurden Kompaktmasten gänzlich ohne Traverse gebaut, die eine direkte Montage der Isolatoren auf den Masten erfordern. Es ergeben sich dadurch Mastbilder mit vertikal übereinanderliegenden Leiterseilen, horizontalen Anordnungen oder Konfigurationen ähnlich zum Tonnenmast. Auch gänzlich neue Mastbilder, die unter dem Begriff Designermasten zusammengefasst werden können, wurden bereits umgesetzt. Ein umfangreicher Überblick ist in [3] zu finden.

Zur Gewährung des erforderlichen Sicherheitsabstands zwischen den Phasenseilen oder zum Boden gibt es auch bei den klassischen Masten bereits jetzt unterschiedliche Lösungsansätze: Es werden isolierte Phasentrennstäbe zwischen den Leiterseilen eingesetzt oder auch zusätzliche Abspannseile, an denen die Leiterseile mehrfach abgespannt werden, um den Durchhang zu verringern. Zur Erzielung eines geringen Durchhangs werden auch hochfeste Seile hinsichtlich ihrer mechanischen Zugfestigkeit, die aus dem Seilbahnbau kommen, verwendet.

2.2 Vergleich mit konventionellen Stahlgittermasten und gängigen Mastbildern (Donau und Tonne)

Stahlgittermasten unterscheiden sich von Kompaktmasten in vielerlei Hinsicht. Der Mastschaft ist bei einem Kompaktmast wesentlich schlanker, da dieser aus einem oder auch zwei einstieligen Masten besteht. Er ist daher wesentlich dünner im Aufbau und der Mastkopf kann aufgrund der zuvor

beschriebenen Ausführungsformen schlanker ausgeführt werden. Aufgrund dieser geometrischen Unterschiede und anderen eingesetzten Materialien ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen. Eine wesentliche Frage ist ob der Kompaktmast als gleichwertig zum Stahlgittermast angesehen werden kann.

In folgender Darstellung sind die Abmessungen von Gittermast und kompaktem Vollwandmast mit gleicher Übertragungsleistung gegenübergestellt.

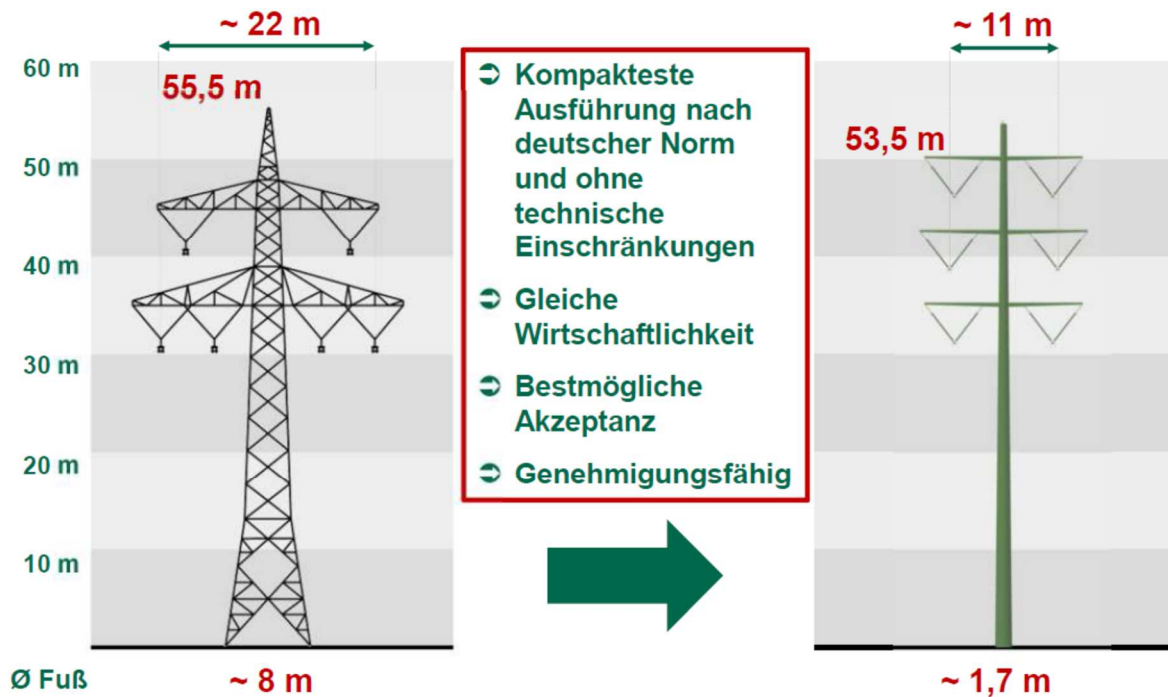


Abbildung 1: Mastgeometrie von Gittermast (links) und kompaktem Vollwandmast (rechts) [Quelle BV Kompaktleitung e.V.]

2.3 Eingesetzte Kompaktmasten im Höchstspannungsnetz in Europa, Referenzleitungen

Die weltweit erste 400kV-Kompaktmastleitung wurde 1999 in der Schweiz zwischen Lausanne und Genf von der EOS (Energie Oveste Suisse) nunmehrige Alpiq errichtet [4]. Diese Leitung wurde in einem dicht besiedelten Gebiet gebaut, die eine bestehende 125kV Doppelleitung ersetzte. Die neue Kompaktleitung wurde als Dreifachsystem mit zwei 400kV-Leitungen und einer 132kV-Leitung ausgeführt. Das Konzept der Masten wurde von einer 150km langen italienischen Bahn-Leitung, die bereits 10 Jahre zuvor in Betrieb gegangen war, übernommen. Dieser Kompaktmast besteht aus zwei zusammenlaufenden Stehern, die mit Quertraversen stabilisiert werden, ähnlich wie ein A-Mast. Am Mastkopf sind die Verbund-Isolatoren direkt am Masten und mit isolierten Traversen befestigt. Der Genehmigung dieser Bauform liefen viele elektrische und mechanische Tests in anerkannten Prüflaboratorien voran.

Weltweit sind Kompaktmasten in unterschiedlichsten Bauformen und Höchstspannungssystemen bis 500kV für Gleich- und Wechselspannungsübertragung im Einsatz [5]. In Dubai wurden mehrere

parallele 400kV Kompaktmastdoppelsysteme für die Übertragung von 1.500MVA mit einer (n-2) Sicherheit errichtet [6].

In weiteren europäischen Ländern sind Kompaktmasten in der 400kV-Ebene im Einsatz: Italien, Frankreich, Großbritannien, Dänemark, Holland, Norwegen und Finnland [1].

Besonders sind die 380kV-Leitungen des Übertragungsnetzbetreibers Tennet zu erwähnen, da Tennet auch in Deutschland Netzbetreiber ist und in Holland seit mehreren Jahren einen eigenen Kompaktmasttyp entwickelt hat, der unter dem Namen Wintrack bekannt wurde. Dieser Masttyp ist bei Randstad (South and North Ring) und zwischen Doetinchem und Wesel im Betrieb. Der Wintrack Mast wurde mit dem Staatspreis für Industriebauten ausgezeichnet [7]. Der Zuschlag für den Bau der 2. Generation dieses Masttyps ging Anfang dieses Jahres an das Konsortium Hejmans – Europoles [8].

Im Nachbarland Österreich bemüht sich die Austrian Power Grid (APG) gerade um den Schluss des 380kV-Rings im Bereich Salzburg (Salzburgleitung). Die APG hat mehrere wissenschaftliche Studien in Auftrag gegeben, die sich einerseits mit dem Mastdesign selbst (Studie Kunstuniversität Linz [9]), andererseits aber auch mit der Umsetzung innovativer Mastkonzepte sowie der Akzeptanz in der Bevölkerung befassen. Als Resultat dieser Voruntersuchungen beabsichtigt die APG vier 380kV-Masten der Bautype Wintrack einzusetzen [10]. In einem anderen Projekt wurde ein Hybridmast realisiert, der den klassischen 380kV-Stahlgittermast mit kompakten Mastkopf in Form von direkt auf den Mastschaft montierten Isoliertraversen (Verbundisolatoren) vereint [11].

2.4 Referenzprojekte mit vergleichbarer Ausführung der Masten im Höchstspannungsnetz

Beispiele für den Einsatz von Kompaktmasten in Europa:

Jahr	Land	Projekt	Unternehmen	Maste	km	Quellen
1977	Frankreich	225kV Pylone Muguet	RTE			
1999	Schweiz	400/125kV Genf-Lausanne	EOS ALPIQ			http://www.inmr.com/compact-design-allowed-line-upgrade-severe-restrictions/
2002	Frankreich	400kV Tricastin Fougères	RTE			
2003	Frankreich	400kV Argoeuves - Chevalet – Gavrelle; Roseau	RTE			
2007	Island	420kV Fljotsdalslina	Landsvirkjun			
2008	Norwegen	300KV und 420KV Statnett - Compact Line Rasta	Statnett			http://www.inmr.com/unique-tower-served-early-model-compact-line-design/
2009-2012	Polen	400kV Wroclaw-Pasikowice	PSE	112		
2012	Portugal	400kV Palmela - Sines 3	REN			
2013	Polen	400kV Breslau-Pasikowice	PSE	111	35	
2013	Holland	Randstadt Sudring Wateringen und Bleiswijk „Wintrack“	TenneT			https://www.tennetso.de/site/binaries/content/assets/company/news/2012/april/presentation_17april2012_de.pdf
2014	Italien	400kV Mailand	TERNA	33	10	

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



2014	Dänemark	400kV "Eagle Pylon" Kassø Tjele	Energienet		136	
2014	Polen	400kV Etk-Granica RP	PSE	4		
2014	Ukraine	330kV Adzelyk	Ukrenergo			
2015	Polen	400kV Kozienice	PSE	3		
2015	UK	400kV "T-Pylon" Eakring	National Grid			http://www.inmr.com/composite-insulator-design-new-transmission-lines/
2017	Holland	380kV Wesel-Niederlande (Grenze-Doetinchem)	Tennet	54	22	
2017	Deutschland	380kV Wesel-Niederlande (Mellingen-Grenze)	Amprion		7	
bis 2021	Holland	380kV Zuid-West Oost / 380kV Zuid-West West „Wintrack II“	Tennet			
geplant	Deutschland	380kV Birkenfeld Ötisheim / Pilotprojekt	Transnet BW	14		
geplant	Österreich	380kV Salzburgleitung	APG	4		https://www.apg.at/de/projekte/380-kv-salzburgleitung/Aussehen

Tabelle 1: Übersicht Kompaktmaste in Europa

Beispiele für den Einsatz von Kompaktmasten weltweit:

1986	Kanada	735kV Quebec	TransEnergie			
1992	China	500kV Yangtze River Crossing at Nanjing	China Yangtze Power (CYPC)			
2008	Vereinigte Arabische Emirate	380kV Dubai	DEWA			http://www.inmr.com/line-compaction-using-composite-insulators-current-situation-future-outlook/
2011	USA	345kV Fargo-St. Cloud-Monticello	Otter Tail Power Company			http://capx2020.com/monticello/index.html
2011-2014	USA	500kV Palo Verde to Browning			100 miles	http://www.falconsteel.com/portfolio/salt-river-project/ https://www.azcc.gov/Divisions/Utilities/Electric/Biennial/10%20year%20plans/TenYea%20PlanSRP2010-Final.pdf
2013	Neuseeland	400kV Lake Karapiro	Transpower	7		https://www.transpower.co.nz/news/whakamaru%E2%80%93brownhill-overhead-transmission-line-commissioning
2013-2015	USA	345kV Thumb Loop Michigan	ITC			http://www.itc-holdings.com/docs/default-source/project-documents/michigan-thumb-loop-project/thumb_loop_project_profile.pdf?sfvrsn=4
2015	USA	500kV Pinal Central to Tortolita		220	41 miles	https://www.youtube.com/watch?v=UoNPSLzgb00

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



2015	USA	345kV Brookings County-Hampton	Xcel Energy and Otter Tail Power Company			http://capx2020.com/brookings/index.html
2015	Israel	161kV und 400kV	Israel Electric			http://www.inmr.com/factors-design-compact-lines-israel/
2016	Kanada	Brucejack Gold Project	Rokstad Power			http://www.pretivm.com/projects/construction-update/default.aspx
2016	USA	161/345kV Hampton - Lacrosse	Minnesota Electric		128 miles	http://www.capx2020.com/lacrosse/
2017	USA	345kV Big Stone South-Brookings County	Xcel Energy and Otter Tail Power Company		70 miles	http://capx2020.com/bss/BigStone-factsheet-Dec-2015.pdf

Tabelle 2: Übersicht Kompaktmaste weltweit

3 Technische, ökologische und wirtschaftliche Bewertung von Kompaktmastleitungen

3.1 Elektromagnetische Felder

Hinsichtlich der gesetzlichen Vorgaben gemäß der 26. BImSchV Anhang 1a sind für Niederfrequenzanlagen zwischen 25Hz und 50Hz folgende Grenzwerte einzuhalten:

- Elektrische Feldstärke 5kV/m
- Magnetische Flussdichte 200 μ T bzw. 100 μ T für Anlagen gemäß §3(2)

Die höchsten Felder treten jeweils unter dem Phasenseil mit dem größten Durchhang bzw. dem niedrigsten Bodenabstand auf. Diese Grenzwerte sind gemäß [12] jedoch auch innerhalb des Bewertungsabstands zwischen dem ruhenden äußersten Leiterseil der Freileitung und dem Minimierungsort in 1m über dem Boden einzuhalten.

In [13] erfolgten Berechnungen zu 21 unterschiedlichen Phasenseilanordnungen eines Doppelsystems der Kompaktmasttype KoHöMaT T32. Durch die Wahl der Masthöhe und der Spannfeldlänge kann das elektrische Feld entsprechend eingestellt werden, auch durch die Wahl des Seilbelags (Bündelleiter) oder durch die Anbringung von einem oder zwei Kompensationsseil(en) ist eine entsprechende Reduktion des elektrischen Feldes erreichbar. In den Berechnungen wurde gezeigt, dass der gesetzlich vorgeschriebene Grenzwert für die elektrische Feldstärke von 5kV/m bei den untersuchten Mastentwürfen in vielen Konfigurationen eingehalten werden kann.

Der Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μ T in Bodennähe wurde bei allen untersuchten Leiterkonfigurationen und bei allen Mastvarianten eingehalten. Aufgrund des höheren Gradienten besteht auch ein rascher Abbau des Magnetfelds bis zu einer Distanz von 60m von der Trassenmitte.

In [14] wurden die elektrischen und magnetischen Felder hinsichtlich ihrer Ausbreitung quer zur Leitungsachse berechnet. Sowohl die elektrische Feldstärke als auch die magnetische Flussdichte klingen beim kompakten Vollwandmast im Vergleich zum klassischen Donaumast signifikant rascher ab, auch die Höchstwerte direkt unter der Leitung sind geringer. Durch die Bauweise des berechneten Kompaktmasts ist es möglich, die Leiterseile um 1,5m höher anzuordnen, wodurch sich eine weitere Reduktion der Felder ergibt.

Auch in [15] erfolgten Berechnungen der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte unterschiedlicher Leiterseilanordnungen und Phasenfolgen einer Kompaktmastleitung. Im speziellen erfolgten Berechnungen zur Bestimmung der Entfernung zur Leitung, an der einer Restflussdichte von 0,1 μ T gegeben war.

- Das Mastbild Donau hat in allen untersuchten Fällen ein höheres elektrisches Feld (kV/m) und höheres magnetisches Feld (μ T) in 1m Abstand vom Boden unmittelbar unter der Leitungstrasse (Trassenmitte).

- Mit zunehmender Entfernung von der Trassenmitte weist die Feldstärke sowohl des elektrischen als auch des magnetischen Feldes eine signifikant stärkere Abnahme auf.
- Eine magnetische Flussdichte von $0,1\mu\text{T}$ wurde beim Kompaktmast in weniger als der halben Entfernung zur Trassenmitte im Vergleich zum Donaumast erreicht.
- Durch Vertausch der Phasenlage lassen sich sowohl beim Gittermast als auch beim Kompaktmast Optimierungen erreichen.

Schlussfolgerungen:

- **Die berechneten Werte der elektrischen Feldstärke (kV/m) und der magnetischen Flussdichte (μT) in 1m Bodenabstand im Minimierungsbereich liegen bei einem Kompaktmast in der gleichen Größenordnung wie jene eines Stahlgittermastes mit Mastkopfbild Donau. Je nach Anordnung der Phasenseile sind beim Kompaktmast auch geringere Werte erzielbar.**
- **Durch die engere Leiterseilanordnung beim kompakten Vollwandmast liegt ein höherer Feldgradient vor, wodurch sich das elektrische und magnetische Feld mit zunehmender Entfernung wesentlich schneller abbaut.**
- **Aus der Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit kann daher ein Kompaktmast so ausgelegt werden, dass dieser eine geringere Trassenbreite im Vergleich zu einem konventionellen Stahlgittermast mit Donaumastkopf erfordert und dabei geringere elektromagnetische Felder verursacht.**

3.2 Standsicherheit und mechanische Belastungen

In [16] wurde die Biegetragfähigkeit von Stahlmasten mit polygonalen Querschnitten mit beliebiger Kantenanzahl und runden Querschnitten behandelt. Die Simulationen erfolgten ohne Zuordnung zu einem bestimmten Stabilitätsfall. Das Tragverhalten von Stahlmasten mit polygonalen und runden Querschnitten wurde unter Biegebelastung numerisch berechnet und grafisch dargestellt. Es erfolgten auch experimentelle Untersuchungen an Mastbauteilen mit unterschiedlicher Kantenanzahl und runden Mastbauteilen. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen wurde ein numerisches Berechnungskonzept in Anlehnung an die Regelungen für den vollständig numerischen Bauteilnachweis (GMNIA) nach DIN EN 1993-1-6 entwickelt, das die Berücksichtigung von Schalentragwirkung, geometrischer Qualität der Bauteile und Plastizierungsvermögen des Materials ermöglicht. Es erfolgte eine vergleichende Darstellung des Biegetragverhaltens von Masten mit polygonalen Querschnitten mit beliebiger Kantenanzahl und runden Querschnitten auf einheitlicher Berechnungsgrundlage.

Die Resultate der vergleichenden Betrachtungen zeigten, dass die Biegetragfähigkeit von Masten mit polygonalen Querschnitten mit 12 und weniger Kanten immer unterhalb der Biegetragfähigkeit von Masten mit runden Querschnitten liegen. Im unteren Schlankheitsbereich ($d/t < 150$) können aber auch Querschnitte mit 12 Kanten Biegetragfähigkeiten in der Größenordnung von runden Querschnitten erreichen. Bereits ab 16 Kanten erreichen polygonale Querschnitte im gesamten

betrachteten Schlankheitsbereich nahezu die Biegetragfähigkeit von runden Querschnitten (ca. +/- 5 %). Nennenswert höhere Biegetragfähigkeiten durch eine noch höhere Kantenanzahl ergeben sich nur bei sehr schlanken, geometrisch imperfekten Querschnitten.

Das Institut für Betonbau an der TU Graz (Prof. Tue) und das Department Concrete Structures an der TU Delft (Prof. Walraven) haben die Auslegung der Windtrack II Masten hinsichtlich der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit der Gesamtkonstruktion einschließlich des Übergangs zwischen Beton- und Stahlteil untersucht. Die Berechnung und Konstruktion der Hybridmaste erfolgte nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik, wobei die EN 50341 und andere Normen wie EC2 sowie EC3 für die Bemessung von Beton und Stahlbauteilen zugrunde gelegt wurden.

3.3 Betriebsführung und Instandhaltung

In den recherchierten Quellen [1] und [2] wurden hinsichtlich der Betriebsführung und Instandhaltung folgende Nachteile des Kompaktmasten aufgezeigt:

- Der Kompaktmast kann nicht bestiegen werden, wodurch bei Instandhaltungstätigkeiten eine Hebebühne erforderlich ist. Diese kann nur eingesetzt werden, falls es einen begleitenden Weg im unmittelbaren Nahbereich gibt.
- Bei Mehrfachsystemen (sowohl Doppel- als auch Drei- und Vierfachsysteme) ist es nicht möglich Instandhaltungsarbeiten durchzuführen ohne die gesamte Leitung spannungsfrei zu schalten.
- Bei Kompaktmasten mit direkt auf den Mast montierten Isolatoren ist keine Instandhaltung der Isolatoren möglich, da keine begehbare Traverse vorhanden ist.
- In [1] wurde aufgrund der modifizierten Leiteranordnung ein veränderter Blindleistungsbedarf einer Kompaktmastleitung im Vergleich zu einer klassischen Stahlgitterleitung angeführt. Der Blindleistungsbedarf ergibt sich aus dem Induktivitäts- und Kapazitätsbelag. Diese wiederum sind aufgrund der geometrischen Anordnung der Leiterseile und des Erdseils zueinander, zum Mast und zur Erde einerseits und andererseits aufgrund der dielektrischen und magnetischen Eigenschaften der Isolierstrecke (Luft bei Freileitungen und vernetztes Polyethylen VPE bei Kabeln) bestimmbar. Der Unterschied der beiden Mastkopfbilder ist fernab jener Größenordnung, bei der Maßnahmen wie beispielsweise das Aufstellen von Kompensationsdrosseln bei der Verkabelung erforderlich wären oder einen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb (das kapazitive Verhalten von Kabeln bedingt einen Betrieb unterhalb der natürlichen Leistung) mit sich bringen würde. In selbiger Quelle wurde darauf verwiesen, dass sich aus systemtechnischer Sicht keine wesentlichen Unterschiede des Leitungsverhaltens ergeben würden.

Die in den vorliegenden Studien untersuchten Kompaktmasten unterscheiden sich zu den kritisierten Masten in folgenden Punkten:

- Die entwickelten Kompaktmasten sind entweder mit Steighilfen ausgerüstet oder es können Leitern angebracht werden, sodass für Instandhaltungsarbeiten keine Hebebühne

erforderlich ist. Die Mastgeometrie wurde so ausgelegt, dass bei der Besteigung der Masten der erforderliche Schutzbereich gewährleistet ist.

- Bei Masten für Doppelsysteme ist es durch die neue Auslegung (siehe dazu [17] Abbildung 7) möglich, bei einem unter Spannung stehenden System Instandhaltungstätigkeiten am anderen System unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen durchzuführen.

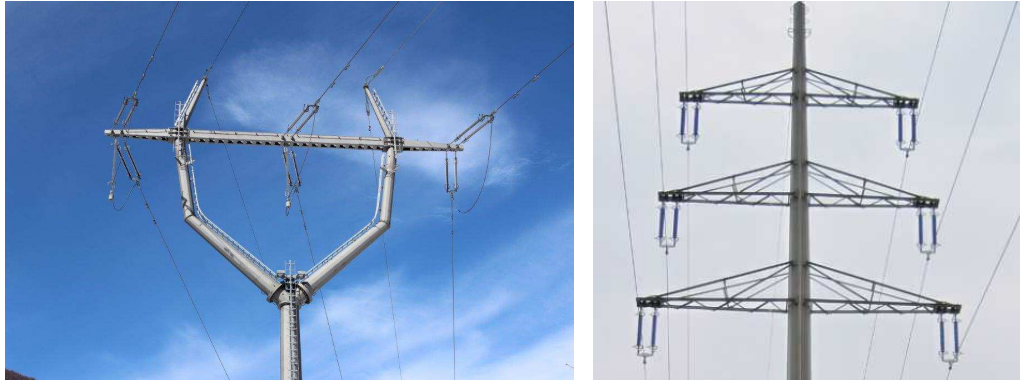


Abbildung 2: Besteigbarkeit der Vollwandmaste und Begehbarkeit der Traversen (Quellen: links: 220kV Y-Mast der Leitung Avegno-Cavergno Swissgrid, rechts: 110kV Doppelsystem Pfalzwerke)

- Die Aufhängung der Isolatoren erfolgt auf begehbaren Traversen, um Instandhaltungstätigkeiten zu ermöglichen.
- Bei der Errichtung der Freileitung ist ein Begleitweg unumgänglich. In den meisten Situationen wird dieser für die Instandhaltungstätigkeiten der Leitung (Ausästen, Inspektion udgl.) erhalten.

3.4 Grundinanspruchnahme und Leitungserrichtung

In [18] erfolgte eine ausführliche Darstellung der technischen Aufwendungen und Anforderungen bei den Bautätigkeiten bei der Leitungserrichtung. Es erfolgte eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Leitungsbauformen hinsichtlich der Baumaßnahmen, Anforderungen an den Boden durch den Fundamentbau, Aufstellungsarbeiten der Masten, dem Seilzug, baubedingte Flächeninanspruchnahme, Emissionen sowie Bauzeiten und Ablauf. Es wurden auch Vor-/Nachteile im Betrieb und der Wartung angeführt.

Schlussfolgerungen:

Als wesentliche Vorteile wurden die geringere Montagezeit der Masten, kleinere Flächeninanspruchnahme für die Mastaufstellung sowie geringere Instandhaltungsaufwendungen beim Kompaktmast hervorgehoben. Demgegenüber stehen Vorteile beim Transport der Stahlgittermaste (Abmessungen, Transportgewicht). Hinsichtlich der Errichtungszeit beider Masttypen wurde eine wesentlich kürzere Bauzeit beim Kompaktmast ausgewiesen.

3.5 Geräuschemission

Aufgrund des elektrischen Feldes kommt es zu Koronaentladungen am Leiterseil und an den Armaturen (Isolatorketten, Aufhängungen, udgl.). Diese Koronaentladungen haben akustisch wahrnehmbare Schallwellen (Koronaschallemission) zur Folge, die neben der Höhe der elektrischen Feldstärke an der Seiloberfläche (Randfeldstärke) auch von der Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit) und der Witterung (Regen, Nebel, Schneebeleg, udgl.) entscheidend abhängt.

Als Maßstab zur Bewertung sind die Lärmschutzrichtlinien TA Lärm [19] heranzuziehen. Die höchst zulässigen Grenzwerte außerhalb von Gebäuden nach Absatz 6.1 betragen für die Nacht zwischen 35dB(A) und 50dB(A) sowie für den Tag zwischen 45dB(A) und 70dB(A) je nach Widmung des Gebietes.



➔ **Höhere Koronageräusche**

➔ **Niedrigere Koronageräusche**

Abbildung 3: Unterschiedlich hohe Koronaschallpegel aufgrund verschiedener Phasenseilabstände, Illustration: BV Kompaktleitung e.V.

Im Bericht [14] wurde für die Berechnung der Schallimmission ein spezifischer Schallleistungspegel ermittelt, wodurch der Schalldruckpegel im Nahbereich der Leitung berechnet werden konnte. Der Vergleich der Koronaschallpegel zeigte, dass unabhängig von der Entfernung zur Leitungstrasse der Kompaktmast im Vergleich zum Donaumast stets geringere Emissionen aufwies (siehe dazu Abbildung 17 in [14]). Nur eine fernfeldoptimierte Anordnung der Leiterseile ermöglicht eine Absenkung der Werte des Donaumasts. Direkt unter der Leitung wurden Koronaschalldruckpegel zwischen 47 und 48dB(A) errechnet, in 100m Entfernung zwischen 36dB(A) und 38dB(A).

Im Bericht [15] wurden Donaumast und Tonnenrohrmast verglichen. Zur Erzielung eines Schalldruckpegels von 45dB(A) ist beim Donaumast eine Entfernung von 236,5m erforderlich, hingegen ist dieser Wert beim kompakten Tonnenrohrmast bereits bei 97,2m erreicht. Der Vergleich

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



der beiden untersuchten Mastbilder Donau und Tonne führt zu dem Ergebnis, dass aufgrund der Leiterseilanordnung (eher vertikal) und der größeren Seilabstände (geringere Randfeldstärke) beim Mastbild Tonne ein niedrigerer Schallpegel gegeben ist.

Schlussfolgerungen:

Diese beiden Untersuchungen zeigten übereinstimmende Ergebnisse, sodass der Schluss zulässig ist, dass bei Kompaktmastleitungen eine geringere Schallimmission zu erwarten ist. Sollten die Vorgaben der TA Lärm dennoch überschritten werden, können konstruktive Maßnahmen an der Mastgeometrie, Leiterseile mit größerem Durchmesser zur Reduktion der Randfeldstärke oder auch eine hydrophobe Beschichtung der Leiterseile [11] zu einer Reduktion des Schalldruckpegels zwischen 2 bis 3dB in 70m, 5 bis 6dB in 35m Abstand zur Leitung und 6 bis 8dB im Trassenbereich zielführend sein, siehe dazu [20].

3.6 Ökologische Bewertung hinsichtlich Fauna, Flora und möglicher Umweltbeeinflussungen im unmittelbaren Nahbereich der Leitung

In [17] und [21] erfolgten umfangreiche Untersuchungen zur Evaluierung von ökologischen Unterschieden zwischen Kompaktmastleitungen und Standardleitungen. Der Entwurf der Kompaktmast-Referenzfreileitung in erster Arbeit erfolgte mit dem Ziel, die Flächeninanspruchnahme einer Freileitung zu senken, Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes zu reduzieren, die Erhöhung der Akzeptanz von Freileitungen zu erlangen und dadurch die Genehmigungsverfahren zu beschleunigen.

In der Studie wurden die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt betrachtet sowie die Schutzgüter nach UVPG systematisch abgeprüft, wobei seitens der Behörde auf die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens hinsichtlich folgender aufgezählter Punkte zu ermitteln, beschreiben und bewerten sind:

- Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit
- Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt
- Boden, Wasser, Luft und Klima
- Landschaft, Kultur- und Sachgüter sowie die Wechselwirkung zwischen diesen Schutzgütern

In umweltsensiblen Gebieten kann der Einsatz von Beton anstatt verzinktem Stahl ökologisch vorteilhaft sein. Daher wurde auch eine Ökobilanz erstellt, in welcher anstatt Vollwandmasten aus Stahl Schleuderbetonmasten eingesetzt wurden. Das Ergebnis kann folgend zusammengefasst werden:

- Der Schleuderbetonmast hat deutlich geringere Umweltauswirkungen bei der Herstellung im Lebenszyklus verursacht.
- Der Transportprozess des schwereren Schleuderbetonmasts geht nur geringfügig in die Ökobilanz ein.

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



- Schleuderbetonmasten gelten als wartungsfrei, was sich in der Nutzungsphase positiv auf die Kosten auswirkt, bei Stahlgittermasten fallen wegen des erforderlichen Korrosionsschutzes höhere Instandhaltungskosten an.
- Der Stahlgittermast verfügt über ein größeres Recyclingpotenzial, da die Stähle einfach in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können. Recycling ist auch bei Betonmasten möglich, jedoch unter einem höheren Aufwand. Betrachtet man die Bilanz über den Lebenszyklus (Herstellung, Transport, Aufstellung, Nutzung, Abbau), so schneidet der Betonmast hinsichtlich der Umweltwirkungen besser ab.
- Der Kompaktmast weist eine geringere Flächeninanspruchnahme bei den versiegelten Flächen als auch bei der Trassenbreite sowie beim Mastfuß auf.
- Hinsichtlich kollisionsgefährdeter Vogelarten ist kein Unterschied feststellbar. Eine Markierung der Leiterseile kann bei beiden Masttypen erfolgen.
- Abhängig vom behördlich anerkannten Bewertungsmodellen konnte ein deutlicher Vorteil beim untersuchten kompakten Vollwandmast festgestellt werden.
- Die Gesamtempfehlung aus ökologischer Sicht geht zugunsten des Kompaktmastes aus.

Schlussfolgerungen:

Das Gutachten [21] weist der Kompaktleitung insbesondere in waldreichen Landschaften einen Vorteil gegenüber der untersuchten Gittermastleitung mit Donaumastbild aus, was in der geringeren Breite des Schutzstreifens und den damit verbundenen minimierten Eingriffen in die Waldbiotope begründet wurde. Für die Kompaktmastleitung wurden aufgrund der geringeren Kompensationsmaßnahmen niedrigere Kosten ermittelt, die Einsparung wurde mit 27% gegenüber Stahlgittermasten beziffert.

3.7 Raumplanerische Aspekte und Akzeptanz unterschiedlicher Leitungen seitens der Bevölkerung bzw. Anrainer und Betreiber

In [18] wurden umfassende Analysen nach den gesetzlichen Vorgaben zur Umweltverträglichkeit von Kompaktmasten und Vergleich mit Stahlgittermasten durchgeführt. Hinsichtlich der raumplanerischen Aspekte und der Akzeptanz von Kompaktmasten durch die Anwohner wurden bundesländerspezifische Beispiele aufgezeigt, Grafikanimationen erstellt und Vor-/Nachteile diskutiert.

In einer Studie des RWE [22] wurde die Akzeptanz von Freileitungen im Vergleich zu Kabeln aus unterschiedlichen Perspektiven wissenschaftlich aufgearbeitet. Es wurden Fakten und Argumente für die Errichtung von Freileitungen und Kabelanlagen aufgezeigt, wobei neben den technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Punkten vor allem die Akzeptanz der Anrainer ein Schlüsselfaktor darstellt. Es wurden Methoden wie Bürgerbeteiligung oder Dialog zur Konsensfindung aufgezeigt, wobei die dadurch entstehenden Mehrkosten in Verhältnismäßigkeit zu den Projektkosten in Kauf zu nehmen sind.

In einer Umfrage eines Meinungsforschungsinstituts [23] wurden mehr als 1000 Personen über 14 Jahren über die Kriterien Aktualität (modern/alt), Aussehen (schön/nicht schön), Sicherheit (sicher/unsicher) und Empfinden (beruhigend/beunruhigend) von 6 unterschiedlichen Mastbildern (Gittermaste: Tonne, Donau, Obelisk und Kompaktmaste: Designermast, Wintrack, Fingrid) befragt. Die Kompaktmasten erlangten in allen Kategorien bessere Bewertungen. Besonders hervorzuheben ist, dass sie als besonders sicher, modern und mit schönem Aussehen assoziiert wurden.

Schlussfolgerungen:

Aufgrund der unterschiedlichen Regelungen in den Bundesländern einerseits und der topologisch zu berücksichtigenden Unterschiede des Leitungsverlaufs andererseits gibt es keine universellen objektiven Maßstäbe. Eine geringere Eingriffsfläche ist beim Einsatz einer Kompaktmastleitung zu erwarten. Dies wirkt sich auch in dem zu entrichteten Ersatzgeld aus, insbesondere dann, wenn dieses als prozentualer Faktor des Projektbudgets ermittelt wird. Aufgrund der oft dominant wirkenden Verbundisolatoren kann der Vorteil der schlankeren Bauweise bei den Fotomontagen untergeordnet zur Geltung kommen.

Hinsichtlich der Akzeptanz von Freileitungen wurden der Dialog und die Bürgerbeteiligung als wichtiges Instrument hervorgehoben, wobei die dadurch entstehenden Kosten in Kauf zu nehmen sind. In den vorliegenden Studien wiesen die befragten Bürger den Kompaktmaste ein moderneres und schöneres Aussehen sowie eine gleich hohe Sicherheit aus.

3.8 Wirtschaftliche Bewertung

Hinsichtlich der Kostenbewertung unterschiedlicher Freileitungstypen muss klargestellt werden, dass in vielen Publikationen generelle Multiplikatoren (spezifische Errichtungskosten) genannt werden [1], die jedoch keinen Schluss auf die tatsächlichen Kosten eines konkreten Leitungsabschnitts zulassen. Für eine Wirtschaftlichkeitsbewertung ist das jeweilige Leitungsprojekt individuell auf Basis unterschiedlichster Anforderungen an die Leitung wie geologischen Gegebenheiten (Gründungen, Fundamente), Trassenführung (Anzahl der unterschiedlichen Masttypen, Erfordernis von Querungen mit Straßen, Flüssen, Brücken), vorgegebene Spannfeldlängen (Mastanzahl) und erforderliche zusätzliche Schutzmaßnahmen der Isolationskoordination (Blitzschutz, Überspannungsableiter) zu kalkulieren. Die Multiplikation der in der Literatur genannten spezifischen Mehrkosten der Kompaktleitung mit der Leitungslänge würde zu einem unrealen Ergebnis führen.

Die Erfahrung in der 110kV Kompaktmastproduktion hat gezeigt, dass mit dem Beginn der Serienproduktion die Mehrkosten der Entwicklung rasch kompensiert werden konnten. Eine ähnliche Entwicklung ist auch in der Höchstspannungsebene zu erwarten.

Der Zeitaufwand für die Aufstellung des in Großbritannien eingesetzten T-Pylon Kompaktmasts wird in [24] mit einem halben Tag angegeben. Im Vergleich dazu sind für die Aufstellung eines klassischen Stahlgittermasten 28 Tage zitiert. Die Ursache ist in der einfachen Bauweise zu finden, der T-Pylon besteht aus 10 Einzelteilen, die mit einem Autokran rasch montiert werden können. Dieser

Zeitgewinn bei der Aufstellung schlägt sich naturgemäß sehr positiv auch auf die Gesamtkosten der Leitung aus.

Hinsichtlich der Betriebs- und Instandhaltungskosten spielt die jeweilige Betriebsführungs- und Instandhaltungsstrategie des TSO eine entscheidende Rolle, sodass auch hier keine allgemein gültige Aussage betreffend erhöhter Kosten durch den Einsatz von Kompaktmasten getätigt werden kann.

Schlussfolgerungen:

Ein objektiver Vergleich der Wirtschaftlichkeit ist nur im Rahmen eines Praxisnachweises in Form einer Durchrechnung eines konkreten Projekts möglich.

4 Bewertung hinsichtlich „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und „Stand der Technik“

4.1 Gesetzliche Anforderungen gemäß §49 EnWG und der 26. BImSchV

Die Errichtung und der Betrieb von Energieanlagen hat nach geltendem Recht so zu erfolgen, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Von dieser Regelung sind daher auch die Masten von Höchstspannungsleitungen betroffen. Im **Teil 6 Energiewirtschaftsgesetz „Sicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung“** sind in §49 die Anforderungen an die Energieanlagen definiert, wobei die technische Sicherheit elektrischer Anlagen bei Einhaltung der „**allgemein anerkannten Regeln der Technik**“ mit dem Verweis auf die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. vermutet wird [25].

Bei der Errichtung von Niederfrequenzanlagen, worunter auch mit 50Hz betriebene Höchstspannungsleitungen fallen, sind nach **§4 Anforderungen zu Vorsorge der 26. BImSchV** die Möglichkeiten auszuschöpfen, die elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder unter Berücksichtigung der Gegebenheiten im Einwirkungsbereich nach dem „**Stand der Technik**“ zu minimieren. Diesbezügliche nähere Regelungen sind in einer Verwaltungsvorschrift gemäß §48 des Bundesimmissionsschutzgesetzes, der 26. BImSchVVwV, getroffen [26].

Aufgrund dieser gesetzlichen Bedingungen und Vorgaben ist daher zwischen den Begriffen „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ hinsichtlich der Errichtung und dem Betrieb von elektrischen Anlagen und „Stand der Technik“ hinsichtlich der im Nahbereich der elektrischen Anlagen auftretenden Immissionen zu unterscheiden. Eine Klärung der Differenzierung dieser Begriffe erfolgte spätestens seit der „Kalkar-Entscheidung“ des Bundesverfassungsgerichts vom 08.08.1978 bzw. der daraus abgeleiteten Drei-Stufen Theorie des Bundesverfassungsgerichts.

Als **unterste Stufe** sind die „**allgemein anerkannten Regeln der Technik**“ zu verstehen, die einen rechtlich verbindlichen Mindeststandard darstellen. Behörden und Gerichte beschränken sich in dieser Stufe auf die herrschende Auffassung unter den technischen Praktikern, um festzustellen, ob das jeweilige technische Arbeitsmittel in den Verkehr gebracht werden darf oder nicht. Als Beurteilungsmaßstab für die allgemeine Anerkennung einer Regel dient zum einen die praktische Erprobung und Bewährtheit der jeweiligen Prinzipien, andererseits wird untersucht, ob die Mehrheit der Fachleute diese Regeln billigen und diese deshalb allgemein Anwendung finden.

Als **mittlere Stufe** wird der „**Stand der Technik**“ und als jene mit den **höchsten inhaltlichen Anforderungen** der „**Stand von Wissenschaft und Technik**“ verstanden. In [27] und [28] werden die drei Technikstandards ausführlich dargestellt. Die Unterscheidung der im Gesetz genannten Begriffe „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und „Stand der Technik“ sind daher wesentlich für die Errichtung von Kompaktmasten.

4.2 Zum Begriff „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und technische Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Zur Beurteilung, ob eine 380kV Höchstspannungsleitung mit Kompaktmasten in Deutschland gebaut werden darf, ist es daher wesentlich, ob diese den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“

entspricht. Wie in [27] und [28] ausführlich klargelegt, sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik hinsichtlich des Kompaktmasts gegeben, falls:

- 1. sie zur Ausführung der Kompaktmastbauweise allgemein anerkannt sind (allgemeine wissenschaftliche Anerkennung)**

und

- 2. sie in der Praxis erprobt und bewährt sind (praktische Bewährung).**

Zu Punkt 1: Regeln sind dann allgemein anerkannt, wenn diese den vorherrschenden Ansichten der technischen Fachleute entsprechen. Die Normenreihe VDE 210 (DIN EN 50341) „Freileitungen über AC 1 kV“ in mehreren Ausgaben und Unterteilungen ist das Standardregelwerk für die Errichtung von Freileitungen.

Zu Punkt 2: Die Regeln des VDE sind in der Praxis erprobt und bewährt. Hiernach werden Freileitungen über AC 1kV, also auch Höchstspannungsleitungen errichtet. Die Bauart der Kompaktmasten ist seit mehreren Jahren bekannt, praxiserprobt und hat sich im Betrieb auch bewährt. Siehe dazu die genannten Projekte in Kapitel 2.3.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass drei der vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber Projekte zur Praxiserprobung der Kompaktmaste entwickelten bzw. umsetzen. Damit ist die Bedingung, dass die angewendeten Regeln der Technik von der überwiegenden Ansicht der technischen Fachleute anerkannt sind, erfüllt. Mit Download am 09.02.2017 wurden folgende Projekte im Internet publiziert:

- Amprion

7km Teilstück zwischen Wesel und Isselburg (Grenze zu NL) seit Oktober 2016 in Bau

http://netzausbau.amprion.net/sites/default/files/20161017_pm_wesel-nl_amprion_setzt_bei_wesel_erstmals_neuen_masttyp_ein.pdf

- 50Hertz

2km lange Pilotleitung „compactLine“ eines Konsortiums (SAG, FGH Mannheim)

<http://www.50hertz.com/de/Netzausbau/compactLine>

- Transnet BW

14 Vollwandmasten zwischen Birkenfeld und Ötisheim (Kombileitung 380kV und 110kV), Maßnahme P70 im nationalen Netzentwicklungsplan Strom (BBPIG Vorhaben Nr. 35), Pilotprojekt in Planung

https://www.transnetbw.de/files/pdf/netzentwicklung/birkenfeld_pi-vollwandmasten.pdf

Unabhängig von den obigen Fakten stellt der Gesetzgeber in §49 Abs. 2 Satz 1 EnWG klar, dass bei Einhaltung der Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) die Erfüllung der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ gesetzlich vermutet wird. Für die Errichtung von Höchstspannungsleitungen existiert die Normenreihe VDE 210 (DIN EN 50341) „Freileitungen über AC 1 kV“ in mehreren Ausgaben und Unterteilungen. Für die Genehmigung und Errichtung ist die jeweils gültige Fassung anzuwenden. Mit 09.02.2017 waren folgende Ausgaben der Normenreihe VDE 0210 gültig:

	Norm: DIN EN 50341-2-4 VDE 0210-2-4:2016-04 Freileitungen über AC 1 kV Teil 2-4: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für Deutschland (basierend auf EN 50341-1:2012); » Mehr Informationen
	Norm: DIN EN 50341-1 VDE 0210-1:2013-11 Freileitungen über AC 1 kV Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen; Zu diesem Dokument ist eine englische Übersetzung verfügbar. » Mehr Informationen
	Norm: DIN EN 50341-2 VDE 0210-2:2002-11 Freileitungen über AC 45 kV Index der NNA (Nationale Normative Festlegungen) » Mehr Informationen

Abbildung 4 Download: <https://www.vde-verlag.de/normen/suchen/?klassifikation=50341&fassung=alle&bereich=aktuell>

Der Typ Kompaktmast oder Vollwandmast wird zwar in dieser Normenreihe namentlich nicht explizit genannt, sehr wohl aber wird im *Kapitel 7. Stützpunkte* die Bezeichnung einstielige Stahlmaste (7.4) und Betonmaste (7.6) verwendet. Im Anhang K sind unterschiedliche Querschnitte bzw. mögliche Ausführungsformen (runde und polygonale Formen) dargestellt.

Ein Kompaktmast kann so konstruiert und konzipiert werden, dass er die Anforderungen der VDE 0210 (DIN EN 50341-1 und DIN EN 50341-2-4) und der EUROCODES hinsichtlich der bautechnischen und statischen Auslegung grundsätzlich erfüllt. Speziell für die Ausführung der Isoliertraversen und Befestigungslösungen der Isolatoren ist auf eine normkonforme Befestigungsform zu achten. Hinsichtlich der Besteigbarkeit der Maste und Begehbarkeit der Traversen ist die BGI - 5148 „Schutz gegen Absturz beim Bau und Betrieb von Freileitungen“ erfüllbar.

Nach [1] sind gemäß dieser Normenreihe permanente, statisch bedingte Abspannungen der Maste in Deutschland nicht zugelassen und damit einzelne im Ausland eingesetzte Kompaktmastformen nicht anwendbar.

Abseits der Thematik um die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ stellt der Gesetzgeber in Absatz 3 des §49 EnWG die Möglichkeit in den Raum, Anlagen und Bestandteile von Anlagen anderer EU-Mitgliedsstaaten einzusetzen, falls diese den geltenden Regelungen dieses EU-Mitgliedsstaats entsprechen oder gemäß den Anforderungen rechtmäßig hergestellt und in den Verkehr gebracht

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



wurden und die gleiche Sicherheit gewährleisten. In begründeten Einzelfällen kann auf Verlangen der Behörde ein diesbezüglicher Nachweis gefordert werden. Folgt man den Ausführungen in [27], so erfüllen Kompaktmasten sowohl die Regelungen als auch die Anforderungen der Sicherheit, falls sie in einem EU-Mitgliedsstaat im Höchstspannungsnetz eingesetzt werden und die Behörde keinen gegenteiligen Nachweis aufgrund eines begründeten Verdachts erbringt.

In Kapitel 2.4 wurde aufgezeigt, dass sich in mehreren EU-Mitgliedsstaaten Kompaktmasten bei Höchstspannungsleitungen mit einer Betriebsspannung von 380kV und darüber in Betrieb befinden. Wie bereits dargestellt hat der nationale Übertragungsnetzbetreiber Tennet bereits 2011 in Holland begonnen eigene Kompaktmasten zu entwickeln, die unter dem Namen Windtrack bekannt wurden. Bei einer etwa 10km langen 380kV Freileitung wurden 450 Kompaktmasten aufgestellt und seither betrieben. Diese Masten wurden von der Firma *VDL Network Suppliers* gefertigt. Die zweite Generation dieser Masten (Windtrack II) wurde eben erst beauftragt [8] und sollen 2018 in Betrieb gehen. Auch in anderen EU-Mitgliedsstaaten (Italien, Frankreich, Dänemark, Finnland, Portugal, Niederlande und Großbritannien) gibt es einige umgesetzte 380kV Leitungsabschnitte mit Kompaktmasten unterschiedlichster Ausführung.

Schlussfolgerungen:

Aufgrund des aufgezeigten Einsatzes von Kompaktmasten in mehreren EU-Mitgliedsstaaten kann die Behörde nach [27] nur im begründeten Verdachtsfall mit einem Nachweis der Nichterfüllung der Anforderungen gemäß Absatz 3 des §49 EnWG den Einsatz eines baugleichen Kompaktmasten untersagen.

4.3 Zum Begriff „Stand der Technik“ und Minimierungsgebot

Als „Stand der Technik“ ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren oder normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift zu verstehen. Diese können in einem Kriterienkatalog einer allgemeinen Verwaltungsvorschrift wie in der BImSchV aufgelistet sein. In Abgrenzung zu den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ hat der „Stand der Technik“ nicht das Merkmal der allgemeinen Anerkennung der Regel aufzuweisen. Normen müssen nicht zwangsläufig dem „Stand der Technik“ entsprechen, da diese über einen längeren Zeitraum unverändert gültig sind. Technische Neuentwicklungen können schon dem „Stand der Technik“ entsprechen auch wenn sie noch nicht normativ erfasst oder allgemein anerkannt sind [28].

Gemäß 26. BImSchV §4(2) *Anforderungen zur Vorsorge* sind bei der Errichtung von Niederfrequenzanlagen die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren. Das Nähere regelt eine Verwaltungsvorschrift gemäß § 48 des Bundesimmissionsschutzgesetzes.

Diese 26. BImSchVVwV [12] definiert in 3.1 *Minimierungsziel und Rahmenbedingungen*:

Das Ziel des Minimierungsgebotes nach § 4 Absatz 2 26. BImSchV ist es, die von Niederfrequenz- und Gleichstromanlagen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich so zu minimieren, dass die Immissionen an den maßgeblichen Minimierungsorten der jeweiligen Anlage minimiert werden.

Unter einem maßgeblichen Minimierungsort wird nach 2.11 verstanden: ein im Einwirkungsbereich der jeweiligen Anlage liegendes Gebäude oder Grundstück im Sinne des § 4 Absatz 1 26. BImSchV sowie jedes Gebäude oder Gebäudeteil, das zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist.

Der zu betrachtende Einwirkungsbereich ist nach 3.2.1.2 für Niederfrequenzanlagen mit Nennspannung größer oder gleich 380kV mit 400m vorgegeben und der Bewertungsabstand nach 3.2.2 mit 20m. Punkt 3.2.2.2 regelt die individuelle Minimierungsprüfung für maßgebliche Minimierungsorte zwischen Trassenmitte und Bewertungsabstand.

Als Nachweismethode ist nach Absatz 4 die numerische Feldsimulation dem messtechnischen Nachweis vorzuziehen, sofern nicht gewährleistet ist, dass der messtechnische Nachweis des ungestörten Feldes ohne äußere Einflüsse (benachbarte Elektroinstallationen, Wetter udgl.) reproduzierbar möglich ist.

In [12] Paragraph 5.3 *Energieübertragungsanlagen mit 50 Hertz* werden technischen Möglichkeiten zur Minimierung von Drehstromfreileitungen (5.3.1) angeführt:

5.3.1.1 Abstandsoptimierung

Ziel der Maßnahme ist es, die Distanz der Leiterseile zu maßgeblichen Minimierungsorten zu vergrößern. Zum Boden wird die Distanz zum Beispiel durch die Erhöhung der Masten oder die Verringerung der Spannfeldlängen vergrößert. Wird ein Stromkreis auf einer von einem maßgeblichen Minimierungsort abgewandten Traverse – Querausleger – geführt, verringert dies die Immission an diesem Ort.

Voraussetzungen: *Die Bodenbeschaffenheit muss geeignete Mastfundamente ermöglichen, wenn die Masten erhöht werden. Der Bodenabstand der Leiterseile kann bei Neubau planerisch festgelegt werden.*

Wirksamkeit: *Grundsätzlich ist sie in Trassennähe hoch und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Trasse ab.*

Hinweise: *Die Wirksamkeit der Erhöhung des Bodenabstandes kann in Abhängigkeit von anderen Anlagenparametern, wie der Phasenordnung bei Masten mit mehr als einem Stromkreis, in der Trasse sehr variabel sein und örtlich begrenzt eine entgegengesetzte Wirkung haben. Der zusätzliche Aufwand hängt von der jeweils realisierten Maßnahme ab. Er ist zum Beispiel für Masterrhöhungen bei einer neu zu bauenden Leitung niedrig. Mit zunehmendem Bodenabstand steigt der Aufwand stark an.*

5.3.1.2 Elektrische Schirmung

Elektrisch leitfähige Schirmflächen oder -leiter werden vorzugsweise zwischen den spannungsführenden Leitungsteilen und einem maßgeblichen Minimierungsort als Bestandteil der Anlage eingefügt; hierzu zählt auch das Mitführen von Erdleiterseilen.

Voraussetzungen: *Die baulichen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit die zusätzlichen Leitungs- und Zubehörteile angebracht werden können. Mindestisolierluftstrecken zwischen den Schirmen und den spannungsführenden Leiterseilen und der Mindestbodenabstand müssen eingehalten werden.*

Wirksamkeit: *Die Maßnahme wirkt überwiegend auf die elektrische Feldstärke. Die Wirksamkeit ist abhängig von der Art und Ausführung, in der Regel aber niedrig. Erdseile haben nur Abschirmwirkung bei Anbringung unterhalb oder seitlich der Leitungssysteme.*

Hinweise: *Das Einbringen zusätzlicher Seile erfordert in den meisten Fällen wegen zu gewährleistendem Bodenabstand eine Erhöhung des Mastes und damit verbunden eine Überprüfung der Statik und gegebenenfalls bauliche Anpassungen. Der zusätzliche Aufwand ist bei Neubau und wesentlicher Änderung abhängig von der geplanten Ausführung und von der Länge des zu schirmenden Leitungsstücks.*

5.3.1.3 Minimieren der Seilabstände

Die Abstände zwischen den Leiterseilen werden minimiert; hierzu gehört auch die Minimierung der Seilabstände innerhalb eines Stromkreises und zu anderen Stromkreisen.

Voraussetzungen: *Die Maßnahme ist bei allen Leitungen möglich und kann bei Neubau realisiert werden. Immer wenn die Mastkopfbilder geändert werden sollen, ist die Maßnahme auch bei einer wesentlichen Änderung möglich. Mindestisolierluftstrecken zwischen den Seilen, zwischen Leiterseilen und dem Mast sowie anderen geerdeten Anlagenteilen oder zum Boden müssen eingehalten werden. Durch besondere Ausführung der Masten und Spannungsfelder bei geringem Durchhang kann eine deutliche Verringerung des Abstandes zwischen Leiterseilen und Stromkreisen erreicht werden.*

Wirksamkeit: *Die Wirksamkeit ist hoch. Sie wird allerdings von anderen Anlagenparametern beeinflusst und ist abhängig vom Abstand zu den Leitern.*

Hinweise: *Kurze Luftstrecken können in Abhängigkeit von der Spannungsebene Geräuschemission durch Koronaeffekte fördern und besondere Maßnahmen bei der Wartung, zum Beispiel zur Besteigbarkeit, erfordern, wenn mehr als ein System an einem Mast geführt wird. Die Maßnahme wird beeinflusst durch die Ausschwingweite und die Mindestisolierluftstrecke der Leiterseile. Bei einer neu zu bauenden Leitung verursachen minimierte Seilabstände nur geringen zusätzlichen Aufwand.*

5.3.1.4 Optimieren der Mastkopfgeometrie

Zwischen möglichen Masttypen, wie zum Beispiel Tonnenmast und Donaumast, wird derjenige ausgewählt, dessen Mastkopfbild eine für die Kompensation von entstehenden elektrischen und magnetischen Feldern geometrisch günstige Aufhängung der Leiterseile

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



ermöglicht. Die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Masttypen bestehen in den geometrischen Anordnungsmöglichkeiten der Leiterseile, die horizontal, vertikal oder dreieckförmig sein können. Dabei ist für die Kompensation von elektrischen und magnetischen Feldern grundsätzlich eine vertikale Anordnung der Außenleiterseile günstiger als eine horizontale.

Voraussetzungen: Bei Neubau können der Masttyp und damit die Mastkopfgeometrie festgelegt werden. Bei Neubau und insbesondere wesentlicher Änderung können technische Randbedingungen wie die Mitführung mehrerer Systeme die Wahlmöglichkeiten einschränken.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch.

Hinweise: Der zusätzliche Aufwand für einen Masttyp mit günstiger Mastgeometrie kann schon bei Neubau zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Masthöhen erheblich sein. Bei wesentlicher Änderung kann die Wahl eines günstigeren Masttyps oft an technische Grenzen stoßen.

5.3.1.5 Optimieren der Leiteranordnung

Bei einer vorgegebenen geometrischen Seilanordnung wird die Anschlussreihenfolge der Drehstromleiter an die Seile so gewählt, dass sich die von den einzelnen Leiterseilen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder bestmöglich kompensieren.

Voraussetzungen: Es muss mehr als ein Stromkreis auf dem Mast installiert sein. Bei Neubau kann die Maßnahme durchgeführt werden; bei wesentlicher Änderung ist sie möglich, wenn ein längerer Leitungsabschnitt oder die gesamte Leitung betroffen ist.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch und wird von anderen Anlagenparametern, wie dem Mastkopfbild oder dem Leiterseilabstand beeinflusst. Geringe Leiterabstände erhöhen die Wirksamkeit. Zudem ist die relative Wirksamkeit abhängig vom Abstand zu den Leiterseilen. Sie ist vor allem im Einwirkungsbereich örtlich sehr unterschiedlich und kann punktuell deutlich schwanken.

Hinweise: Die optimale Leiteranordnung kann für das elektrische und magnetische Feld und für den Nah- und den Fernbereich unterschiedlich sein. Weil sie auch von den Lastflussrichtungen der Einzelsysteme abhängt, kann sich die Leitung nach einer Lastflussumkehr in einem Stromkreis in einem nicht optimierten Zustand befinden. Der zusätzliche Aufwand für eine neu zu bauende Leitung ist gering. In kurzen Leitungsabschnitten ist eine Änderung der Leiteranordnung meist mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Schlussfolgerungen:

Die Erhöhung der Masten (5.3.1.1), das Anbringen von Schirmseilen (5.3.1.2), die Reduktion der Leiterseilabstände (5.3.1.3), die Optimierung der Mastkopfgeometrie (5.3.1.4) und die Optimierung der Phasenseilanordnung (5.3.1.5) werden als technische Maßnahme im Sinne der 26. BImSchVVwV vorgeschlagen. Einzelne oder auch die Kombination einiger dieser Maßnahmen stellen die konstruktiven Planungsgrundlagen der Kompaktmasten dar.

In 5.3.1.4 wurden die Mastkopfbilder Donaumast und Tonnenmast exemplarisch angeführt, es ist jedoch immer jenes Mastkopfbild auszuwählen, das hinsichtlich der Kompensation von entstehenden elektrischen und magnetischen Feldern eine geometrisch günstigere Aufhängung der Leiterseile ermöglicht. Grundsätzlich ist die vertikale Anordnung günstiger als die horizontale oder die dreiecksförmige. Vergleicht man die konstruktiven Merkmale von klassischen Stahlgittermasten (Donau und Tonne) und Kompaktmast mit den angeführten technischen Kriterien zur Minimierung der elektrischen und magnetischen Felder, so können folgende konstruktive Merkmale mit dem Kompaktmast am besten realisiert werden:

- Die Masthöhe ist ohne wesentliche Maßnahmen einfach zu erhöhen.
- Die Mastkopfgeometrie ist sehr schmal, dadurch liegt ein hoher Feldgradient vor und ein rascher Feldabbau ist gegeben, wodurch geringere Felder und Lärmpegel erzielbar sind.
- Die Abstände der Leiterseile sind durch geeignete Wahl von Verbundisolatoren, Abstandsseparatoren und Abspannseile auf ein Minimum reduzierbar.
- Durch Anbringen von Schirmseilen unter den Leiterseilen ist eine Feldreduktion möglich.
- Leiterseile sind vorzugsweise vertikal angeordnet, jedoch auch in anderen Geometrien zur Reduzierung der Felder realisierbar.

4.4 Bedeutung für den Einsatz von Kompaktmasten

Nach §49 EnWG sind die Anforderungen an Energieanlagen dann erfüllt, wenn diese den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ entsprechen oder in einem anderen Mitgliedsstaat der Europäischen Union unter den jeweilig geltenden Regelungen und Anforderungen rechtmäßig hergestellt und in den Verkehr gebracht wurden sowie die gleiche Sicherheit gewährleisten. Sowohl die Mastgründung als auch der Mastschaft kann die Anforderungen der VDE 0210 bei entsprechender Konstruktion erfüllen. Zuvor aufgezeigte 380kV-Kompaktmastleitungen befinden sich seit mehreren Jahren in anderen EU-Staaten in Betrieb.

Gemäß 26. BImSchV sind Niederfrequenzanlagen und damit auch Höchstspannungsfreileitungen nach dem „Stand der Technik“ zu minimieren. In der 26. BImSchVVwV werden technische Möglichkeiten zur Minimierung der elektromagnetischen Felder aufgelistet, wobei bei Niederfrequenzanlagen jene Minimierungsmaßnahmen unter dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu bevorzugen sind, die ein geringeres Magnetfeld zur Folge haben (Artikel 3.1).

Schlussfolgerungen:

Bei Kompaktmasten für Freileitungen, die in ihrer Ausführung den Vorgaben der Normenreihe VDE 0210 entsprechen, ist davon auszugehen, dass diese gemäß §49 EnWG den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ entsprechen.

Kompaktmasten sind geeignet, dem in §4 Abs. 2 der 26. BImSchV in Verbindung mit der 26. BImSchVVwV enthaltenen Minimierungsgebot zur Reduktion von elektrischen und magnetischen Feldern, unter Einhaltung des „Standes der Technik“, zu entsprechen.

5 Zusammenfassende Betrachtung

5.1 Technische, raumplanerische und ökologische Aspekte

Aus den Schlussberichten des Forschungsprojekts KoHöMaT und den zitierten Quellen war zu folgern, dass bei Kompaktmastleitungen im Vergleich zu klassischen Stahlgittermasten folgende Unterschiede bestehen:

- Die elektromagnetischen Felder weisen aufgrund der schlankeren Seilanordnung einen höheren Gradienten auf, wodurch sich diese Felder rascher mit der Entfernung zur Trassenmitte abbauen.
- Die Grenzwerte nach der 26. BImSchV können eingehalten werden.
- Es wurden geringere Schalldruckpegel aufgrund der Leitungskorona im Nahbereich der Leitung errechnet, die Grenzwerte nach der TA Lärm werden eingehalten.
- Es bestehen konstruktiv vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten im Mastkopf, wodurch unterschiedlichste Seilanordnungen zur Erfüllung der technischen Möglichkeiten zur Minimierung gemäß 26. BImSchVVwV (Felder, Schall, Design, Seildurchhang udgl.) bestmöglich realisiert werden können.
- Die geringere Rauminanspruchnahme durch den schlankeren Mastschaft und den Mastkopf wirkt sich vorteilhaft bei der Errichtung und Grundinanspruchnahme sowie der Ersatzgeldzahlung aus.
- Es liegen kürzere Bauzeiten vor und geringere Instandhaltungsaufwendungen sind zu erwarten.
- Beim Einsatz von Betonmasten ist eine bessere Ökobilanz bei der Lebenszyklusanalyse gegeben.
- Ein Kostenvergleich kann nur unter einer konkreten Projektierung objektiv erstellt werden. Die oft widersprüchlichen Literaturangaben lassen keine aussagekräftige Analyse der Lebenszykluskosten zu.

5.2 Aspekte hinsichtlich §49 EnWG und 26. BImSchV

Die vorgenannten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Kompaktmaste geeignet sind, die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. für Freileitungen, Normenreihe VDE 0210, einzuhalten und damit die gemäß dem Rechtsgutachten aufgezeigten Anforderungen des §49 EnWG, insbesondere zur Vermutung über die Einhaltung der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“, zu realisieren.

Daneben ermöglicht der Kompaktmast - unter Beachtung der Anforderungen zum „Stand der Technik“ - die Einhaltung des Minimierungsgebots aus §4(2) der 26. BImSchV eher als der Stahlgittermast.

5.3 Eignung der Kompaktmasten für den Einsatz im deutschen Übertragungsnetz

Aus heutiger Sicht stellt der Kompaktmast eine Bauform für Höchstspannungsfreileitungen dar, die speziell für topologisch kritische Situationen sehr gut geeignet ist. Durch ein individuelles Design

As a member of the Austrian Association
of Consulting Engineers represented by



kann der Kompaktmast an die jeweiligen Gegebenheiten bestmöglich an die technischen und ökologischen Anforderungen angepasst werden. Studien haben gezeigt, dass man mit einem modernen Mastdesign auch eine bessere Akzeptanz der Anrainer erzielt, wodurch sich die Verfahren erheblich reduzieren lassen könnten.

Ein standardisierter Kompaktmast wird sich nicht nur in den topologisch kritischen Leitungsabschnitten rechnen. Durch eine Serienproduktion wird eine bessere Wirtschaftlichkeit und ökologische Verträglichkeit erzielbar werden und dadurch der Einsatz auch für längere Leitungsabschnitte möglich sein.

Zur Erfüllung des Minimierungsgebots gemäß BImSchVVwV wird der Kompaktmast zukünftig eine hervorragende Alternative zum Stahlgittermast bieten und unter dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit wird der Kompaktmasttyp zur Reduktion elektromagnetischer Felder bevorzugt einzusetzen sein.


SUMEREDEP
03. MRZ 2017

6 Literatur

- [1] H. Seidl and R. Heuke, "Technologieübersicht: Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen," Dena, 2014.
- [2] P. Aubry, I. Groten, and S. Krischowsky, "Neubau der 110/380kV Höchstspannungsfreileitung Rommerskirchen - Sechtem, Bl . 4215 - Umweltstudie," Aachen, 2011.
- [3] CIGRE WG B2.08, "Innovative Solutions for Overhead Line Supports - CIGRE Brochure 416," 2010.
- [4] M. Amman, P. Dalleves, K. O. Papailiou, M. Leva, and S. Villa, "A New 400 kV Line with Compact Towers and Composite Insulated Crossarms," in *Cigre Session 1998*, 1998, p. 9.
- [5] L. J. Behncke, Sparrow and O. Tong, Y K, White, "500 kV Compact Line Design for the Greater Bangkok Area," in *Cigre Session 1998*, 1998, p. 7.
- [6] S. AL Jallaf, J. George, G. Gheorghita, G. Dragan, and D. Marginean, "400 kV compact lattice structure tower designed in DUBAI in the restricted corridors. Effects of electric and magnetic fields.," in *CIGRE Session 2010*, 2010, pp. 1–7.
- [7] Juryrapport, "Nationale St Iprijs 2016," 2016.
- [8] R. Hammer and G. Peters, "Heijmans and Europoles win provisional Wintrack II TenneT contract," *Globenewswire* 20161216, 2016.
- [9] APG, "VERBUND und Kunststudenten setzen neue Akzente im Mastdesign," *Pressemeldung*, 2010. [Online]. Available: <https://www.verbund.com/de-at/ueber-verbund/news-presse/presse/2010/04/13/mastdesign>.
- [10] APG, "APG - Projekte - Wie wird die Salzburgleitung aussehen?" [Online]. Available: <https://www.apg.at/de/projekte/380-kV-salzburgleitung/Aussehen>. [Accessed: 16-Feb-2017].
- [11] K. Reich, O. Oberzaucher, and M. Leonhardsberger, "Innovationssektion der APG zur Erprobung von innovativen Technologien für Upgrades von Hochspannungsfreileitungen," in *Symposium Energieinnovation, 14.*, 2016, p. 6.
- [12] BImSchVVwV, *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV)*. 2016.
- [13] S. Großmann, "Untersuchungen zum Einfluss elektrischer und thermischer Belastungen auf die Materialparameter und die elektrische Lebensdauer des bewehrten UHPC (KoHöMaT - Schlussbericht 03ET7516E)," Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH), TU Dresden, 2016.
- [14] R. Bräunlich, "Magnetische und elektrische Felder und Koronaschallemissionen einer Kompaktfreileitung, Vergleich mit einem Donaumastbild," FKH - Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, 2016.
- [15] O. Plotzke, "EMV-Berechnung, Untersuchung von vier verschiedenen Varianten von Stahlvollwandmasten," Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie GmbH, Berlin, 2016.
- [16] P. Knödel and K. Rohr, "Tragverhaltens von Stahlmasten mit polygonalem Querschnitt

- (KoHöMaT - Schlussbericht 03ET7516G),“ KIT - Karlsruhe Institut für Technologie, 2016.
- [17] A. Fuchs, “Entwurf einer Referenz-Freileitung und Bestimmung der Grundparameter (KoHöMaT - Schlussbericht 03ET7516C),“ Fichtner Stuttgart, 2016.
- [18] M. Stumpp, “Ermittlung umweltrelevanter Auswirkungen,” Fichtner Stuttgart, 2016.
- [19] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm*. 1998.
- [20] F. Hofbauer, “Energiewende und Versorgungssicherheit ein Widerspruch?,” 2016.
- [21] Kriedemann, “Vergleichende Bewertung von 380-kV-Leitungen aus der Sicht der Belange von Natur und Landschaft Kompaktmast - Standardmast,” Kriedemann Ing.-Büro für Umweltplanung, Schwerin, 2012.
- [22] RWE Aktiengesellschaft, “Akzeptanz für Grossprojekte,” 2012.
- [23] Gallup Institut, “Beitrag neuer Mastdesigns auf die Reduktion von Nutzungskonflikten bei 380-kV-Freileitungen (MaRNu),” 2011.
- [24] H. Dreyfuss, “Wettbewerb schafft Designinnovationen,” *Grid Expo 2015*, pp. 12–16, 2015.
- [25] EnWG, *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*. 2016.
- [26] BImSchV, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder)*. 2013.
- [27] K. Kuch, “Kurzgutachten ‘Einsatz von Kompaktmasten hinsichtlich dessen Einklang zum EnWG,’” Kanzlei Kuch, Jena, 2017.
- [28] M. Seibel, “Abgrenzung der ‘anerkannten Regeln der Technik’ vom ‘Stand der Technik,’” *NJW*, no. 41, pp. 3000–3004, 2013.