


Projekt	Ostbayernring – Ersatzneubau 380/110 kV Höchstspannungsleitung Redwitz-Schwandorf einschließlich Rückbau der Bestandsleitung
Abschnitt	Umspannwerk Etzenricht – Umspannwerk Schwandorf (Ltg. Nr. B161)

Planfeststellungsunterlage Unterlage 13.2

Anforderungen an Mastbauformen und Bewertung von Kompaktmasten

Änderungshistorie		
	Name/Unterschrift	Datum
Aufgestellt		17.08.2018 30.06.2021
	Lars Fischer	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Anforderungen an Mastbauformen.....	5
2.1	Verzicht auf dauerhafte Arbeits- und Montageflächen.....	5
2.2	Besteigbarkeit der Masten im laufenden Betrieb	5
2.3	Begehbarkeit der Traversen.....	7
2.4	Betriebssicherheit unter Eislast	8
2.5	Langfristige Lebensdauer.....	8
2.6	Beschränkung auf einstufige Mastschäfte (Monopole)	9
2.7	Einhaltung des Trassenverlaufs und der Maststandorte.....	9
2.8	Ökonomische Realisierbarkeit	10
3	Bewertung von Kompaktmasten.....	12
3.1	Bewertung von Referenzprojekten	12
3.2	Bewertung von alternativen Mastbauformen für den Ostbayernring	14
3.2.1	2-systemiger Mast in Tonnenkonfiguration	15
3.2.2	2-systemiger Mast in Donaukonfiguration	16
3.2.3	4-systemiger Mast (bei 110-kV-Mitnahme).....	17
3.3	Bewertung der Auswirkungen auf Schutzgüter.....	18
3.3.1	Natur, Pflanzen und Tiere	18
3.3.2	Landschaft	18
3.3.3	Wald	18
3.3.4	Nutzflächen und Boden.....	19
3.3.5	Gesundheit	19
4	Zusammenfassung und Fazit.....	23
5	Referenzen.....	24
	Abbildungsverzeichnis	24

1 Einleitung

Wesentliche Rahmenbedingungen für die Planung und Genehmigung des Ausbaus der Übertragungsnetze in Deutschland sind im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) festgelegt. Das EnWG legt als übergeordnetes Ziel fest, dass die Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität möglichst

- sicher,
- preisgünstig,
- verbraucherfreundlich,
- effizient und
- umweltverträglich

sein soll (§ 1 Abs. 1 EnWG). Dies gilt auch für die Ausgestaltung der Stromversorgung in Deutschland und insbesondere für den Betrieb der Stromnetze. Die Tennet TSO GmbH (TenneT) als Betreiberin von Energieversorgungsnetzen ist verpflichtet, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren und auszubauen (§ 11 Abs. 1 EnWG). Energieanlagen sind dementsprechend so zu errichten und zu betreiben, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Dabei sind (vorbehaltlich sonstiger Rechtsvorschriften) die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu berücksichtigen (§ 49 Abs. 1 EnWG).

Gemäß § 12 Abs. 3 EnWG müssen Betreiber eines Übertragungsnetzes wie TenneT dauerhaft die Fähigkeit des Netzes sicherstellen, die Nachfrage nach Übertragung von Elektrizität befriedigen und insbesondere durch entsprechende Übertragungskapazität und Zuverlässigkeit des Netzes zur Versorgungssicherheit beitragen. Die Aufgaben von TenneT umfassen somit neben dem bedarfsgerechten Netzausbau auch insbesondere den sicheren und zuverlässigen Betrieb und die Instandhaltung des Stromübertragungsnetzes in großen Teilen Deutschlands.

Hinsichtlich der verwendeten Mastbauformen ergeben sich Anforderungen, die sich neben der eigentlichen Errichtung der Maste auch aus dem Betrieb und der Instandhaltung der Maste ableiten. Diese Anforderungen werden im vorliegenden Bericht dargestellt und begründet.

Die klassische Mastbauform im Übertragungsnetz der TenneT ist der Stahlgittermast, wie er in Abschnitt 5 des Erläuterungsberichts der vorliegenden Planfeststellungsunterlagen detailliert dargestellt ist. Auch die Planung für den Ersatzneubau des Ostbayernrings basiert auf den technischen Grundlagen und Eigenschaften von Stahlgittermasten. In letzter Zeit wird immer wieder der Einsatz alternativer Mastbauformen, insbesondere sogenannte Kompaktmaste gefordert. Im vorliegenden Bericht wird dazu der derzeitige Stand bei Entwicklung und Einsatz von Kompaktmasten zusammengefasst und ein möglicher Einsatz im Rahmen des Projekts Ostbayernring bewertet.

2 Anforderungen an Mastbauformen

Die Anforderungen an Mastbauformen werden nicht nur durch den Bau der Maste, sondern auch durch den Betrieb und die Instandhaltung bestimmt. Die DIN EN 50341 (VDE 0210) „Freileitungen über AC 45 kV“ legt die allgemeinen Anforderungen fest, die bei der Planung und Errichtung neuer Freileitungen erfüllt werden müssen. Die Bestimmungen stellen unter anderem die Personensicherheit und den Betrieb einer Freileitung sicher und berücksichtigen Aspekte wie Umweltfragen und die Instandhaltung einer Freileitung.

Diese normativen Regelungen sind allerdings nur als Minimalanforderungen zu verstehen, um entsprechende Freileitungen errichten und betreiben zu dürfen. Ein Übertragungsnetzbetreiber wie TenneT kann und muss darüber hinaus weitere Anforderungen aufstellen, um seiner Aufgabe eines sicheren, zuverlässigen und leistungsfähigen Netzbetriebs gerecht zu werden. Diese zusätzlichen Anforderungen werden im Folgenden dargestellt und begründet.

2.1 Verzicht auf dauerhafte Arbeits- und Montageflächen

Für die Errichtung der Maste sind Zuwegungen zu den geplanten Maststandorten sowie temporäre Flächeninanspruchnahmen an den Maststandorten notwendig, um mit den notwendigen Gerätschaften (Bagger, Krane) arbeiten zu können bzw. Material (Erdaushub, Stahl) ablagern zu können. Um einen dauerhaften Eingriff in privates Eigentum gering zu halten, muss während der langjährigen Betriebsphase der Leitung eine anderweitige Flächen-nutzung (z. B. landwirtschaftliche Nutzung) bis unmittelbar an den Mast heran möglich sein.

Daher ist keine dauerhafte Flächeninanspruchnahme in der Mastumgebung für Stellflächen von Gerätschaften für Inspektion und Wartung der Maste (z. B. Hubsteiger), wie sie z. B. in unmittelbarer Nähe von Windenergieanlagen üblich ist, für die Freileitungsmasten von TenneT und insbesondere auch für die Masten des Ostbayernrings geplant.

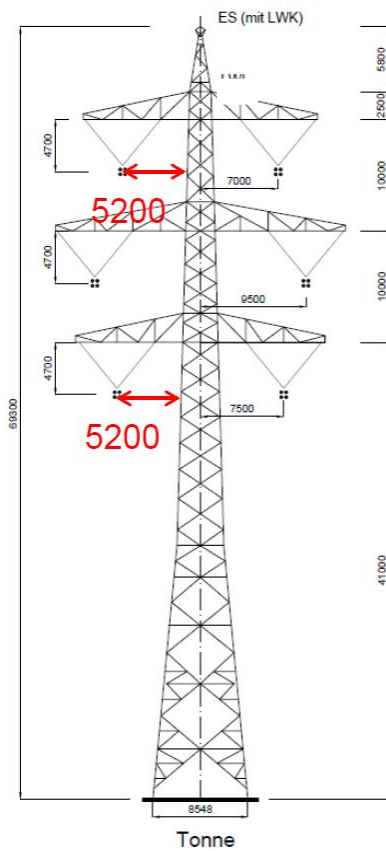
2.2 Besteigbarkeit der Maste im laufenden Betrieb

Während des jahrzehntelangen Betriebs einer Freileitung müssen Techniker die Maste zu Inspektions- oder Wartungsarbeiten erreichen können. Verzichtet man dabei auf dauerhafte Aufstellflächen für Hubsteiger (siehe Abschnitt 2.1), müssen die Mastschäfte durch entsprechend ausgebildetes Personal bestiegen werden können. Da es zudem aufgrund der dauerhaften hohen Auslastung der Stromnetze immer schwieriger wird entsprechende Abschaltzeiten für Inspektionsarbeiten zu bekommen, ist eine Besteigbarkeit der Mastschäfte während des laufenden Betriebs aller Systeme wesentlich für die Verfügbarkeit der Leitungen und somit für die Versorgungssicherheit.

Um diese Besteigbarkeit durch Personen während des Betriebs unter arbeitssicherheitsrechtlichen Aspekten realisieren zu können, müssen die Mindestabstände der innersten

Anforderungen an Mastbauformen und Bewertung von Kompaktmasten

Ostbayernring, Abschnitt Etzenricht - Schwandorf (B161)

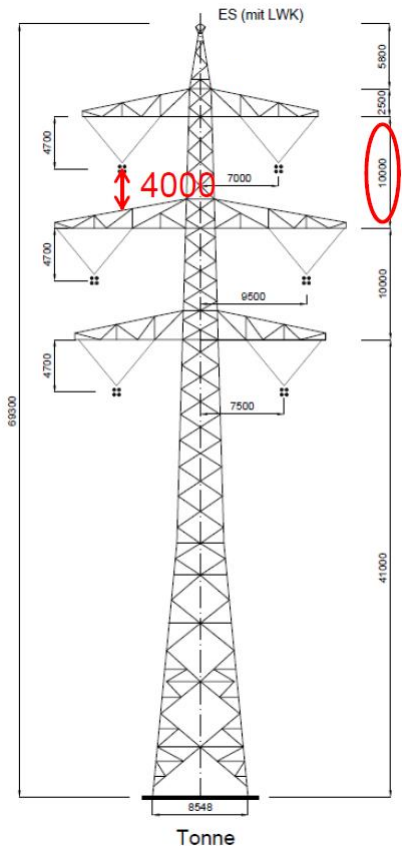


Phase zur Außenkante des Mastchaftes mindestens 5,20 m betragen. Dieser Wert setzt sich zusammen aus dem normativen Mindestabstand bei 380-kV-Systemen von 4,00 m und einem sogenannten Handbereich für den Monteur von 1,20 m. Auch alternative Mastbauformen müssen diese Abstände einhalten um für TenneT aus betrieblichen Aspekten (Arbeitssicherheit, Versorgungssicherheit) akzeptabel zu sein.

Abbildung 1: Abstand Außenkante Mastchaft zur innersten Phase

2.3 Begehbarkeit der Traversen

Auch die Traversen der Maste müssen zu Inspektions- oder Wartungsarbeiten bzw. für Reparaturen im Schadensfall zugänglich sein, dies allerdings nicht während des laufenden Betriebs. Verzichtet man dabei – wie in Abschnitt 2.1 beschrieben – auf dauerhafte Aufstellflächen für Hubsteiger, so bedingt dies eine Begehbarkeit der Traversen durch entsprechend ausgebildetes Personal.



Für diese Arbeiten, die oftmals durch mitgeführtes Werkzeug und Ersatzmaterial noch erschwert werden, sind entsprechende Sicherungsmaßnahmen (Möglichkeiten für das Anbringen von Sicherungshaken) aus Sicht der Arbeitssicherheit zwingend erforderlich. Dazu dienen unter anderem die sogenannten Obergurte der Traversen und daran angebrachte Handläufe. Diese Obergurte sind Stahlgitterkonstruktionen an der Oberseite der Traversen, die die statische Stabilität der Traversen gewährleisten und die zu den unter Spannung stehenden Systemen wieder normativ vorgeschriebenen Mindestabstände einhalten müssen. Insgesamt ergibt sich hieraus unter Berücksichtigung der Längen und des Ausschlagverhaltens der Isolatorketten ein konstruktionsbedingter vertikaler Abstand der Traversen (auch Stockwerksabstand genannt) von 10,00 m.

Auch alternative Mastbauformen müssen eine Begehbarkeit der Traversen mit ausreichender Bewegungsfreiheit und unter Berücksichtigung arbeitssicherheitstechnischer Aspekte gewährleisten.

Abbildung 2: Abstand Obergurt Traverse zur darüber liegenden Phase und Stockwerksabstand

2.4 Betriebssicherheit unter Eislast

Die Elektrifizierung Bayerns auf Hochspannungsebene wurde in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts durch die damalige Bayernwerk Aktiengesellschaft bewerkstelligt. TenneT kann als Rechtsnachfolgerin der damaligen Bayernwerk Aktiengesellschaft somit auf eine nahezu 100jährige Betriebserfahrung mit Freileitungen im süddeutschen Raum zurückgreifen.

Zu Beginn des Trassenbaus in Bayern wurden dabei Mastbilder aus dem bereits gebauten mitteldeutschen Netz übernommen, was in den ersten Jahren zu zahlreichen und massiven Störungen (Kurzschlüsse, Seilrisse, Mastumstürze) bei ungünstigen Witterungsbedingungen (Schnee- und Eislast) geführt hat. Eine Denkschrift der Bayernwerk Aktiengesellschaft aus dem Jahr 1932 [1] begründet dies mit „den ungenügenden waagrechten und senkrechten Phasenabständen, also in der zu geringen Sicherheit gegen Phasenzusammenschlag bei Zusatzbelastungen (Schnee, Eis und Wind)“ und führt weiter dazu aus, dass „die vom VDE verlangten Phasenentfernungen in der Praxis nicht genügen“. Insbesondere ist auch ein horizontaler Versatz der Phasen gegeneinander notwendig um auch bei Ausschwingungen bei Eislastabwurf und seitlichen Winden keine Kurzschlüsse zu bekommen.

Dies ist in den von TenneT standardmäßig realisierten Mastkopfbildern verwirklicht und muss auch für alternative Mastbauformen zwingend eingehalten werden. Nur so kann dem gesetzlichen Anspruch auf Sicherheit und Zuverlässigkeit (siehe Abschnitt 1) entsprochen und es können Störungen und damit verbundene Netzausfälle vermieden werden.

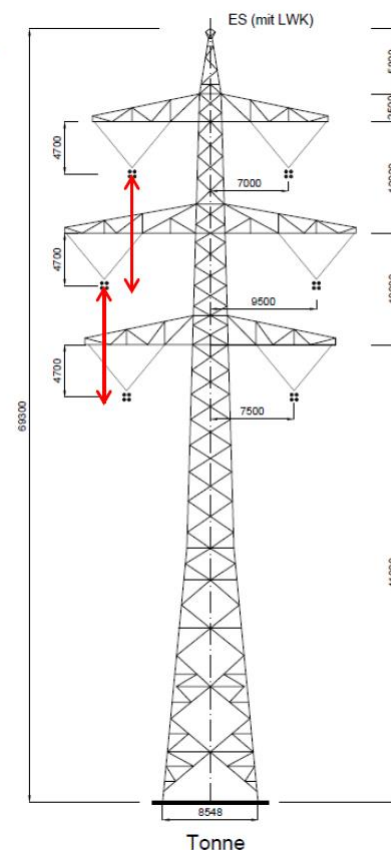


Abbildung 3: Horizontaler Phasenversatz

2.5 Langfristige Lebensdauer

Der Bau von neuen Freileitungstrassen stellt sowohl für TenneT als auch für die Gesellschaft eine hohe Investition dar. Im Gegenzug stehen bisherige Freileitungstrassen auch sehr lange zur Verfügung, die erwartete technische Lebensdauer der wichtigsten Komponenten eines Freileitungssystems beträgt 100 Jahre für Stahlgittermasten bei regelmäßiger Wartung (d. h. Überprüfung und gegebenenfalls Nachbesserung des Schutzanstrichs) sowie ca. 50-70 Jahre für Leiterseile und Isolatoren.

Beim Neubau werden die Einzelteile der Stahlgittermaste feuerverzinkt und beschichtet, nach dem Zusammenbau vor Ort wird eine weitere Beschichtung aufgetragen. Auch alternative Mastbauformen müssen eine ähnlich lange Lebensdauer gewährleisten und sollten daher im Idealfall feuerverzinkt werden. Für Bauteile, welche auf Grund ihrer Größe nicht feuerverzinkt werden können, ist ein entsprechendes Korrosionsschutzkonzept zu erstellen. Dies gilt insbesondere auch für Stellen die einer langfristigen Inspektion und Wartung nicht zugänglich sind (evtl. Innenraum von Vollwandmasten). Ein schlüssiges Korrosionsschutzkonzept, das die langfristige Lebensdauer sicherstellt, ist unverzichtbar.

2.6 Beschränkung auf einstielige Mastschäfte (Monopole)

Bei der Forderung nach dem Einsatz von Kompaktmasten wird oft auf Referenzprojekte verwiesen, bei denen entsprechende Mastbauformen bereits eingesetzt wurden bzw. in Planung sind. Bei genauerer Betrachtung lässt sich feststellen, dass in vielen dieser Projekte auf sogenannte Duopole (auch Bipole oder Doppelpylone genannt) zurückgegriffen wird.



Abbildung 4: Wintrack-Pylon (Doppelpylon)

genannte Duopole (auch Bipole oder Doppelpylone genannt) zurückgegriffen wird.

Dies erscheint oftmals notwendig um den hohen statischen Anforderungen, insbesondere auch bei Winkelmasten gerecht werden zu können. Beispielhaft ist in Abbildung 4 der sogenannte Wintrack-Pylon dargestellt, wie er von der TenneT in niederländischen Projekten eingesetzt ist. Für den Ostbayernring wird der Einsatz solcher Doppelpylone nicht angestrebt, da sich dadurch weder Vorteile für das Landschaftsbild (Sichtbarkeit von Doppelpylonen ist deutlich erhöht) noch für den Eingriff in privates Eigentum (Verlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche) ergeben. Mögliche alternative Mastbauformen sollten daher mit einstieligen Mastschäften (Monopolen) den statischen Anforderungen gerecht werden.

2.7 Einhaltung des Trassenverlaufs und der Maststandorte

Die Planungen für den Ersatzneubau des Ostbayernrings haben 2015 begonnen, wurden 2017 konkretisiert (Festlegung Maststandorte) und basieren auf den technischen Möglichkeiten von typischen Stahlgittermasten, wie sie bei TenneT standardmäßig eingesetzt werden.

Die technischen Möglichkeiten werden im Wesentlichen durch die realisierbaren Spannfeldlängen und die möglichen Winkel bei Richtungsänderungen der Leitung bestimmt. Die Spannfeldlängen, d. h. die Abstände zwischen den Masten, liegen im Mittelwert bei etwa 400 m, wobei in einzelnen Fällen auch Werte bis zu 630 m möglich sind. Damit kommt man bei dem insgesamt etwa 185 km langen Trassenverlauf des Ostbayernrings auf etwa 460 notwendige Maststandorte. Beim geplanten Ersatzneubau wird es eine Vielzahl sogenannter Winkelabspannmaste geben, die immer dann eingesetzt werden, wenn der Verlauf der Trasse nicht mehr geradlinig (= 180 Grad) ist, sondern davon abweicht. Dies ist oft durch Kreuzungen mit anderen Infrastrukturen (insbesondere der Bestandsleitung) oder durch einzuhaltende Abstände zur Wohnbebauung begründet. Dabei können Winkel typischerweise bis zu 120 Grad realisiert werden, in Einzelfällen auch noch darunter (Minimalwert der derzeitigen Planung ist 105 Grad).

Mögliche alternative Mastbauformen, die beim Ersatzneubau des Ostbayernrings eingesetzt werden sollten, müssten entsprechende technische Möglichkeiten (unter den Anforderungen der Windlastzone 2 und der Eislastzone 2 bzw. 3) realisieren können, damit die geplanten Maststandorte beibehalten werden können. Eine Umplanung des Trassenverlaufs, insbesondere mit einer Vergrößerung der Anzahl der Maststandorte ist auf Grund der schon weit fortgeschrittenen Planung ohne massive Zeitverzögerungen nicht realisierbar. Eine Erhöhung der Anzahl an notwendigen Maststandorten ist auch aus Sicht der Eingriffsminimierung in privates Eigentum abzulehnen.

2.8 Ökonomische Realisierbarkeit

Der Netzausbau in Deutschland ist ein wichtiger Teil der Energiewende, stellt aber sowohl für die Übertragungsnetzbetreiber wie TenneT als auch für die Volkswirtschaft insgesamt eine enorme Investition dar, die es zu kontrollieren gilt. Daher nennt das EnWG auch die preisgünstige Energieversorgung in seinen Zielen (siehe Abschnitt 1).

Die Investitionskosten für den Neubau einer Höchstspannungsfreileitung werden nach [2] mit etwa 1,0 bis 1,4 Millionen Euro pro Kilometer beziffert. Für den Ostbayernring, der durch topographisch anspruchsvolles Gelände verläuft, werden die Kosten eher am oberen Rand oder sogar über dieser Spanne liegen. Ebenfalls in [2] wird ausgeführt, dass Kompaktmasten generell höhere Kosten als die konventionellen Mastbauweisen verursachen. Demnach werden für Stahlvollwandmasten die Investitionskosten derzeit auf das etwa 1,5- bis 3-fache gegenüber einem Stahlgittermast beziffert. Nach der Erfahrung von TenneT ergeben sich Mehrkosten nicht nur bei den Materialkosten der Maste (ein Stahlvollwandmast hat etwa das 1,5-fache Gewicht eines entsprechenden Stahlgittermasts, bei Betonmasten liegt der Faktor bei 3,5), sondern auch die stärkere Gründung und insbesondere der notwendige Wegebau verursachen deutliche Mehrkosten. Bei einer Gesamtbetrachtung ist daher von einer Kostensteigerung auf das etwa 4-fache auszugehen. Um für ein Projekt wie den Ostbayernring zu konkreten Aussagen zu kommen, sind projektspezifische Vergleiche der Mastbauformen

Anforderungen an Mastbauformen und Bewertung von Kompaktmasten

Ostbayernring, Abschnitt Etzenricht - Schwandorf (B161)



und eine Bewertungen der Gesamtwirtschaftlichkeit notwendig. Dazu sind aber von den Kompaktmastherstellern nachprüfbar technische Auslegungen und zuverlässige Kostangaben eine zwingende Voraussetzung.

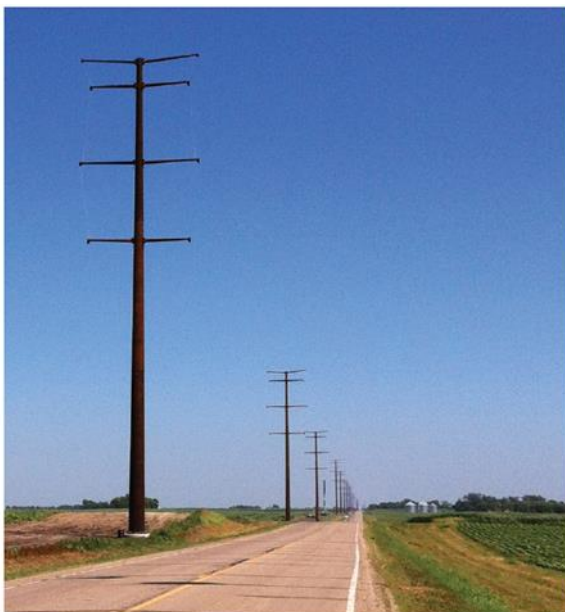
Der finanzielle Aufwand und die Anerkennung der Kosten durch die Regulierung sind relevante Kriterien bei der Wahl unterschiedlicher Mastbauarten.

3 Bewertung von Kompaktmasten

3.1 Bewertung von Referenzprojekten

In Deutschland ist der Einsatz von Kompaktmasten (Stahlvollwandmasten und Schleuderbetonmasten) in der Hochspannungsebene (110 kV) seit einigen Jahrzehnten erprobt, auf der Höchstspannungsebene (380 kV) kann bislang nicht auf Erfahrungen mit kompakten Mast-/Leitungsbauweisen zurückgegriffen werden [2]. In der Diskussion über den Entwicklungsstand von kompakten Mast- oder Leitungsbauweise wird stets auf zahlreiche Referenzprojekte verwiesen, die bereits errichtet wurden oder zumindest in Planung sind. Eine umfangreiche und relativ aktuelle Auflistung ist z. B. in [3] zu finden.

Bei genauerer Betrachtung stellt man jedoch fest, dass die meisten der genannten Referenzprojekte nicht mit den Anforderungen des Ostbayernrings kompatibel sind. Insbesondere die internationalen Projekte genügen oft nicht den europäischen und deutschen Normvorschriften und sind daher nicht direkt übertragbar [2]. Darüber hinaus beruhen die meisten Leitungsbauten auf einem Inspektions- und Wartungskonzept, was auf dauerhafte Zuwegungen und Arbeitsflächen ausgelegt ist. Diese Maste sind also nicht durch Monteure bestiegbar, sondern es ist immer der Einsatz von Kränen oder Hubsteigern notwendig. Beispielhaft sei hier auf das jüngste US-amerikanische Projekt Big Stone South - Brookings County 345 kV Transmission Line verwiesen (siehe Abbildung 5 mit Unterschrift).



Single pole steel structures will primarily be used to reduce land impacts; some locations may require two pole structures. Poles are between 140 and 170 feet tall and will be about 1,000 feet apart. Typically, a 150-foot wide right-of-way will be required.

Abbildung 5: US-amerikanisches Projekt Big Stone South – Brookings County 345 kV Transmission Line

Ähnliches gilt aber für alle Projekte der Tennet mit Wintrack-Masten in den Niederlanden. Auch hierfür ist grundsätzlich der Einsatz von Hubsteigern für Wartungsarbeiten vorgesehen, was natürlich bei den topographischen Gegebenheiten in den Niederlanden auch einfacher realisierbar ist als in Mittelgebirgen.

Ein analoger Ansatz galt auch für ein geplantes Projekt der TenneT in Schleswig-Holstein (380-kV-Leitung Brunsbüttel – Niebüll, Westküstenleitung) mit einer Adaption der Wintrack-Maste für Deutschland (Ausführung als Doppel-Pylon in Schleuderbetonbauweise, Fotomontage in Abbildung 6). Die geplanten Maste dieser Pilotstrecke (10 Maste auf etwa 2 km Länge) hätten alle gut zugänglich an einer Straße im Industriegebiet Brunsbüttel gestanden, so dass der Einsatz von Hubsteigern problemlos möglich gewesen wäre. Allerdings wurde dieses Vorhaben aufgrund diverser technischer Schwierigkeiten und finanziellen Unwägbarkeiten wieder verworfen. Der entsprechende Streckenabschnitt wird nun

doch mit konventionellen Stahlgittermasten realisiert.



Abbildung 6: Verworfenener Planungsstand eines Abschnitts der Westküstenleitung bei Brunsbüttel (Fotomontage)

Dahingegen wird ein Pilotprojekt der Amprion (380-kV-Leitung Wesel – Doetinchem/NL, etwa 7 km lange Teilstrecke mit insgesamt 22 Stahlvollwandmasten) derzeit umgesetzt. Aus statischen Gründen wurde für das Pilotvorhaben ein Streckenabschnitt mit nur zwei 380-kV-Systemen ausgewählt, mehrsystemige Ausführungen (z. B. bei 110-kV-Mitnahme), wie sie beim Ostbayernring vielfach benötigt werden, sind noch nicht realisierbar. Die Leitung befindet sich derzeit im Bau, der inzwischen nahezu abgeschlossen ist.

Am interessantesten aus Sicht des Ostbayernrings ist derzeit ein Pilotprojekt der TransnetBW (380-kV-Leitung Birkenfeld – Pkt. Ötisheim). Dort sollen Vollwandmaste mit Stahlgittertraversen kombiniert werden, so dass eine Besteigbarkeit der Maste und der Traversen möglich ist. Diese Maste haben ähnliche geometrische Abmessungen des Mastkopfes und der Gesamthöhe, jedoch durch den Stahlvollwandschaft geringere Abmessungen des Mastschafts und damit geringere Bodenaustrittsmaße. Genauere Angaben der Dimensionen sind derzeit noch nicht verfügbar, da eine Detailplanung der Vollwandmaste (inkl. der statischen Nachweise) noch aussteht. Das Pilotprojekt für den Bau der Vollwandmaste gliedert sich in zwei Teilabschnitte: Im Abschnitt auf der Gemarkung von Pforzheim-Eutingen entlang der Autobahn A8 sollen 7 Vollwandmaste errichtet werden, diese werden als reine 380-kV-Leitung ausgeführt. Im zweiten Teilabschnitt im Bereich der Gemarkung Kieselbronn sollen weitere 7 Vollwandmaste als Gemeinschaftsleitung mit der DB Energie ausgeführt werden.

Auf diesen Masten werden sowohl 380-kV- als auch 110-kV-Stromkreise aufgelegt werden. Vor allem dieser zweite Pilotabschnitt stellt wohl eine besondere technische Herausforderung dar. Derzeit befindet sich das Projekt in der Vorbereitung zur Planfeststellung, die Masten sind daher noch nicht in der Praxis erprobt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass bisher weder international noch in Deutschland ein Leitungsbau mit Kompaktmasten erfolgt ist, der den Randbedingungen und Erfordernissen des Ostbayernrings wie in Abschnitt 2 dargelegt entspricht.

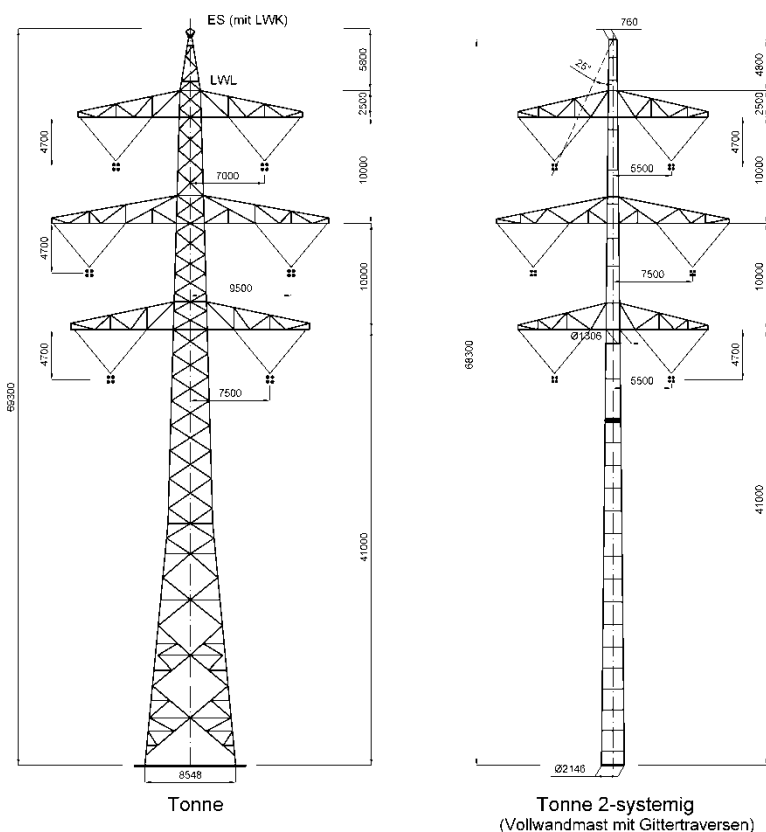
3.2 Bewertung von alternativen Mastbauformen für den Ostbayernring

Da es derzeit auf dem Markt noch keine Kompaktmaste gibt, die den Erfordernissen und den Randbedingungen des Ostbayernrings nach Abschnitt 2 gerecht werden, hat TenneT intern selbst entsprechende Auslegungen und Skizzen erstellt. Damit können die tatsächlichen Auswirkungen des Einsatzes besser abgeschätzt werden als mit den zum Teil nicht realisierbaren Darstellungen aus Werbebroschüren. In den folgenden Abschnitten werden diese möglichen Alternativen für den Ostbayernring dargestellt und erörtert. Zudem wurde Anfang August 2017 eine detaillierte Leistungsbeschreibung an den Bundesverband Kompaktmaste übergeben, verbunden mit der Anfrage zu einer Entwicklung für verschiedene Mastkonfigurationen, um die technische Machbarkeit von Kompaktmasten mit Stahlgittertraversen nachprüfbar aufzuzeigen. Hierzu wurden in der Zwischenzeit erste Ausarbeitungen vom Bundesverband Kompaktmaste vorgelegt. Diese sind aber noch in sich unstimmgig und unvollständig, so dass hierzu derzeit noch keine abschließende Bewertung vorliegt.

3.2.1 2-systemiger Mast in Tonnenkonfiguration

Die unten stehende Abbildung 7 zeigt einen exemplarischen Vergleich zwischen einem herkömmlichen Stahlgittermast und einem möglichen Kompaktmast, der die betrieblichen Anforderungen des Ostbayernrings nach Abschnitt 2 erfüllt.

Mit solchen Tragmasten könnte ein typisches 450 m langes Spannfeld am Ostbayernring realisiert werden. Um in Spannfeldmitte einen Bodenabstand der durchhängenden Leiterseile von minimal 14 m zu gewährleisten ist die unterste Traverse auf 41 m Höhe angebracht. Mit den erforderlichen Stockwerkabständen und der notwendigen Erdseilspitze ergibt sich für den Stahlgittermast eine Gesamthöhe von 69,3 m. Der Kompaktmast kommt aufgrund der etwas einzukürzenden Erdseilspitze auf 68,3 m Gesamthöhe, ist also 1 m niedriger. Hinsichtlich der Breite ist nach TenneT-internen Überlegungen durch den schmaleren Mastschaft eine Verringerung von etwa 2 m pro Seite zu erwarten. Entsprechend würden sich auch Schutzstreifen und Waldschneisenbreiten verkleinern, d. h. die typischen Schneisenbreiten von 60 bis 70 m würden sich um 4 m verringern lassen.



Die deutlichste Einsparung ergibt sich bei den Bodenaustrittsflächen. Während hier der typische Stahlgittermast etwa 73 m² beanspruchen würde sich der Vollwandmast mit 4 m² begnügen.

Diese Werte müssten aber von den Kompaktmastherstellern nachprüfbar verifiziert werden. Zudem sei an dieser Stelle nochmal darauf hingewiesen, dass sich nach den Erfahrungen und Erkenntnissen der TenneT die unterirdischen Mastfundamente tendenziell vergrößern, d. h. Eingriffe in den Boden werden durch den Einsatz von Kompaktmasten nicht reduziert.

Abbildung 7: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 2-systemigen Mast in Tonnenkonfiguration

3.2.2 2-systemiger Mast in Donaukonfiguration

Ganz ähnliche Erkenntnisse liefert auch ein entsprechender Vergleich für Maste in Donaukonfiguration, d. h. einer Dreiecksanordnung der Phasen auf jeder Seite der Maste (Abbildung 8).

Durch die etwas geringeren Maximalwerte der bodennahen elektrischen Felder in dieser Konfiguration ist ein minimaler Bodenabstand von 12 m in Spannfeldmitte realisierbar. Dadurch kann die untere Traverse etwas niedriger liegen als bei der Tonnenkonfiguration, und der Stahlgittermast kommt nur auf eine Gesamthöhe von 61 m. Bei der Vollwandkonstruktion können hier etwa 4,6 m an der Erdseilspitze an Höhe eingespart werden, so dass hier die Gesamthöhe bei 56,4 m liegen würde.

Hinsichtlich der Breite ist eine Verringerung um 1,7 m pro Seite zu erwarten. Diese Einsparung würde sich wieder auf Schutzstreifenbreite und Waldschneisenbreite durchschlagen.

Der deutlichste Unterschied ist wieder beim Flächenverbrauch zu erwarten. Für die Auswirkungen auf den Boden durch die unterirdischen Fundamente gelten die gleichen Aussagen wie im vorhergehenden Abschnitt.

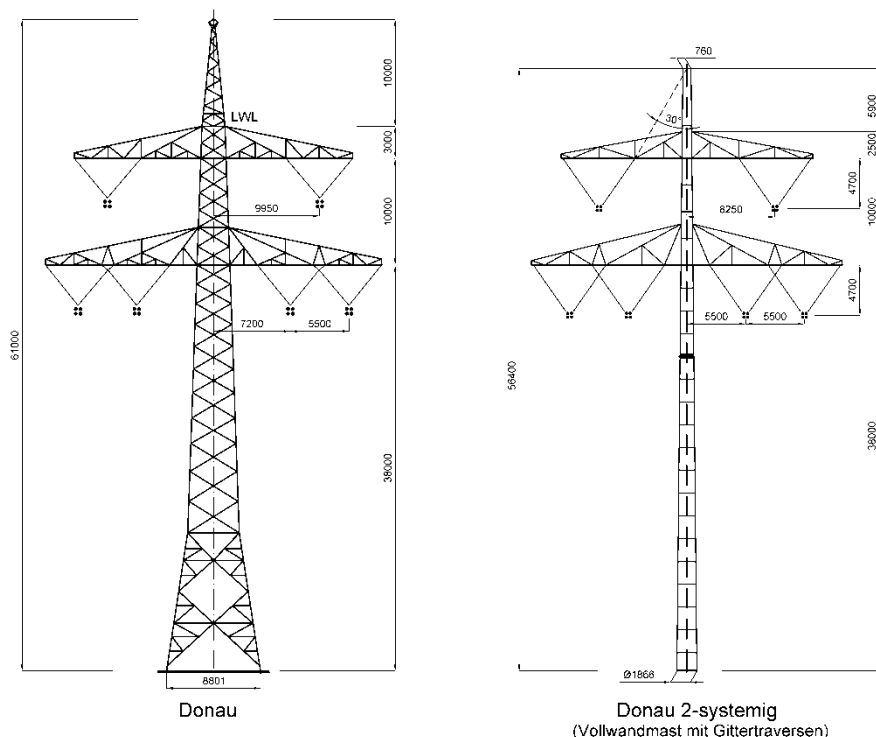


Abbildung 8: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 2-systemigen Mast in Donaukonfiguration

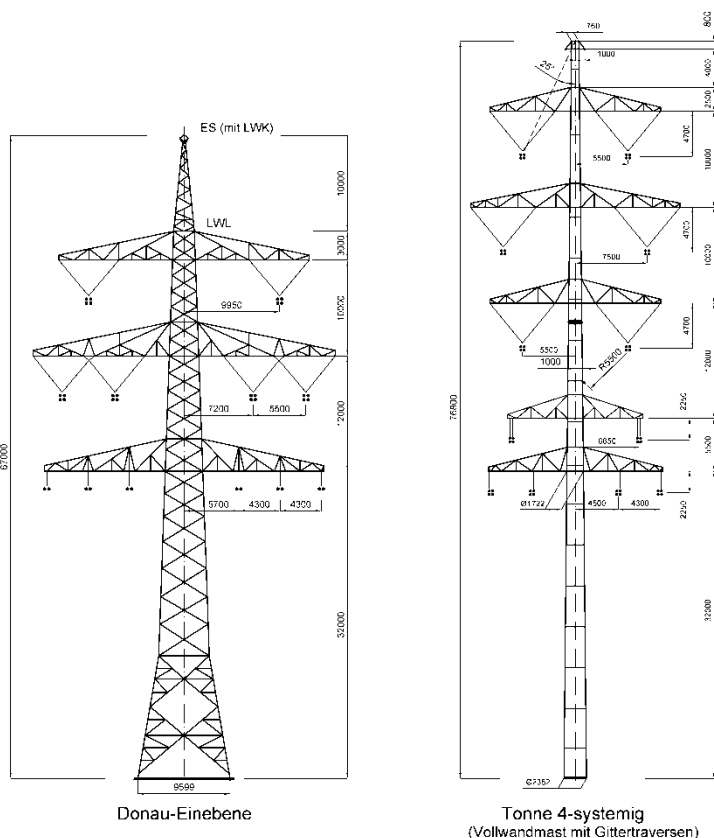
3.2.3 4-systemiger Mast (bei 110-kV-Mitnahme)

Knapp auf der Hälfte der Länge des Ostbayernrings werden neben den beiden 380-kV-Systemen noch weitere zwei 110-kV-Systeme auf dem Gestänge mitgeführt, d. h. etwa 46 % der Maste des Ostbayernrings sind 4-systemige Maste.

Bei herkömmlichen Stahlgittermasten realisiert man dies in der sogenannten Donau-Ebenen-Konfiguration, d. h. die beiden 380-kV-Systeme werden in einer Dreiecksanordnung im oberen Teil des Mastes getragen, die beiden 110-kV-Systeme, die enger aneinander aufgehängt werden können, auf einer zusätzlichen untersten Traverse in Einebenenkonfiguration. Dies bewirkt dann nur eine geringe zusätzliche Breite bzw. eine zusätzliche Ebene in der Höhe.

Um für die Kompaktmaste die Vorteile der schmalen Breiten besser ausnutzen zu können, wurde hier vom Bundesverband Kompaktmaste eine etwas andere Lösung mit insgesamt fünf Stockwerken vorgeschlagen, die in Abbildung 9 dargestellt ist. Damit lassen sich etwa

pro Seite 5,5 m in der Breite einsparen. Allerdings wirkt sich dies auf die Gesamthöhe aus, dieser entsprechende Mast wäre knapp 10 m höher als ein herkömmlicher Stahlgittermast. Zudem ergeben sich durch diese Anordnung zwei zusätzliche Seilebenen, was sich insbesondere für naturschutzfachliche Aspekte (Kollisionsgefahr für Vögel) negativ auswirken könnte. Hinsichtlich Flächenverbrauch und Fundamente gelten die vorherigen Aussagen entsprechend.



Allerdings sei hier nochmal erwähnt dass diese Abschätzungen TenneT-intern ermittelt wurden und daher von den Kompaktmastherstellern verifiziert werden müssen.

Abbildung 9: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 4-systemigen Mast (110-kV-Mitnahme)

3.3 Bewertung der Auswirkungen auf Schutzgüter

Von den Herstellern und Unterstützern der Kompaktmaste werden Kompaktmaste oft als vorteilhaft in allen Belangen dargestellt. Dabei werden jedoch leider oft unsaubere Vergleiche herangezogen und somit ein verzerrtes Bild erzeugt. Im Folgenden wird daher anhand der Broschüre *Der Kompaktmast – Die schonende Alternative* vom Bundesverband Kompaktmast [4] kurz auf die wesentlichen Aspekte eingegangen.

3.3.1 Natur, Pflanzen und Tiere

Die Wirkfaktoren durch den Bau und den Betrieb des Ostbayernrings auf die Umwelt sind in der Umweltstudie (Unterlage 11.1) ausführlich und umfassend dargestellt. Vergleicht man dabei die möglichen Änderungen durch den Einsatz von Kompaktmasten, so ergeben sich in vielen Fällen keine oder nur geringe Änderungen der Auswirkungen. Der Einsatz von Kompaktmasten ist dabei nicht immer vorteilhaft. Durch die größeren Abmessungen und Gewichte der Bauteile bei Kompaktmasten sind z. B. deutlich größere und schwerere Maschinen im Einsatz, die hinsichtlich Zuwegungen und Arbeits- und Montageflächen an den Mastbaustellen stärkere Auswirkungen hervorrufen. Dies betrifft insbesondere Tiere und Pflanzen an den Maststandorten. Sollten Kompaktmaste aufgrund ihrer statischen Auslegung nur kürzere Spannungsfeldweiten zulassen und daher eine höhere Anzahl an Masten benötigt werden, verstärkt sich dieser Effekt noch. Insbesondere bei der Notwendigkeit von dauerhaften Zuwegungen und Montageflächen an den Standorten der Kompaktmaste steigt auch der Flächenverbrauch der dauerhaft einer anderen Nutzung, z. B. für umweltfachlich hochwertige Flächen, entzogen wird. Es kann daher nicht von einer generell geringeren Auswirkung auf Natur, Pflanzen und Tiere durch den Bau und Betrieb von Kompaktmasten gesprochen werden.

3.3.2 Landschaft

Freileitungen beeinflussen das Landschaftsbild in negativer Weise, auch in kompakter Ausführung. Bei Kompaktleitungen hinsichtlich Landschaftsbild von einem „Erhalt in ganzer Schönheit“ zu sprechen ist daher sicher übertrieben. Ob teiltransparente Stahlgitterkonstruktionen oder Vollwandausführungen, evtl. sogar als Doppelpylon, eine stärkere Beeinträchtigung darstellen, ist wohl oft sehr subjektiv und auch einem gewissen Zeitgeist unterworfen. Auch das vorherrschende Landschaftsbild an sich (Flachland, Gebirge) und seine Vorbelastung (z. B. durch andere Freileitungen oder durch Windenergieanlagen) spielt dabei eine Rolle.

3.3.3 Wald

Die negativen Auswirkungen von Freileitungen auf den Wald sind unbestritten. Um den Eingriff möglichst gering zu halten werden für den Ostbayernring bereits verschiedene Maß-

nahmen umgesetzt. Dies sind zum einen Bereiche mit Waldüberspannung, zum anderen eine Beschränkung der Waldschneisenbreite auf ein notwendiges Minimum und der Einsatz von Tonnenmaste (siehe Erläuterungsbericht (Unterlage 1), Abschnitt 7.2). Eine weitere Reduktion durch den Einsatz von kompakten (schmalen) Mastschaften wäre nur noch in der Größenordnung von 5 bis 10 % der Schneisenbreite möglich. Eine vom Bundesverband Kompaktleitung versprochene Reduzierung des notwendigen Holzeinschlags um 50 % kommt nur durch unzulässige Vergleiche und Berücksichtigung unzulässiger Randbedingungen (z.B. Vermischung von Donau- und Tonnenmastbild) zustande.

3.3.4 Nutzflächen und Boden

Die Bodenaustrittsfläche bei Stahlgittermasten ist quadratisch und in einer typischen Größenordnung von 50 bis 200 m² (je nach Masttyp). Bei einstielligen Vollwandmasten (Monopole) werden in den Pilotprojekten Durchmesser der Stahlrohre von 3 bis 7 m angegeben, was zu Bodenaustrittsflächen von 7 bis 40 m² führen würde und damit eine deutliche Verringerung darstellt. Dies könnte insbesondere auf landwirtschaftlich genutzten Flächen die Einschränkungen für den Eigentümer oder Pächter merklich verringern, je nach Lage auf dem Flurstück. Allerdings gilt auch dies nur, solange durch den Einsatz von Kompaktmasten die Gesamtzahl der notwendigen Maststandorte nicht deutlich erhöht wird. Zudem ist die Einwirkungen in den Boden höher, da sich die Dimensionen der Fundamente beim Einsatz von Kompaktmasten vergrößert. Auch hier müssen die statischen Kräfte der Freileitung in den Boden abgeleitet werden. Erfahrungen aus den Niederlanden deuten darauf hin, dass die Fundamentgrößen ansteigen (die größeren Mastgewichte und die höheren Fundamentlasten der Vollwandmaste müssen durch eine erhöhte Betonkubatur und Stahlbewehrung unter der Erdoberkante kompensiert werden) und ein Flächenbedarf in der Größenordnung von 300 bis 400 m² entsteht. Diese Fundamentfläche wird wieder mit einer Bodenschicht überdeckt und kann bewirtschaftet werden. Dennoch sind die Eingriffe in den Boden zunächst stärker. Hinzu kommt, dass durch die größeren Abmessungen und Gewichte der Bauteile bei Kompaktmasten während des Baus deutlich größere und schwerere Maschinen zum Einsatz kommen, die hinsichtlich Zuwegungen und Arbeits- und Montageflächen an den Mastbaustellen stärkere Auswirkungen hervorrufen. Dies betrifft zum einen den notwendigen Flächenbedarf, aber auch die Gefahr für Bodenschädigungen durch Verdichtung steigt stark an.

3.3.5 Gesundheit

Es wird oft behauptet, dass Kompaktmaste generell geringere elektromagnetische Felder erzeugen und damit mögliche gesundheitliche Belastungen reduzieren. Dies ist in dieser Pauschalität nicht richtig.

Die elektromagnetischen Felder einer Freileitung hängen zunächst im Wesentlichen von den Betriebsbedingungen – also Betriebsspannung und – stromstärke – ab. Darüber hinaus spielen die geometrische Anordnung der Phasen und ihr Abstand zueinander eine Rolle, was

insbesondere durch die Mastkopfgeometrie in den Berechnungen berücksichtigt wird. Darüber hinaus hat die Zuordnung der einzelnen Phasen bzgl. der Aufhängepunkte einen deutlichen Einfluss auf die bodennahen Feldverläufe. Deshalb ist bei einer Gegenüberstellung verschiedener Konfigurationen insbesondere darauf zu achten, dass jeweils vergleichbare Phasenordnungen betrachtet werden. Die Bauweise der Masten selbst – ob aus Stahlgitter, Vollwandstahl oder Beton – hat keinen Einfluss auf die Feldstärken. Bei Freileitungen bilden sich also ausgehend von den Leiterseilen niederfrequente (50 Hz) elektromagnetische Felder in alle Richtungen aus, deren Feldstärken mit zunehmendem Abstand von den Leiterseilen rasch abnehmen. Bewertet man nun die auftretenden Feldstärken in Bodennähe, also dort wo der Aufenthalt von Personen möglich ist, so erhält man typischerweise die größten Feldstärken in Spannfeldmitte, da hier der Abstand der Leiterseile zum Boden durch ihren Durchhang am geringsten ist.

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Feldverläufe der verschiedenen Masttypen unter Berücksichtigung einer vergleichbaren Phasenordnung für ein typisches Spannfeld am Ostbayernring dargestellt. Zu sehen ist hier die elektrische Feldstärke bzw. die magnetische Flussdichte am Boden (1 m über Erdoberkante), aufgetragen über den seitlichen Abstand zur Trassenachse.

Betrachtet man zunächst die elektrische Feldstärke (Abbildung 10), so ist zu erkennen dass die größten Feldstärken im Nahbereich der Leitung auftreten. Mit zunehmendem seitlichem Abstand fallen die Werte stark ab. Dargestellt sind drei Kurvenverläufe, die die Konfigurationen Stahlgittermast mit Mastkopfgeometrie Donau (grüne Kurve, bezeichnet mit D-2-D), Stahlgittermast mit Mastkopfgeometrie Tonne (blaue Kurve, bezeichnet mit D-2-T) und Vollwandmast mit Mastkopfgeometrie Tonne (schwarze Kurve, bezeichnet mit Vollwand) repräsentieren. Der in diesen Berechnungen verwendete Vollwandmast ist bereits an die Anforderungen der TenneT angepasst und besitzt die in Abschnitt 3.2.1 detailliert dargestellten geometrischen Abmessungen.

Bei genauerer Betrachtung und Vergleich der Kurven ist zu erkennen, dass die jeweiligen Maximalwerte rechts und links der Trassenachse, also jeweils direkt unterhalb der Leiterseile, auftreten, was in der Donaukonfiguration durch die zwei Phasen auf der untersten Traverse etwas nach außen gezogen ist. Alle Maximalwerte liegen unterhalb des Grenzwerts für die elektrische Feldstärke (5 kV/m nach 26. BImSchV), allerdings ist hierfür bei der Tonnenkonfiguration (sowohl Stahlgitter als auch Vollwand) ein zusätzlicher Bodenabstand von 2 m notwendig, d. h. der minimale Bodenabstand der Leiterseile beträgt hier 14 m, im Fall der Donaukonfiguration 12 m. Im unmittelbaren Nahbereich der Freileitung führt also eine Anordnung der Leiterseile wie beim Tonnenmastbild zu höheren elektrischen Feldstärken, dafür nehmen diese dann mit zunehmenden seitlichen Abstand etwas rascher ab als bei der Donaukonfiguration. Im Abstandsbereich 10 bis 50 m von der Trassenachse sind die elektrischen Feldstärken der Donaukonfiguration dann etwas höher als in der Tonnenkonfiguration, ab 75 m seitlichen Abstand gibt es keine signifikanten Unterschiede in den Feldstärken. Für den Ostbayernring, bei dem die minimalen Abstände zur Wohnbebauung für die Neu-

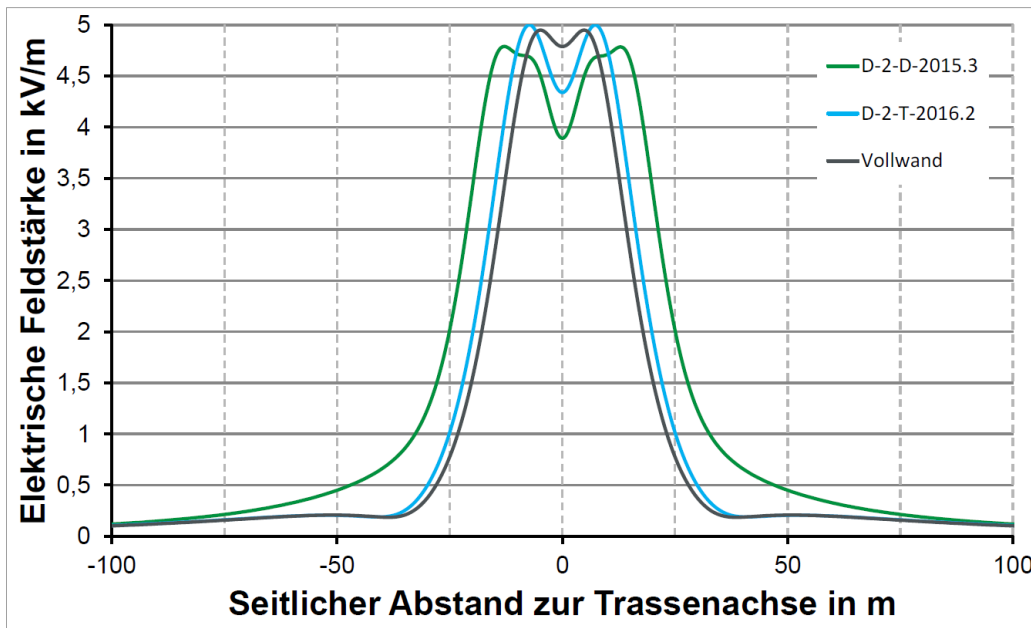


Abbildung 10: Berechnete elektrische Feldstärke in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne

bautrasse bei etwa 90 m liegen, ist die Mastkopfkonfiguration also kein wesentlicher Parameter für mögliche Minimierungsoptionen.

Ähnliche Schlussfolgerungen kann man auch aus dem Verlauf der magnetischen Flussdichte ableiten, welcher in der Abbildung 11 dargestellt ist. Auch hier treten die Maximalwerte im unmittelbaren Nahbereich der Leiterseile auf; in diesem Fall hat sogar der kompakte Vollwandmast die größten Absolutwerte. In allen Fällen sind die Maximalwerte deutlich geringer

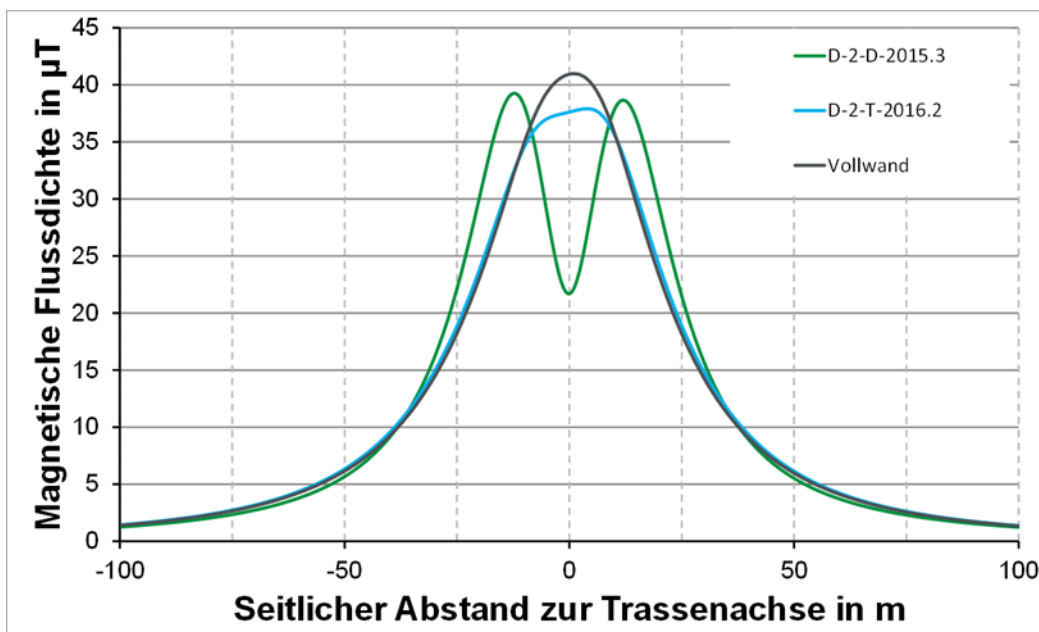


Abbildung 11: Berechnete magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne

als der Grenzwert für die magnetische Flussdichte ($100 \mu\text{T}$ nach 26. BImSchV). Im Abstandsbereich 10 bis 35 m von der Trassenachse sind die magnetischen Flussdichten der Donaukonfiguration dann etwas höher als in der Tonnenkonfiguration, danach kehren sich die Verhältnisse wieder um, jedoch zeigen sich ab hier ohnehin keine signifikanten Unterschiede in den Werten.

Neben elektrischen und magnetischen Feldern können Freileitungen auch durch Geräuschimmissionen Auswirkungen auf die Umwelt bewirken. Bei Höchstspannungsleitungen kann es an den Leiteroberflächen bei entsprechender elektrischer Randfeldstärke zur Geräuschentwicklung (z. B. Knistern, Prasseln) durch Korona-Entladungen kommen (insbesondere bei Nebel, Regen oder hoher Luftfeuchtigkeit). Die Stärke der Geräusche hängt neben der Betriebsspannung im Wesentlichen von der Leiter- und Bündelausführung (insbesondere Anzahl und Durchmesser der Teilleiter) und deren Anordnung am Mast ab. Entsprechend zu den oben gezeigten Berechnungen der elektrischen und magnetischen Felder wurden auch Ergebnisse zur Geräuschimmission erstellt, die Ergebnisse sind in der Abbildung 12 dargestellt.

Durch die beiden Phasen auf einer Traverse, die nur 5,5 m voneinander entfernt sind, ergeben sich die höchsten elektrischen Randfeldstärken in der Donaukonfiguration. Entsprechend treten auch hier die größten Geräuschwerte auf. Entsprechend der kompakteren Bauweise der Tonnen-Vollwandmasten (geringerer Abstand der innenliegenden Phasen zueinander) liegen hier die Werte etwas höher als bei entsprechenden Tonnen-Stahlgittermasten. Durch den konsequenten Einsatz des derzeitigen TenneT-Standardleiters vom Typ „Finch“ als Viererbündel bei Neubauprojekten werden insgesamt akzeptable Geräuschimmissionen durchwegs für alle Konfigurationen erreicht. Selbst die Anforderungen für Immissionsorte mit der größten Schutzbedürftigkeit nach TA Lärm (Immissionsrichtwert von

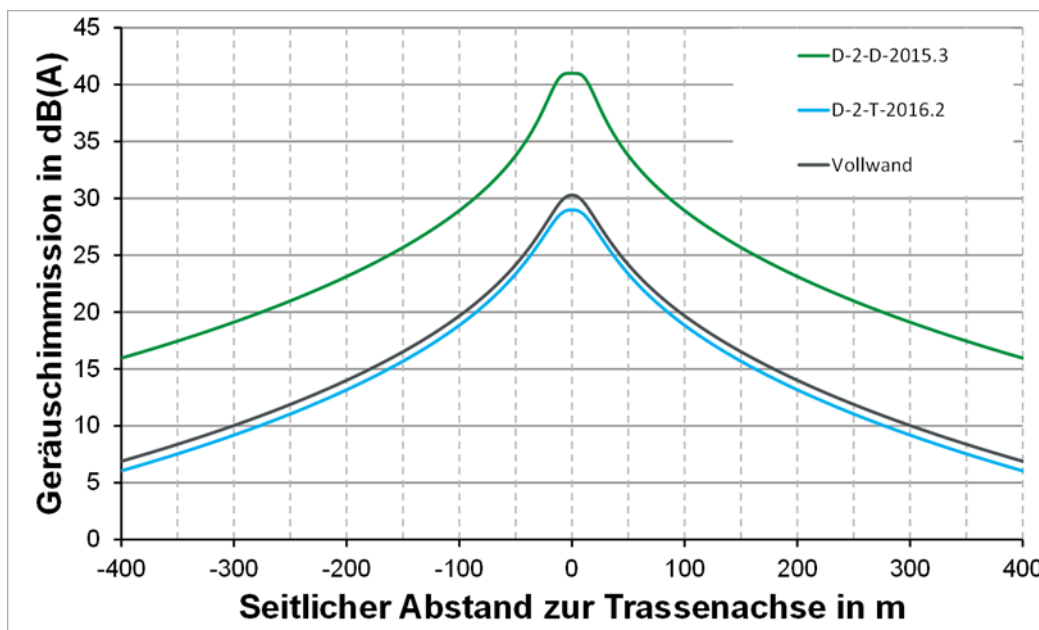


Abbildung 12: Berechnete Geräuschimmission in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne

35 dB(A) für den Nachtzeitraum für reine Wohngebiete sowie Kurgemeinden, Krankenhäuser und Pflegeanstalten) werden von allen Konfigurationen bereits ab einem geringen Abstand eingehalten.

Insgesamt zeigen Kompaktmaste also keine wesentlichen Vorteile bei den relevanten Umweltauswirkungen im Vergleich zu herkömmlichen Stahlgittermasten.

4 Zusammenfassung und Fazit

Neben den grundlegenden technischen Normen und Vorschriften müssen Mastbauformen auch weiteren Anforderungen des Übertragungsnetzbetreibers genügen, damit dieser seine gesetzlichen Aufgaben und Pflichten vollumfänglich erfüllen kann. Diese zusätzlichen Anforderungen leiten sich im Wesentlichen aus betrieblichen Notwendigkeiten ab und begründen sich aus Aspekten der Sicherheit, zum einen der Versorgungssicherheit, aber auch der Arbeitssicherheit für Personal des Übertragungsnetzbetreibers.

Weder international noch in Deutschland ist bisher ein Leitungsbau mit Kompaktmasten erfolgt, der den Randbedingungen und Erfordernissen des Ostbayernrings entspricht. Aus Mangel an verlässlichen und nachprüfaren technischen Auslegungen auf dem Markt werden daher TenneT-eigene Überlegungen dargestellt, um zu einer genaueren Bewertung der Machbarkeit und der Konsequenzen von alternativen Bauformen für den Ostbayernring zu kommen. Ein Vergleich hinsichtlich der abgeschätzten Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter zeigt, dass Kompaktmaste nicht immer eine Reduktion der Auswirkungen nach sich ziehen.

Als Fazit ist festzuhalten, dass nach derzeitigen Stand kein technisch ausgearbeitetes und nachprüfbares Gesamtkonzept für Kompaktmasten, die den Anforderungen des Projekts entsprechen, verfügbar ist. Somit ist derzeit weder eine verlässliche Ausarbeitung aller Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter noch eine Abschätzung der wirtschaftlichen Konsequenzen möglich. Unter diesen Voraussetzungen sieht TenneT in den Kompaktmasten derzeit keine ernsthafte Alternative zu herkömmlichen Stahlgittermasten. Das derzeit mit Kompaktmasten verbundene Realisierungsrisiko sowohl in technischer, zeitlicher und auch wirtschaftlicher Hinsicht steht in keinem adäquaten Verhältnis zu möglichen Verbesserungen. Daher werden die Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren für den Ersatzneubau des Ostbayernrings auf der Basis bewährter Stahlgittermasten erstellt.

5 Referenzen

- [1] Denkschrift über die Fernleitungen des 1. Ausbaus, Bayernwerk Aktiengesellschaft, Betriebs- und Bauabteilung, München, 1. März 1932
- [2] H. Seidel, R. Heuke, Technologieübersicht - Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Juli 2014
- [3] C. Sumereder, Gutachten - Eignung von Kompaktmasten im deutschen Übertragungsnetz unter Berücksichtigung des § 49 EnWG und der 26. BImSchV, Bundesverband Kompaktleitung, Graz, 3. März 2017
- [4] Der Kompaktmast – Die Schonende Alternative, Bundesverband Kompaktleitung, Berlin, www.kompaktleitung.de

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abstand Außenkante Mastschaft zur innersten Phase	6
Abbildung 2: Abstand Obergurt Traverse zur darüber liegenden Phase und Stockwerksabstand	7
Abbildung 3: Horizontaler Phasenversatz	8
Abbildung 4: Wintrack-Pylon (Doppelpylon).....	9
Abbildung 5: US-amerikanisches Projekt Big Stone South – Brookings County 345 kV Transmission Line	12
Abbildung 6: Verworfenener Planungsstand eines Abschnitts der Westküstenleitung bei Brunsbüttel (Fotomontage).....	13
Abbildung 7: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 2-systemigen Mast in Tonnenkonfiguration	15
Abbildung 8: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 2-systemigen Mast in Donaukonfiguration	16
Abbildung 9: Gegenüberstellung von Stahlgitter – und Vollwandbauweise für einen 4-systemigen Mast (110-kV-Mitnahme)	17
Abbildung 10: Berechnete elektrische Feldstärke in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne	21
Abbildung 11: Berechnete magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne	21
Abbildung 12: Berechnete Geräuschmission in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand zur Trassenachse für die Masttypen Stahlgitter-Donau, Stahlgitter-Tonne und Vollwand-Tonne	22