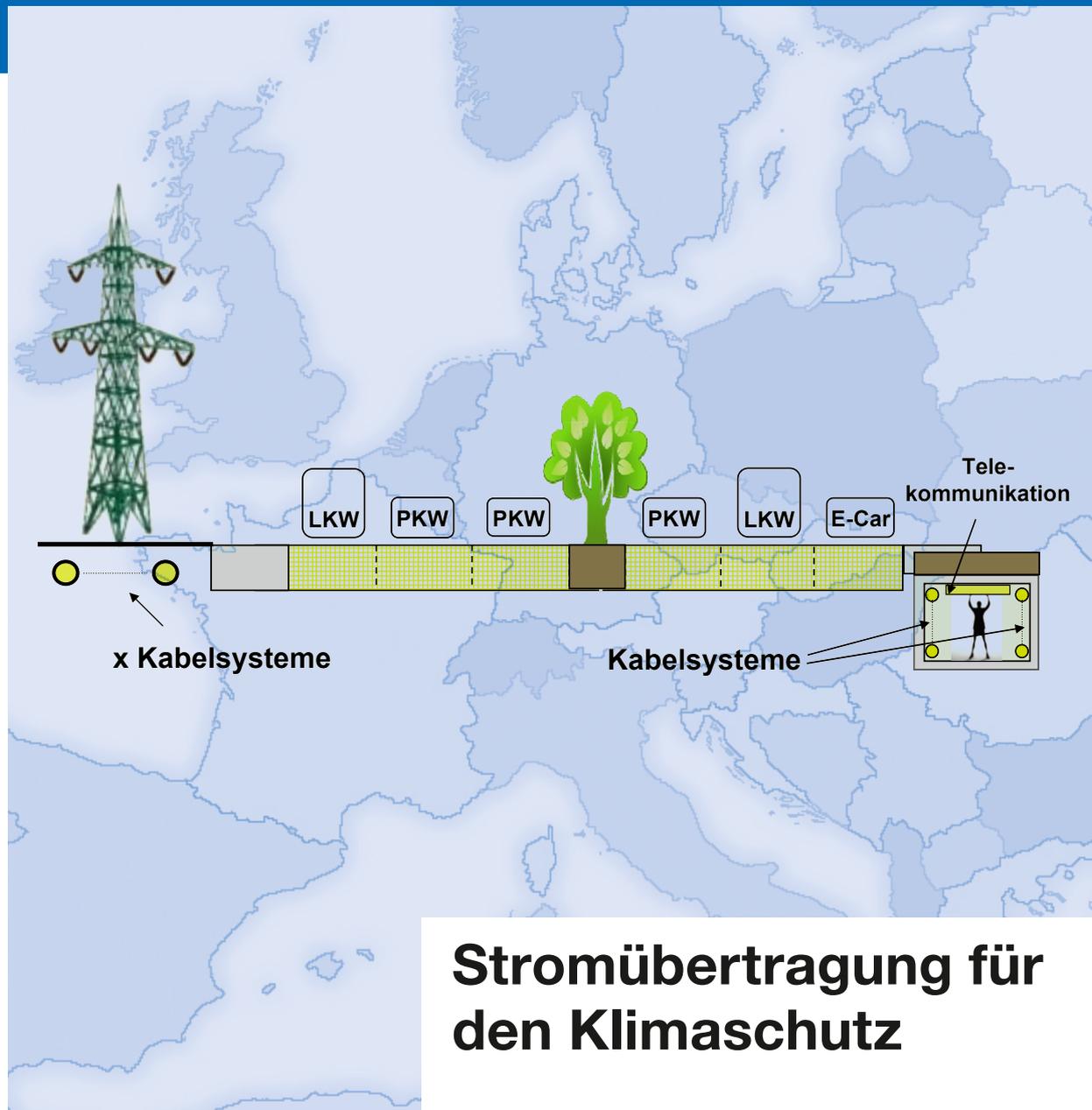


VDE-Studie



Stromübertragung für den Klimaschutz

Potenziale und Perspektiven einer Kombination von Infrastrukturen

Autoren

ETG Task Force Infrastruktur

Dr.-Ing. Christoph Dörnemann, Amprion GmbH
Wolfgang Glaunsinger, VDE|ETG
Dr.-Ing. Jutta Hanson, ABB AG
Dr. Carl Caspar Jürgens, NETWORK Institute
Matthias Kirchner, Nexans Deutschland GmbH
Dr.-Ing. Martin Kleimaier, Consultant
Maren Kuschke, TU Berlin
Dr.-Ing. Hermann Koch, Siemens AG
Martin Pokojski, VDE|ETG
Axel Schomberg, TenneT TSO GmbH
Prof. Dr.-Ing. Kai Strunz, TU Berlin
Wolfgang Tausend, EnBW Regional AG
Fred Wendt, ILF Beratende Ingenieure GmbH
Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann, TU Ilmenau

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
Fon 069 6308-0 · Fax 069 6312925
<http://www.vde.com> · E-Mail: etg@vde.com

Titelbild: VDE

Gestaltung: Michael Kellermann · Graphik-Design · Schwielowsee-Caputh

Mai 2011

Stromübertragung für den Klimaschutz

Potenziale und Perspektiven einer Kombination von Infrastrukturen

**Studie der
Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)**

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	6
1	Methodik	9
2	Genehmigungsverfahren / Beschleunigungsoptionen	11
	2.1 Bestehende Rechtslage	11
	2.1.1 Raumordnungsverfahren	11
	2.1.2 Planfeststellungsverfahren	12
	2.1.3 Umsetzung	12
	2.2 Beschleunigung von Genehmigungsverfahren	13
	2.2.1 Zielorientierte Raumordnung	13
3	Netzertüchtigung / Infrastrukturoptionen	15
	3.1 Netzertüchtigung	15
	3.2 Infrastrukturen	16
4	Kombination von Infrastruktur und Energieversorgung	18
	4.1 Kombination mit Infrastrukturen	18
	4.2 Eignung von Infrastrukturen	19
5	Finanzierung	20
6	Vorteile eines Overlay-Netzes	21
	6.1 Effekte für die Stromversorgung	21
	6.2 Wirtschaftliche Effekte	21
	6.3 Umweltpolitische Effekte	21
7	Stand der Technik	22
	7.1 Zusammenfassung – Stand der Technik	22
8	Bautechnische Umsetzung	24
	8.1 Freileitungssystem	24
	8.2 Unterirdische Verlegung	24
9	Innovation: Tunnellösung mit Endloskabel als technologische Chance	26
10	Overlay-Netz	27
	10.1 Netzkonzeption	27
	10.2 Netzsicherheit / Stabilität	28
	10.3 Lastflussanalyse	28
	10.3.1 Normalbetrieb	29
	10.3.2 Lastflussanalyse im Fehlerfall	29

11	Monetäre Systembewertung	30
	11.1 Kostenvergleich	30
	11.2 Qualitative Bewertung	32
	11.3 Schlussfolgerungen	33
12	Umsetzung	34
13	Schlussfolgerungen	36
14	Handlungsbedarf	37

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Anforderungen an zukünftige Stromtransportsysteme	9
Abb. 2	Vorgehensweise	10
Abb. 3	Bundesrepublik Deutschland mit Bundesländern und Infrastrukturen	16
Abb. 4	Kombination von Autobahn und Freileitungsaus-/neubau und/oder Kabelsysteme	18
Abb. 5	Bewertung von Infrastrukturen	19
Abb. 6	Skizze: Grundkonstruktion eines Gesellschaftsmodells	20
Abb. 7	Supraleiter für das Transportnetz	23
Abb. 8	Beispiele für Tunnelprofile	25
Abb. 9	Prinzipbild – Transport von „Endloskabeln“ im Tunnel	26
Abb. 10	Heutiges Übertragungsnetz (links) / Skizze Overlay-Gleichstromnetz (rechts)	27
Abb. 11	Overlay-Netz mit Leitungslängen, Einspeisungen sowie Abgängen	29
Abb. 12	Lastfluss im Overlay-Netz im Normalbetrieb	29
Abb. 13	Schema 400-kV-AC-Freileitung/Kabel	30
Abb. 14	Netzausbautechnologien – Vergleich der Übertragungstechnologien	31
Abb. 15	Umsetzungskonzept zum Aufbau eines Overlays	34

Vorwort

Aus Klimaschutzgründen sollen CO₂-intensive fossile Energieträger in Deutschland und Europa schnellstmöglich abgelöst werden. Das Energiekonzept der Bundesregierung setzt hierzu auf ein Maßnahmenbündel, um die Ressourcen- und Energieeffizienz signifikant zu steigern und gleichzeitig Strom zunehmend aus der Umwandlung erneuerbarer Energien, insbesondere mittels großer Offshore Windkraftparks, zu gewinnen. Ergänzend soll Strom importiert und exportiert werden.

Wesentliche Zielstellungen liegen in der Reduktion des Ölverbrauchs im Verkehrsbereich sowie der Senkung des Erdgas- und Heizölverbrauchs im Wärmemarkt. Tempo und Größenordnung dieser Maßnahmen werden in erheblichem Maße mitbestimmt durch die entsprechende Weiterentwicklung der Netzinfrastruktur im Transport- und Verteilungsbereich für elektrische Energie (Ausbau und Umstrukturierung). Verfügbarkeit und Aufnahmefähigkeit der Netze aller Spannungsebenen für Strom aus einem teils zunehmend dezentralisierten, teils lastfernen Erzeugungspark sind dabei bestimmend für die Marktreife und Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere des Stroms aus nicht-fossilen Quellen.

Die Umsetzung ökologisch und technisch erforderlicher Leitungsbauprojekte, insbesondere im Transportnetz, ist unverzichtbare Voraussetzung für den politisch und gesellschaftlich gewünschten Erfolg zur Nutzung erneuerbarer Energien. Wesentlichen Einfluss haben der Grad der Ressourcenschonung und die Akzeptanz. Das betrifft vor allem den Landschaftsverbrauch und die Umweltverträglichkeit von Leitungsbauprojekten sowie die entsprechenden Investitionen und deren Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Aufgabe der Task Force „Infrastruktur“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG) ist die Entwicklung neuer Lösungswege zur Umsetzung dieser Ziele. Hierzu soll erstmals der Grundgedanke einer physischen Bündelung verschiedener Infrastrukturen, d. h. die Ermittlung von Potenzialen zur Integration von Trassensystemen und der Bewertung von Perspektiven ihrer Nutzung, zum Beispiel in Gestalt der Verknüpfung vorhandener Trassen des Bundes für Bahnfernstromleitungen mit den vorhandenen Höchstspannungsnetzen in Deutschland und Europa, zum Tragen kommen.

Die Umsetzung dieser Aufgabe ist verbunden mit der Entwicklung der Netzstruktur. Die Suche nach dem systemanalytisch optimalen, d.h. bedarfsgerecht skalierbaren und variablen Pfad, zum sog. „Zielnetz 2050“ erfolgt technologieoffen und setzt in der Transportnetzebene bei der Höchstspannung an. Ziel ist die Identifizierung erfolgversprechen-

der, über vier Dekaden bedarfsgerecht gestuft zu realisierender, „micro-invasiver“ Anpassungs- und Ergänzungsmaßnahmen.

Deutschland benötigt über das bestehende 400-kV-Transportnetz hinaus ein die vier vorhandenen Regelzonen übergreifendes Overlay-Netz zur Verbindung der Erzeugungs- und Lastzentren, insbesondere für den Weistreckentransport von Strom. Ausweislich des Monitoring-Berichts des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie nach § 51 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vom Januar 2011 ist diesbezüglich Eile geboten:

Die Gutachter weisen darauf hin, dass das deutsche Übertragungsnetz schon heute „zu einer relevanten Anzahl an Zeitpunkten bis an seine Kapazitätsgrenzen ausgelastet ist, wobei betriebliche Reserven bereits ausgeschöpft sind“ (Ziff. 4.2). In Verbindung mit dem Befund, dass Betriebsmittel in unterliegenden Spannungsebenen überaltert sind, ist dies eine Besorgnis erregende Feststellung, die konkret bedeutet, dass aufgrund des Wandels der Transportaufgabe „punktuell auf Nord-Süd-Trassen bereits heute ein verstärktes Risiko für die Versorgungssicherheit“ besteht (ebd.). Die Gutachter sehen überdies „bis 2015 strukturelle Engpässe und die Gefährdung der Versorgungssicherheit“ voraus (Ziff. 4.3, S. 16) und das ohne Betrachtung der Stabilität, zum Beispiel bezüglich Kurzschlussleistung, Spannungshaltung und Schaltbarkeit (Ziff. 4, S. 14). Vor diesem Hintergrund wird es zunehmend problematisch, geeignete Zeiträume für Netzerneuerungs- und Ausbaumaßnahmen zu finden. Gleichzeitig ist der sichere Systembetrieb gefährdet; die Gefahrenabwehr funktioniert gerade noch (Ziff. 5, S. 18). Seit Jahren ist eine kontinuierliche Zunahme der Anzahl von „beinahe“-Spannungskollaps-Situationen zu beobachten (ebd.). Es überrascht daher nicht, dass der Monitoring-Bericht schlussfolgert, dass die Versorgungssicherheit in Deutschland – nur noch! – als „hoch“ einzustufen ist (Ziff. 6, S. 21) und der Ausbau von Stromnetzen sowie der Erhalt(!) der Systemstabilität im Fokus stehen müssen (ebd., S. 23).

Vor diesem Hintergrund und angesichts eines geschätzten Bedarfs von mehr als 4.000 Trassenkilometern lt. Dena-Studien I+II ist eine nationale Zielsetzung für entsprechende Trassenräume zu entwickeln. Sie ist föderal, vom Bund mit den Ländern in parlamentarischer Debatte und im Dialog von Politik und Gesellschaft, öffentlich funktions- und gebietsscharf (analog der maritimen Außenwirtschaftszone – AWZ) zu vereinbaren. Darüber hinaus ist mit zusätzlichen grenzüberschreitenden Verbindungen der Zugang zu Speicherpotenzialen im angrenzenden Alpenraum und in Skandinavien zu eröffnen. Eine Verknüpfung natio-

naler Overlay-Verbindungen mit einer entsprechenden europäischen Verbundnetz-Struktur ist vorzusehen.

Dazu bieten sich Trassen von bestehenden Verkehrssystemen an, insbesondere soweit sie bereits Teil transeuropäischer Netzstrukturpläne sind (Trans-European Networks (TEN)). Die dargestellten technischen Möglichkeiten unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit, insbesondere nach dem erforderlichen Kosten- und Zeitaufwand sowie nach ihrer Zukunftsfähigkeit.

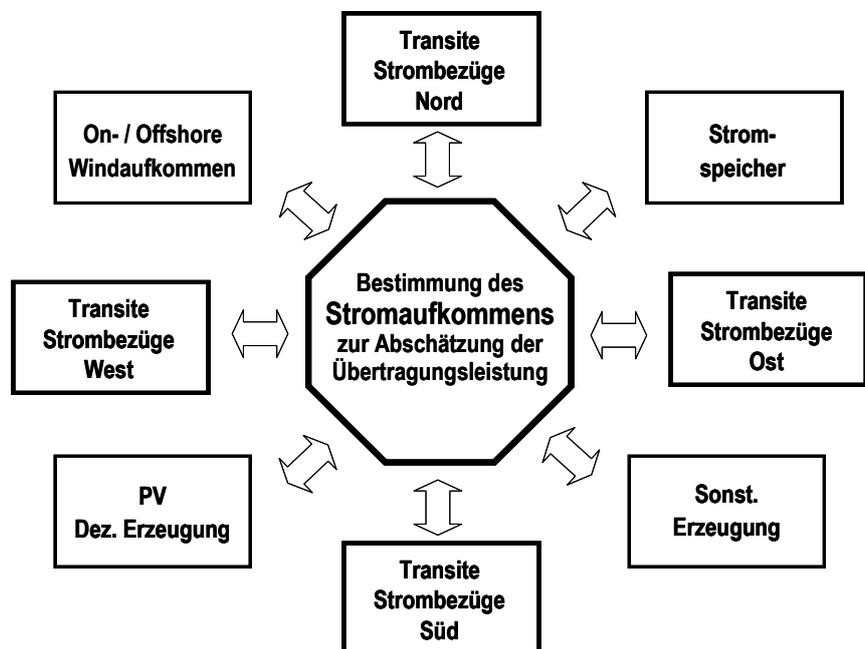
Eine Alternative könnte – vorbehaltlich einer technischen Prüfung im Detail – insbesondere die Nutzung ausgewählter Trassen des Bahnfernstromsystems und Autobahnen in Nord-Süd und West-Ost Richtung für Freileitungen höchstmöglicher Übertragungsleistung sein. Der so geschaffene Nukleus einer Overlay-Struktur könnte mittel- und langfristig ausgebaut und ergänzt werden durch die Nutzung weiterer Trassen von Autobahnen oder auch Schienenwegen für Kabellösungen. Eine Struktur, die auf neuen technologischen Tunnellösungen aufbaut, mit der sich neben dem Stromtransportnetz auch andere Versorgungssysteme integrieren lassen, könnte hierbei die Basis für eine nachhaltige und durch Akzeptanz gekennzeichnete Versorgungswirtschaft darstellen.

Die im Rahmen einer interdisziplinären Arbeitsgruppe von Herstellern, Betreibern und Hochschulen durchgeführte Untersuchung stellt hierzu einen Lösungsansatz dar. Die hierbei verwendeten Preise und Kosten sind verschiedensten öffentlich zugänglichen Literaturstellen entnommen worden. Während der Arbeitsgruppentreffen ist zu keiner Zeit zwischen den Herstellern untereinander oder mit Vertretern der Transportnetzbetreiber (TSO) über Preise von Anlagenkomponenten oder ganzen Systemen gesprochen worden.

1 Methodik

Die europäische Energiepolitik geht von einer Stromversorgung aus, die sich bei Beibehaltung zentraler Elemente langfristig auf erneuerbare Energien und dezentrale Versorgungssysteme abstützt. Hierzu ist Deutschland in ein europäisches Verbundsystem über leistungsstarke Verbindungen einzubinden, mit denen gleichzeitig die Durchführung von umfangreichen Transiten sichergestellt wird. Ein Lösungsansatz hierzu liegt in der schrittweisen Entwicklung eines neuen überlagerten Hochspannungsnetzes, eines Overlay-Netzes. (Abb. 1)

Abb. 1: Anforderungen an zukünftige Stromtransportsysteme

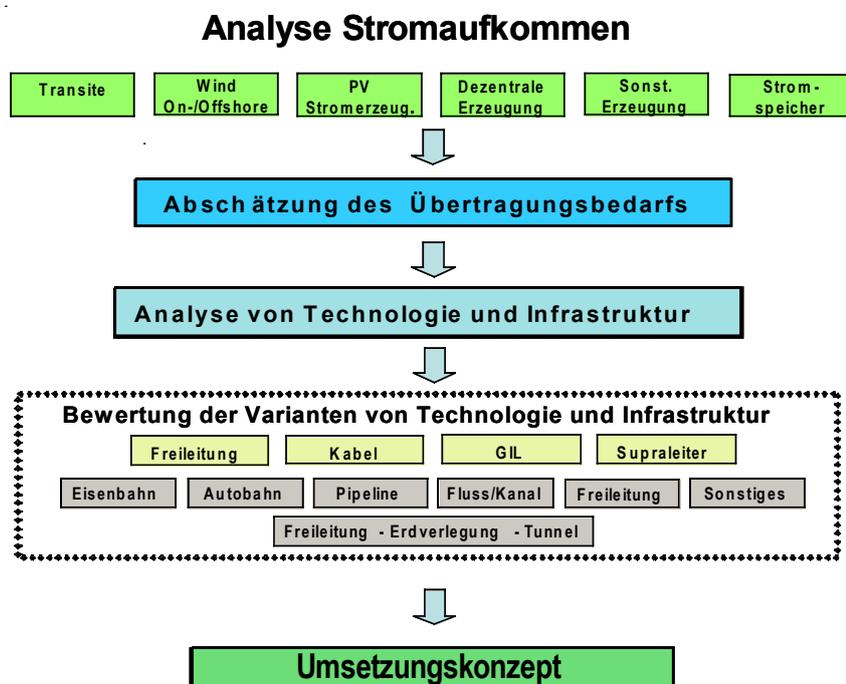


Ein technologischer Ansatz für die Umsetzung könnte in der Kombination von Infrastrukturen und neuen Stromtransportsystemen liegen. Hierbei sind Systeme zu entwickeln, die sich bedarfsorientiert an zukünftige Entwicklung anpassen lassen und langfristig – 50 Jahre und mehr – Bestand haben.

Die Umsetzung dieser Zielstellungen erfordert die in Abb. 2 dargestellten Bearbeitungsschritte. Hierzu sind die in Frage kommenden Übertragungstechnologien zu bewerten. Maßstab für die Bewertung der Kosten sind die Aufwendungen für eine Freileitungsverbindung.

In einem weiteren Schritt sind die für den Transport benötigten Infrastrukturoptionen zu vergleichen. Kriterien für die Bewertung sind neben den Kosten insbesondere Realisierungs- und Genehmigungsaspekte. Die volkswirtschaftlichen Effekte sind entscheidend für eine Umsetzung. Es ist deshalb zu zeigen, dass der gewählte Lösungsansatz der Einbindung von Stromübertragungsleitungen in bestehende bzw. sich weiterentwickelnde Infrastrukturen Vorteile bietet.

Abb. 2: Vorgehensweise



2 Genehmigungungsverfahren / Beschleunigungsoptionen

Neben der Erfüllung technischer Voraussetzungen bestimmen Akzeptanz und Genehmigungsfähigkeit die zukünftige Energieversorgungsstruktur. Jeder Genehmigungsschritt bindet eine Vielzahl von Verantwortungsträgern mit einer hochkomplexen Vielfalt von Schnittstellen ein. Für die Integration von Stromversorgungssystemen in andere Infrastrukturen sind hierbei im Rahmen der Landes- und Regionalplanung Raumordnung und Planfeststellung von wesentlicher Bedeutung.

2.1 Bestehende Rechtslage

2.1.1 Raumordnungsverfahren

Das Raumordnungsverfahren als Teilbereich staatlicher Planungen betrifft die überörtliche und überfachliche Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Gesamttraumes sowie von Teilräumen der Bundesrepublik Deutschland. Im deutschen Bundesstaat¹, mit den zwei Ebenen der Staatlichkeit – der Bundes- und der Länderstaatlichkeit – gehört die entsprechende Gesetzgebungskompetenz im Zuge der Föderalismusreform zur konkurrierenden Gesetzgebung.²

Konkurrierende Gesetzgebung bedeutet, dass die Länder nur dann eine Gesetzgebungskompetenz haben, wenn der Bund davon keinen Gebrauch gemacht hat. Im Bereich des Raumordnungsrechts haben die Länder jedoch die Möglichkeit zugestanden bekommen³, mit ihrer Gesetzgebung von der des Bundes abzuweichen, wobei das jeweils spätere Gesetz Geltungsvorrang hat.⁴ Es besteht damit das Risiko einer „Ping-Pong“-Gesetzgebung!

Mit dem Gesetz zur Änderung des Raumordnungsrechts und anderer Gesetze vom 22.12.2008⁵ hat der Bund von seiner Gesetzgebungskompetenz Gebrauch gemacht. Dieses Gesetz ist damit verpflichtende gesetzliche Grundlage für die Landesplanung, wobei die Verzahnung mehrerer Ebenen von Staatlichkeit (Bund, Länder, Kreise, Kommunen) in der Raumordnung gewährleistet ist. Basis sind hierbei das Gegenstromprinzip – sowohl von den unteren Verwaltungsebenen zu den

1 entsprechend Art. 20 Abs. 1 Grundgesetz (GG)

2 gemäß Art. 74 Abs. 1 Nr. 31 i.V.m. Art. 72 Abs. 3 Satz 1 Nr. 4 GG (GG-Änderung vom 28.06.2006, BGBl. I S. 2034 – s.a. Art. 30f., 70 ff. GG).

3 gemäß Art. 72 Abs. 3 Satz 1 Nr. 4 GG

4 gemäß Art. 72 Abs. 3 Satz 23 GG

5 Gesetz zur Änderung des Raumordnungsrechts und anderer Gesetze (GeROG) vom 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986)

höheren als auch umgekehrt können Beteiligungen stattfinden –, Flächennutzungspläne und kommunale städtebauliche Planungen sowie der Grundsatz der Koordination durch Kooperation.

2.1.2 Planfeststellungsverfahren

Bei der Realisierung besonders umfangreicher und/oder einschneidender Bauvorhaben ist zusätzlich ein Planfeststellungsbeschluss erforderlich.⁶ Er ist abhängig von dem bestehenden Bebauungsplan. Die in Frage kommenden Vorhaben sind spezialgesetzlich geregelt. Es handelt sich z.B. um Autobahnen, Flughäfen, Deponien, Energieversorgungsanlagen oder militärische Liegenschaften.

Sofern ein geplanter Planfeststellungsbeschluss gegen Festlegungen eines Bebauungsplanes verstößt, muss dieser geändert werden. Ergebnis ist jedoch keine Satzung, sondern ein Verwaltungsakt⁷. Hiergegen ist die direkte Anfechtungsklage zulässig, so dass nicht wie beim Bebauungsplan inzidenter vorgegangen werden muss.

Energiewirtschaftsgesetz: Das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG) vom 7. Juli 2005 behandelt den Bau und den Betrieb von Elektrizitäts- und Gasnetzen. In §§ 12 und 13 wird darin die (bedarfs-, nicht planungsrechtliche) Planung für den Bau von Übertragungsnetzen festgeschrieben. Bau und Planung von Leitungen (Strom ab 110 kV) sind im Energiewirtschaftsgesetz in den §§ 43 ff. geregelt. Dort ist festgelegt, dass „deren Errichtung und Betrieb sowie Änderung“ einer Planfeststellung bedürfen.

Gegenüber dem Standardplanfeststellungsverfahren zeichnet sich das Planfeststellungsverfahren für den Leitungsbau dadurch aus, dass eine umfassendere Berücksichtigung von Umweltbelangen gemäß § 43 a Nr. 2 vorgesehen ist. Hierbei gilt aber auch, dass Vorhaben unter Umständen gemäß dem Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen (Energieleitungsausbaugesetz - EnLAG) privilegiert sein können.

2.1.3 Umsetzung

Mit der Planfeststellung erhält der Betreiber der zu bauenden Hochspannungs- oder Gasversorgungsleitung umfangreiche Rechte zur Umsetzung der Planung. Sie sind in den §§ 43 e ff. geregelt und können bis zu der Möglichkeit einer Enteignung (§ 45) reichen. Da über die Zulässigkeit der Baumaßnahmen bereits im Rahmen der Planfest-

⁶ gemäß den §§ 72 ff. des Verwaltungsverfahrensgesetzes des Bundes (VwVfG) sowie den identischen landesgesetzlichen Vorschriften

⁷ im Sinne des § 35 VwVfG

stellung entschieden wurde, gibt es dagegen nur noch die Möglichkeit der rechtlichen Überprüfung.

2.2 Beschleunigung von Genehmigungsverfahren

Die vorstehenden Ausführungen machen deutlich, dass das mit einer Vielzahl von Genehmigungsschritten angestrebte Ziel allseitiger Rechtssicherheit durch die Komplexität der Verfahren konterkariert wird. Erschwerend kommt hinzu, dass Bewertungsmaßstäbe und Inhalte einzelner Verfahrensstufen zunehmend verschwimmen, z. B. zwischen Raumordnung und Planfeststellung. Vor diesem Hintergrund ist die konsequente konstruktive Nutzung insbesondere der Mitsprachemöglichkeiten aller betroffenen Bundesländer in der Raumordnung wünschenswert.

2.2.1 Zielorientierte Raumordnung

Beginnend mit dem Aufbau eines Overlay-Netzes steht eine Struktur zur Diskussion, die sich über mehrere Regelzonen erstreckt und über Deutschland hinaus von europäischer Bedeutung ist. Insoweit bedarf es eines national einheitlichen Konzepts, das föderal abzustimmen ist. Relevante Grundsätze sind in § 2 Abs. 2 Raumordnungsgesetz (ROG) definiert:

- Ausgeglichene Verhältnisse im Gesamttraum Bundesrepublik Deutschland
- Versorgung mit Dienstleistungen und Infrastrukturen zur Daseinsvorsorge
- Wirtschaftsentwicklung
- Erhalt von Kulturlandschaften
- Berücksichtigung ökologischer Funktionen
- Zusammenhalt der EU und Europas.

Diese Grundsätze zu konkretisieren gehört zum Planungs- und Koordinationsauftrag des Bundes. Die bundesweite Raumordnung auf Bundesebene für die physische Bündelung kritischer Infrastrukturen im Bereich natürlicher Monopole gehört dazu. Die Errichtung einer Regelzonen übergreifenden Overlay-Struktur, die auch zum überregionalen, grenzüberschreitenden Transport von Strom und zur Einbindung dezentral erzeugten Stroms dient und zumindest teilweise vorhandene Trassenrechte nutzt, ist ein Anwendungsfall.

Von wesentlichem Einfluss sind hierbei die Ziele. Dies sind Vorgaben, die für landesplanerische Letztentscheidungen und deren Adressaten, wie zum Beispiel Gebietskörperschaften, bindend sind. Sie sind das Ergebnis eines auf den Gesamttraum bezogenen Abwägungsprozesses,

so dass in den weiteren Planstufen nur noch die Umsetzung wie Flächennutzungsplan, Bauleitplanung, etc. zur Diskussion steht. Diese Ziele müssen dem Rechtsstaatsprinzip entsprechen. Dies beinhaltet u. a. die Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit und das Homogenitätsgebot. Sie müssen damit bestimmt, d.h. geografisch konkret, gebiets- und funktionsscharf sein, insbesondere bei monofunktionalen, flächendeckenden zielförmigen Festlegungen. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine solche Festlegung an die Stelle von Fach-/Projektplanungen konkreter Infrastrukturen (auf Landesebene) treten soll.

Nach Abschnitt 3 des ROG ist das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hierbei in der Verantwortung. Es ist berechtigt, Raumordnungspläne mit länderübergreifenden Zielfestsetzungen zusammen mit den zuständigen Landesplanungsbehörden aufzustellen⁸. Dies gilt insbesondere, wenn das Verfahren zur Berücksichtigung möglicher Standortkonzepte für Flug- und Seehäfen im Bundesverkehrswegeplan auf andere Infrastrukturen von inter-/nationaler Bedeutung, wie zum Beispiel Stromübertragungsnetze, Anwendung findet⁹.

8 § 17 Abs. 1 und 2 i.V.m. § 26 Abs.1 und 4 ROG

9 §§ 18, 23 ROG

3 Netzertüchtigung / Infrastrukturoptionen

Die Umsetzung der politischen Ziele erfordert einen leistungsstarken Stromtransport. Hierzu ist das Transportnetz im Sinne der politischen Zielstellungen zu ertüchtigen.

3.1 Netzertüchtigung

Die Einspeisung von fluktuierender und lastferner Energieerzeugung kann zu einer erheblichen Belastung des bestehenden 400-kV-Drehstrom (AC)-Transportnetzes führen. Technische Maßnahmen wie Hochtemperaturseile (TAL) oder Temperaturmonitoring (FLM) bieten dabei nur punktuell Erleichterung. Zusätzliche Beeinträchtigungen resultieren aus den Aktionen der Nachbarländer, wo man versucht, den in Deutschland anfallenden fluktuierenden Einspeisungen durch Aufbau von Quer- und Längsreglern zu begegnen.

Eine bessere Bewältigung der zukünftigen Transportaufgaben erfordert eine nachhaltige Ertüchtigung des 400-kV-AC-Netzes. Mit der Verabschiedung des Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG) versuchte der Gesetzgeber, dies zu unterstützen. Mit den Ergebnissen der Dena II-Studie wird dies nochmals unterstrichen.¹⁰ Offen ist jedoch, wie sich diese Zielstellung im Einklang mit der Bevölkerung erreichen lässt. Trotz gesetzlicher Privilegierungen ist die Akzeptanz durch die Bevölkerung nicht sichergestellt. Anwohner und Bürgerinitiativen führen vielfältige Begründungen, wie optische Beeinträchtigungen, elektromagnetische Felder und akustische Belästigungen an, um neue Freileitungsprojekte zu verhindern. Auch die Realisierung von erdverlegten Systemen lässt keine wesentliche Beruhigung der Diskussion erwarten. Bedenken betreffen hier die Zerschneidung schutzwürdiger Regionen, elektromagnetische Felder oder ökologische Beeinträchtigungen.

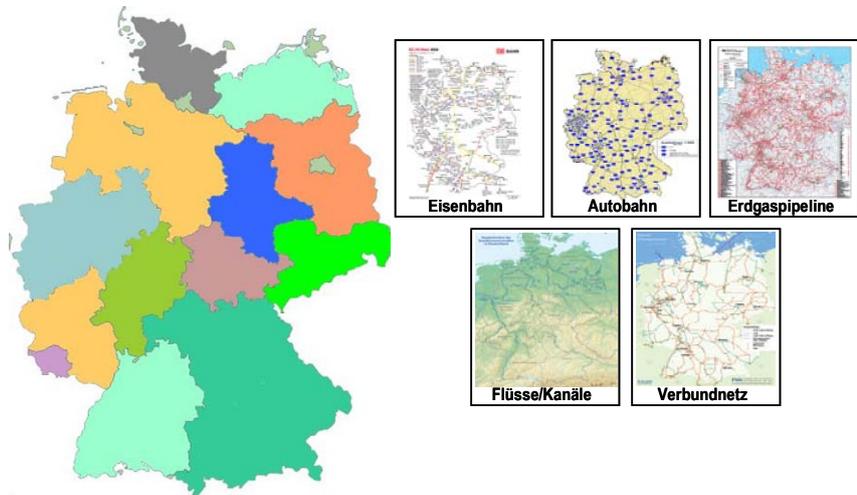
Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass das bestehende Netz den Anforderungen des zukünftigen Energieaufkommens nicht gerecht wird. Ertüchtigungen können punktuell Entlastung bieten, sie erfüllen aber nicht die Anforderungen an ein leistungsstarkes Übertragungssystem. Diesem Anspruch könnte ein neues übergeordnetes Transportnetz, ein Overlay-Netz, gerecht werden. Seine Realisierung erfordert aber neue Lösungsansätze. Eine Kombination mit bestehenden Infrastrukturen wie Autobahnen, Eisenbahnen, Flüssen und Kanälen oder Freileitungssystemen könnte eine Basis sein, um Akzeptanzprobleme bei der Umsetzung zu überbrücken.

¹⁰ Dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025

3.2 Infrastrukturen

Für die heutige Versorgungssituation ist kennzeichnend, dass die Transportnetzbetreiber bei der Umsetzung ihrer Projekte auf die Zusammenarbeit mit den Bundesländern angewiesen sind. In Einzelfällen können dabei bis zu sechs Bundesländer einzubinden sein, mit teilweise sehr unterschiedlichen Interessenlagen (Abb. 3). Eine Kombination von Energieprojekten mit Infrastrukturen, die vorrangig im Verantwortungsbereich des Bundes liegen, könnte damit bei der Interessenabwägung Vorteile bieten.

Abb. 3: Bundesrepublik Deutschland mit Bundesländern und Infrastrukturen¹¹



Für die Kombination von Energieprojekten mit Infrastruktureinrichtungen bieten sich vorrangig 5 Optionen an. Hierzu zählen Eisenbahntrassen, Autobahnen, Flüsse, Kanäle sowie bestehende Freileitungstrassen der Stromversorgung.

- Das **Schiennetz** umfasst derzeit eine Länge von 34.000 km, das Bahnfernstromnetz weist eine Länge von mehr als 7.800 km auf. Betreiber ist die DB Energie GmbH, eine Beteiligung der DB AG. Zuständig für Raumordnung und Planfeststellung ist das Eisenbahn-Bundesamt (EBA).
- Das deutsche **Bundesautobahnnetz** umfasst 12.700 Kilometer. Die Trassen sind vier- und sechsspurig ausgebaut, in selteneren Fällen bis auf 8 Spuren. Die Zuständigkeit für die Bundesfernstraßen obliegt dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).

¹¹ Quelle: Wikipedia

- Das **Pipelinesystem** für die Mineralöl- und Erdgasversorgung ist in Deutschland flächendeckend vorhanden. Die Anlagen sind in der Regel im Eigentum privater Gesellschaften.
- **Flüsse und Kanäle** als Teil des Binnenwasserstraßennetzes verfügen über eine Länge von 7.360 km. Hinzu kommen 23.000 km Seewasserstraßenflächen, 6.550 km hiervon als Binnenschiffahrtsstraßen. Die verkehrlich bedeutenden Wasserstraßen sind im Eigentum des Bundes, weitere Wasserstraßen in der Verwaltung der Bundesländer.
- Das **Deutsche Verbundnetz** weist eine Stromkreislänge von 35.708 km auf. Es umfasst die Spannungsebenen 400-kV und 220-kV. Eigentümer sind die Transportnetzbetreiber Amprion GmbH, EnBW AG, TenneT TSO GmbH und 50 Hz-Transmission GmbH.

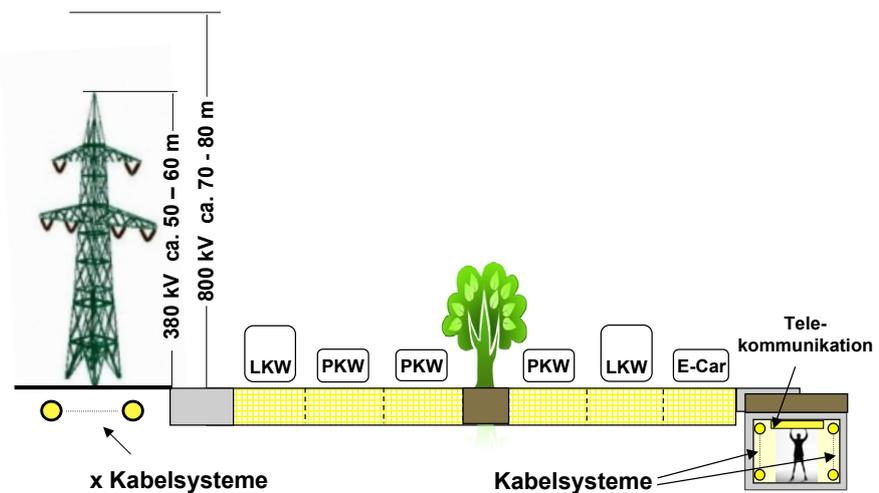
4 Kombination von Infrastruktur und Energieversorgung

Für die Kombination von Verkehrsinfrastrukturen und Energieprojekten bieten sich vielfältige Varianten. Generell sind Konzeptionen denkbar, wie sie in Abb. 4 beispielhaft für eine Autobahn dargestellt sind.

4.1 Kombination mit Infrastrukturen

Die Integration von Energieleitungen der öffentlichen Stromversorgung in bislang separate Bahnstromtrassen ist eine nahe liegende Option für den Transport von Strom. Als interessant ist hierbei die Kopplung eines zukünftigen Netzes mit den Hochspannungsversorgungsanlagen der Bahn zu werten. Dies gilt insbesondere bei einer Umsetzung als Freileitungslösung. Voraussetzung ist jedoch die Einhaltung der bestehenden Verfügbarkeit.

Abb. 4: Kombination von Autobahn und Freileitungsaus-/neubau und/oder Kabelsysteme



Autobahnen bieten mit den verfügbaren Flächen optimale Bedingungen. Mit der Trasse stehen diverse Betriebseinrichtungen zur Verfügung (Parkplätze etc.), die sich für Wartungseinrichtungen eignen. Kennzeichnend ist die Errichtung eines Standstreifens neben der Fahrbahn, der sich wie die Erweiterungsflächen zur Integration von Stromversorgungssystemen nutzen lässt. Restriktionen resultieren aus den parallel zu den Verkehrswegen befindlichen Kommunikationsleitungen, die im Bedarfsfall zu verlegen oder in die neuen Versorgungseinrichtungen zu integrieren sind.

Pipelinetrassen weisen in der Regel Breiten von 10 – 15 m auf. Da davon auszugehen ist, dass die vorhandenen Rohrleitungssysteme in der Mitte der Trasse liegen, verbleiben für das Stromversorgungssystem

tem die Seitenbereiche mit Freiräumen von etwa 5 m auf jeder Seite. Ohne die Beschaffung zusätzlicher Flächen ist damit die Einbringung von Energieversorgungssystemen nur unter Inkaufnahme größerer räumlicher Zwänge machbar.

Flüsse und Kanäle finden schon heute vielfältig Verwendung für das Einbringen von Energieversorgungssystemen. Als Beispiel hierfür kann die Erdgasversorgungsleitung des Berliner Heizkraftwerks Mitte in der Spree dienen. Wenn auch an der Eignung für Energieversorgungssysteme keine Zweifel bestehen, ist in vielen Fällen von ökologischen, schiffahrts-, bau- und wartungstechnischen Einschränkungen auszugehen.

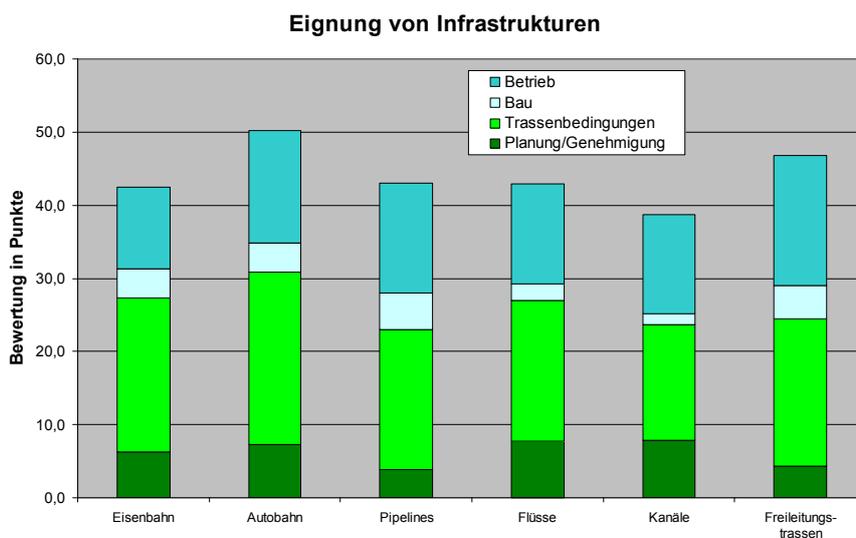
4.2 Eignung von Infrastrukturen

Die Eignung der Infrastrukturen variiert erheblich. Sie lässt sich an Hand relevanter Kriterien bewerten. Von Interesse sind:

- Planung/Genehmigung
- Trassenbedingung
- Bau
- Betrieb

Abb. 5 beschreibt das Ergebnis einer Bewertung¹². Es weist leichte Vorteile für Autobahnsysteme aus. Sie resultieren vorrangig aus der Eignung der Trassen. Generell gilt aber, dass alle Infrastrukturen spezielle Vorteile aufweisen, die aus heutiger Sicht dafür sprechen, zur Sicherung der Flexibilität die Auswahl offen zu halten.

Abb. 5: Bewertung von Infrastrukturen



¹² Die Bewertung erfolgte in einem Kreis von 13 Experten unterschiedlicher Provenienz. Teilgenommen haben Mitarbeiter der Übertragungsnetzbetreiber, Vertreter der Energiewirtschaft, Hersteller, Wissenschaft und der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG).

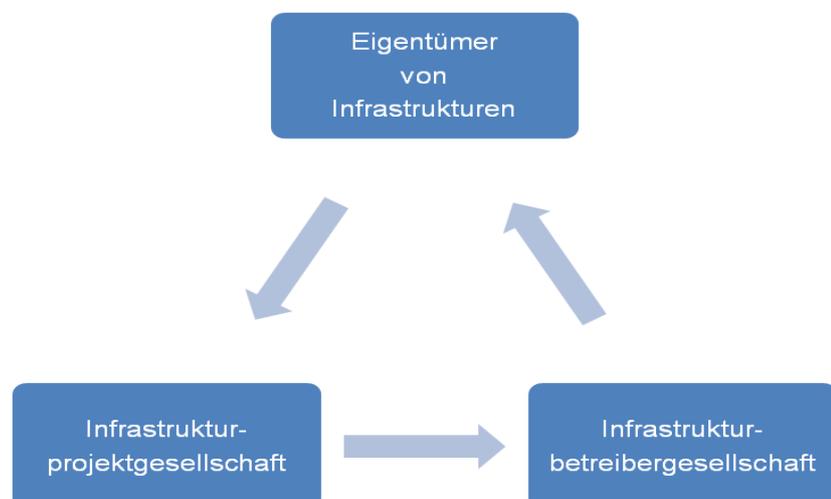
5 Finanzierung

Das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung zu maximieren, liegt im nationalen Interesse. Die Realisierung und Finanzierung der Umstrukturierung und des Ausbaus der Stromtransportnetze, insbesondere eines Overlay-Netzes, unter Einbeziehung staatlichen Vermögens bedarf deshalb eines geeigneten Finanzierungsmodells. Da der Netzausbau den Einsatz erneuerbarer Energien fördert, ist er integraler Bestandteil der Klima- und Umweltpolitik. Insoweit sollte geprüft werden, ob Kosten für die Weiterentwicklung von Netzen und zum Ausgleich von Erzeugungsschwankungen anteilig aus dem Aufkommen der EEG-Umlage gedeckt werden, zum Beispiel im Umfang eines Teils der vorgesehenen Degression der Förderung einzelner Erzeugungsarten, die ggf. nach Effizienzkriterien wie der Jahresbetriebsstundenzahl und nach Varianten differenziert, wie zum Beispiel bei Windkraft – Offshore und Onshore, erfolgen könnte.

Unabhängig davon bedarf es der Anerkennung eines Investitionsbudgets durch die Bundesnetzagentur. Hierbei ist der verbundene Aufwand für Forschung und Entwicklung sowie für erhöhte Ressourceneffizienz zu berücksichtigen, zum Beispiel durch geringeren Landschaftsverbrauch bei Nutzung vorhandener Trassen und verminderte Übertragungsverluste durch neue, höchstleistungsfähige Technologien.

Als Alternative zu einer privatwirtschaftlichen Umsetzung könnte für international bedeutsame Projekte, wie einem europatauglichen Overlay-Netz, eine Gesellschaft mit gemischt privater und öffentlich-rechtlicher Beteiligung gegründet werden (Abb. 6). Gesellschafter der öffentlichen Hand gewährleisten, dass Planung und Umsetzung dem mitgliedersstaatlichen Interesse an einer zur Förderpolitik kohärent verlaufenden Entwicklung der Netzwirtschaft entsprechen. Eine Beteiligung der öffentlichen Hand bedeutete zugleich günstigere Finanzierungsbedingungen für die Projektgesellschaft. Die Betriebsführung eines Overlays würde den Transportnetzbetreibern gemeinschaftlich obliegen.

Abb. 6. Skizze: Grundkonstruktion eines Gesellschaftsmodells



6 Vorteile eines Overlay-Netzes

Der Aufbau eines Overlay-Netzes bietet die Chance, die Energieversorgung langfristig auf eine neue Basis zu stellen. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen lassen sich unterteilen nach Effekten,

- die direkt in Verbindung mit der Stromversorgung stehen,
- die die Wirtschaft insgesamt betreffen und
- die in Verbindung mit umweltpolitischen Zielsetzungen stehen.

6.1 Effekte für die Stromversorgung

Der Aufbau eines Overlay-Netzes ermöglicht einen großräumigen Energieaustausch. Stromüberschüsse lassen sich damit in Regionen transportieren, in denen ein Strombedarf besteht. Gleichzeitig eröffnet sich die Chance, die Systemstabilität des Verbundnetzes durch besseren Ausgleich vorhandener Erzeugungs- und Speicherkapazitäten zu verbessern. Mit der physikalisch optimalen Systemintegration sind zusätzliche finanzielle Vorteile aus einer Optimierung von Investitionsszenarien und deren Folgekosten verbunden.

6.2 Wirtschaftliche Effekte

Eine einheitliche Planung des Bundes und der Länder vorausgesetzt, verbessert sich die Umsetzung von Netzausbau und -umstrukturierung mit entsprechendem Zeit- und Kostenvorteil. Gleichzeitig wird die Ablösung fossiler Energieträger beschleunigt und der Energiespeicherungsbedarf reduziert. Mit dem Aufbau eines Overlay-Netzes erhält Deutschland zudem eine Preiszone und es wird ein Impuls gegeben für einen großflächigen europaweiten Ausbau mit positiven Auswirkungen auf den europäischen Binnenmarkt. Nicht zuletzt ist der Auf- und Ausbau der Stromtransportnetze in hohem Maß effizienzsteigernd und beschäftigungswirksam.

6.3 Umweltpolitische Effekte

Die Kombination von Infrastrukturen und Stromtransportsystemen reduziert den Bedarf an zusätzlichen Trassen. Gleichzeitig optimiert eine gesamthafte Systemführung die Verwertung von Strom aus erneuerbarer Produktion.

7 Stand der Technik

Zum gegenwärtigen Stand der Technik gibt Kapitel 2 des VDE-Positionspapier „Übertragung elektrischer Energie“ vom Mai 2010 Auskunft. Weitere Informationen hierzu finden sich in der Langfassung im Anhang 2.

7.1 Zusammenfassung – Stand der Technik

Die Ausführungen in dem VDE-Positionspapier „Übertragung elektrischer Energie“ und in Anhang 2 der Langfassung zeigen, dass neben AC-Anwendungen für den Aufbau eines Overlay-Netzes LCC-Stationen bei DC-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen in Frage kommen, für ein vermaschtes DC-Netz VSC-Systeme. Als AC-Transportsystem sind Freileitungen, Kabel und GIL kommerziell verfügbar, für die DC-Übertragung Freileitungen und Kabel. Freileitungen gelten sowohl in der AC- als auch DC-Anwendung bis 800 kV als ausgereift.

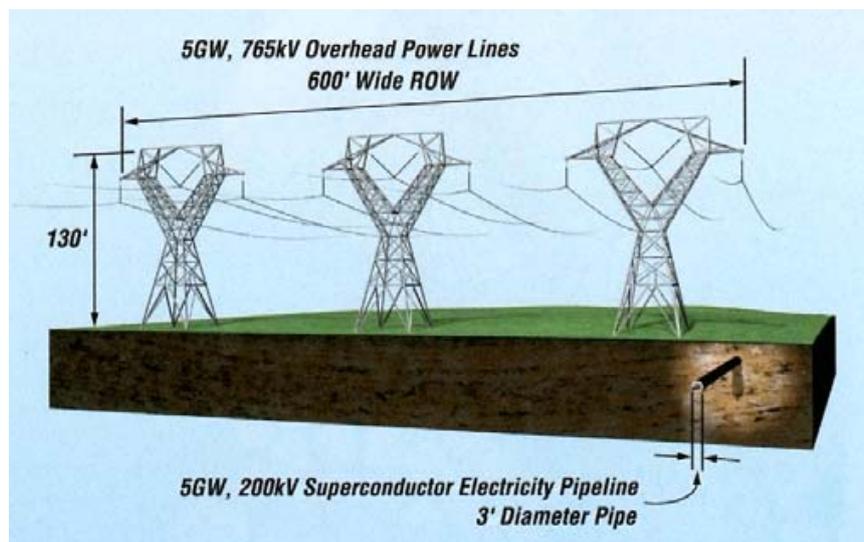
Ein Schwerpunkt liegt bei allen HGÜ-Systemen bei der Entwicklung effizienterer und kostengünstiger VSC-Systeme sowie Gleichspannungsleistungsschaltern. Bei Bedarf ist auch die Entwicklung einer DC-GIL möglich. LCC-Systeme sind zwar bis zu sehr hohen Spannungswerten (800 kV) nutzbar, sie kommen aber für ein vermaschtes Overlay-Netz nicht in Frage. VSC-Systeme entsprechen zwar allen Anforderungen an ein überlagertes Grid, es besteht aber im höheren Spannungsbereich (>500 kV) noch Entwicklungsbedarf. Unter den Kabeltechnologien sind VPE-Kabel als die geeignete Technologie für den Onshore-Einsatz zu betrachten. Da sie im DC-Bereich derzeit aber nur bis +/- 320 kV verfügbar sind, besteht für höhere Spannungen noch Entwicklungsbedarf.¹³

¹³ Quelle: Nexans

AC-GIL-Systeme sind bis 550 kV einsatzfähig, wobei Erfahrungen bereits bis 800 kV vorliegen. Erdverlegte GIL-Systeme sind jedoch bislang nur als kurze Pilotstrecken verfügbar.

Ergänzend ist festzustellen, dass eine Umrüstung von AC-Freileitungen auf DC-Betrieb prinzipiell möglich ist. Untersuchungen zum Mastmodell Donau¹⁴ bestätigen dies. Weiterhin sind Supraleiter im Transportnetzbereich noch als Entwicklungstechnologie zu betrachten (Abb. 7). Dies gilt trotz des Umstandes, dass supraleitende Kurzschlussbegrenzer, supraleitende Generatoren etc. bereits kommerziell betrieben werden.

Abb. 7: Supraleiter für das Transportnetz¹⁵



14 Untersuchung Mastmodell Donau

15 Quelle: Renewable energy outlook, Jack McCall, AMFC, Rise of the superconductor part 2, Sept./Oct. 2009

8 Bautechnische Umsetzung

Für die bautechnische Umsetzung zur Verzahnung von Stromtransportsystemen mit anderen Infrastrukturen bieten sich verschiedene Optionen an. Sie lassen sich in Freileitungssysteme und unterirdische Verlegungsverfahren unterscheiden.

8.1 Freileitungssystem

Die Umsetzung erfordert in Abständen von ca. 400 m Mastbauwerke mit von den topographischen Gegebenheiten abhängigen Höhen. Kreuzungsbereiche mit Straßen, Bahnen, Flüssen etc. werden überspannt und stellen kein Hindernis dar. Ein dauerhafter Flächenbedarf ist ausschließlich im Bereich der Maste gegeben, im Bereich der Freileitungen sind land- und forstwirtschaftliche Flächen weiterhin möglich.

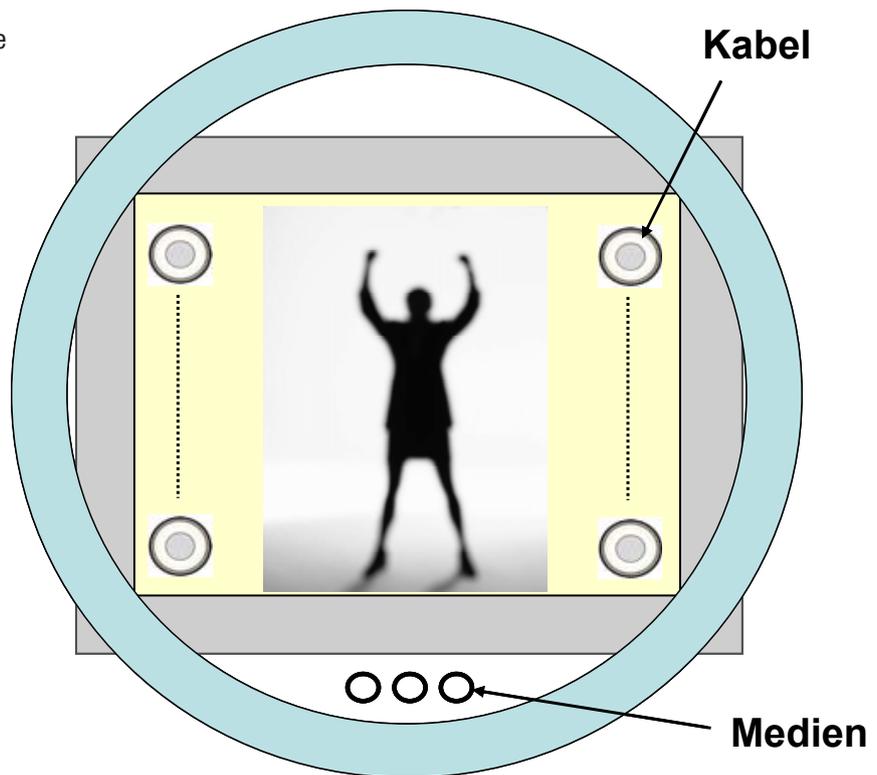
8.2 Unterirdische Verlegung

Trassenbreiten bzw. Tunnelquerschnitte sind von der zu übertragenden Leistung und der Anzahl der benötigten Leiter abhängig. Kennzeichnend ist ein hoher zeitlicher und technischer Aufwand, verbunden mit Bodenrisiken. Während der Bauphase sind in großem Maße Aushub- und Füllmaterial zu bewegen und zu lagern.

- Die **Erdverlegung** erfordert einen ca. 1,2 – 1,8 m tiefen Graben. Spezielle bautechnische Lösungen sind zudem im Bereich von Kreuzungen mit anderen Infrastrukturen wie Flüssen etc. erforderlich. Eine landwirtschaftliche Nutzung der Flächen ist möglich, eine forstwirtschaftliche in der Regel nicht. Im Vergleich der unterirdischen Verlegetechniken gilt die Erdverlegung als wirtschaftlichste und in der Umsetzung schnellste Option; sie ist aber mit einer eingeschränkten Zugänglichkeit der Anlagen bei Reparaturen verbunden.
- Für eine **Tunnelkonzeption** in offener Bauweise eignen sich Rechteck- und Kreisprofile (Abb. 8). Für das Rechteckprofil spricht eine optimale Nutzung des verfügbaren Raumes, für ein Kreisprofil die optimierte Ausnutzung der Beton- und Stahlquerschnitte. Die Herstellung ist mittels Vor-Ort-Betonierung oder industrieller Vorproduktion denkbar. Eine anderweitige Nutzung der Trasse ist nicht denkbar, so dass sich diese Lösung vorrangig für eine Parallelverlegung zu

Bundesfernstraßen anbietet. Größerer Aufwand besteht im Bereich von Kreuzungen mit bestehenden Infrastrukturen oder bei starkem Gefälle. Im Vergleich zur Erdverlegung ist eine offene Tunnelverlegung kostenintensiver, bietet allerdings Vorteile in Bezug auf zukünftige Nutzungen und Zugänglichkeit.

Abb. 8: Beispiele für Tunnelprofile



- Die **Tunnelherstellung in geschlossener Bauweise** mittels Tunnelvortriebsmaschine (TVM) oder im Spreng-/Baggervortrieb bietet den Vorteil, dass Hindernisse oder Kreuzungen unterfahren werden können. Im Vergleich zur offenen Tunnelbauweise ist die geschlossene Bauweise langsamer und mit höherem Baugrund – und Planungsrisiko verbunden.
- Bei **Brücken und Sonderbauwerken** ist zu prüfen, ob sich die vorhandenen Infrastrukturen zur Einbringung der Energietechnologie nutzen lassen. Inwieweit sich dies mit der Statik des Bauwerks vereinbaren lässt bzw. genehmigungsfähig ist, ist im Einzelfall zu prüfen.

9 Innovation: Tunnellösung mit Endloskabel als technologische Chance

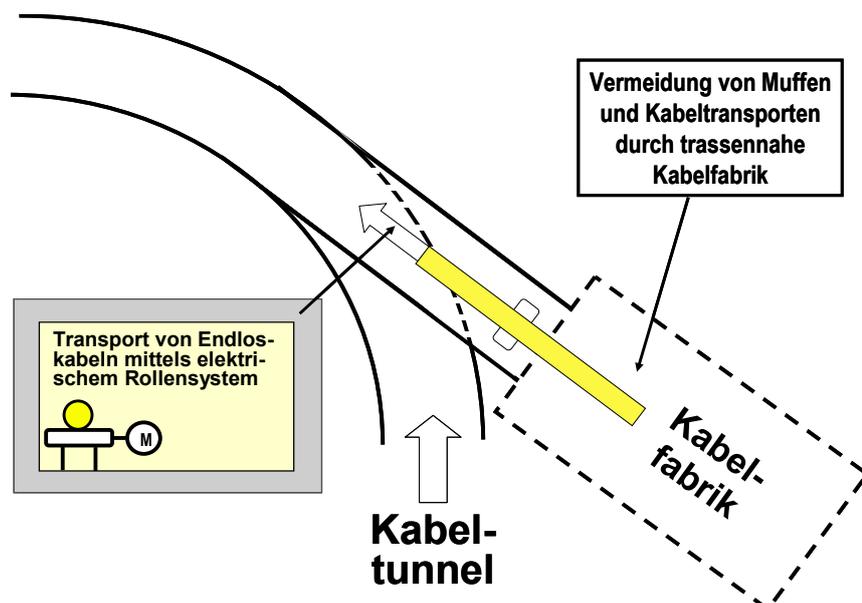
Technische Schwächen und eine eingeschränkte Verfügbarkeit resultieren bei Kabelsystemen aus Muffen und Endverschlüssen. Ein Konzept, das diese Schwächen vermeiden will, geht von der Herstellung eines „Endloskabels“ in Verbindung mit einem Tunnel aus (Abb. 9). Das Kabel wird hierbei direkt von der Fabrik aus in den Tunnel eingeführt. Die benötigten Produktionseinrichtungen sind derzeit noch nicht verfügbar, sollten sich aber entwickeln lassen. Dies gilt auch für den Transport des Kabels im Tunnel. Statt Ziehvorrichtungen sind rollenbasierte Transportsysteme einzusetzen, z.B. in Verbindung mit Schrittmotoren.

Die freie Beweglichkeit im Tunnel erlaubt es, das Kabel im Tunnel beliebig zu transportieren. Zu einem späteren Zeitpunkt ist damit auch der Austausch gegen leistungsstärkere Systeme denkbar.

Langfristige Vorteile: Der hohe Grad der Flexibilität bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Systeme (AC, DC, Kabel, GIL) einzusetzen. Zudem wäre auch die Voraussetzung gegeben, technologische Entwicklungen wie z. B. Supraleiter leichter zu nutzen. Innovationen im Transportnetzbereich werden damit leichter umsetzbar.

Als Restriktion ist die Kühlung zu berücksichtigen. Zur Vermeidung parasitärer Verbräuche sind Tunnelkonstruktionen zu wählen, die über eine natürliche Belüftung verfügen.

Abb. 9: Prinzipbild – Transport von „Endloskabeln“ im Tunnel



10 Overlay-Netz

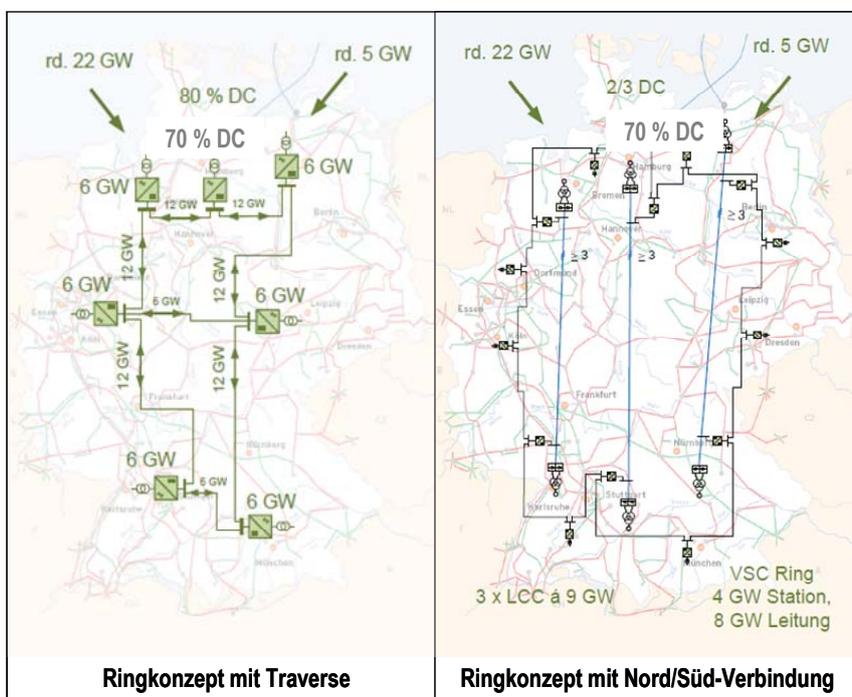
Die folgenden Ausführungen beschreiben eine erste Abschätzung eines Overlays. Die regionale Ausrichtung des Netzes und seiner Terminals orientiert sich an dem erwarteten Energieaufkommen sowie den langfristig bestehenden Verbrauchsschwerpunkten.

Prinzipiell ist eine Ausführung in Wechsel- (AC) und Gleichspannung (DC) denkbar. Eine Ausführung in AC bietet hierbei den Vorteil, dass die Integration in das bestehende Versorgungssystem leichter möglich ist. Für die Umsetzung der Versorgungskonzeption auf Basis von AC Technologien bieten sich vor allem Freileitungen und ggf. für kürzere Abschnitte GIL-Systeme.

10.1 Netzkonzeption

Kennzeichnend für die hier dargestellten DC-Netzkonzepte (Abb. 10) ist der Umstand, dass rd. 70 % des in Nord- und Ostsee erwarteten Energieaufkommens über das Gleichstromnetz abtransportiert werden. Die Systeme lassen sich sukzessive aufbauen. Weiterhin ist unterstellt, dass Leistungsbeschränkungen im Bereich der Voltage Source Converter (VSC)-Technologie nicht bestehen und DC-Leistungsschalter verfügbar sind. Der Aufbau vermaschter DC-Netze ist somit möglich.

Abb. 10: Heutiges Übertragungsnetz (links) / Skizze Overlay-Gleichstromnetz (rechts)



Die links in Abb. 10 dargestellte Konzeption geht von einem voll vermaschten Konzept in Verbindung mit VSC-Stationen aus. Die Stromübertragung zu den Verbrauchsschwerpunkten in West-, Süd- und Ostdeutschland erfolgt über 12 GW-Leistungstrassen, wobei zur Anbin-

dung an das 400-kV-Netz VSC-HGÜ-Stationen zum Einsatz kommen. Eine Querverbindung in der Mitte Deutschlands optimiert den Lastfluss. Kennzeichnend ist, dass sich bereits nach Realisierung der Nord-West-Verbindung nennenswerte Leistung in Lastschwerpunkte übertragen lässt.

Die rechts dargestellte Konzeption geht von drei in Nord-Süd-Richtung verlaufenden 9-GW-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen auf Basis der klassischen HGÜ Technologie (Line Commutated Converter, LCC). Sie werden ergänzt durch einen +/-320-kV-VSC-HGÜ-Ring mit DC-DC-Kupplungen, der für eine Erfassung der regional auftretenden Lastflüsse und richtungsunabhängige Abfuhr in die leistungsstarken Nord-Südverbindungen sorgt. Neben der hohen Verfügbarkeit (3 parallele Systeme) bietet diese Konzeption den Vorteil, dass es in Form der LCC-HGÜ bereits verfügbare Technologien gibt. Als nachteilig sind die Genehmigungsfähigkeit zu werten sowie der Umstand, dass die Punkt-zu-Punkt-Verbindungen erst nach einer vollständigen Herstellung aktivierbar sind.

10.2 Netzsicherheit / Stabilität

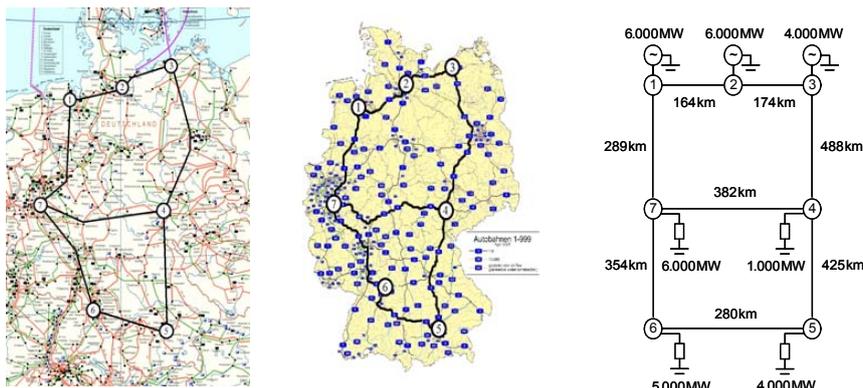
Die Konzeption des Overlays unterstellt, dass die bestehende Versorgungssicherheit beibehalten oder sogar verbessert wird. Maßgebend hierfür sind:

- das Ringkonzept mit Einhaltung der Anforderungen an die n-1 Sicherheit.
- die Aufteilung in Teilsysteme mit je 3.000 MW (In-sich-Redundanz).
- die Anordnung der DC-Terminals in den Zentren der großen Erzeuger, was die Einspeisung von Reserveleistung aus großen Kraftwerksblöcken ermöglicht und
- die Ausführung des Overlays in VSC-Technik, die einen richtungsunabhängigen Betrieb mit freier Beeinflussung des Lastflusses gewährleistet.

10.3 Lastflussanalyse

Die Lastflussanalyse geht von der in Abb. 10 links dargestellten DC-Konzeption und einem Energietransport parallel zu Autobahnen aus (Abb.11). Die Einspeisung der Windenergie aus Nord- und Ostsee erfolgt an drei Schnittstellen und wird zu den Lastschwerpunkten im Westen, Süden und Osten Deutschlands übertragen. Die Energie wird per Kabel mit einer Spannung von +/-500 kV und einer maximalen Übertragungsleistung von 12.000 MW transportiert. Abweichend hiervon gilt bei den Traversen eine Übertragungsleistung von maximal 6.000 MW.

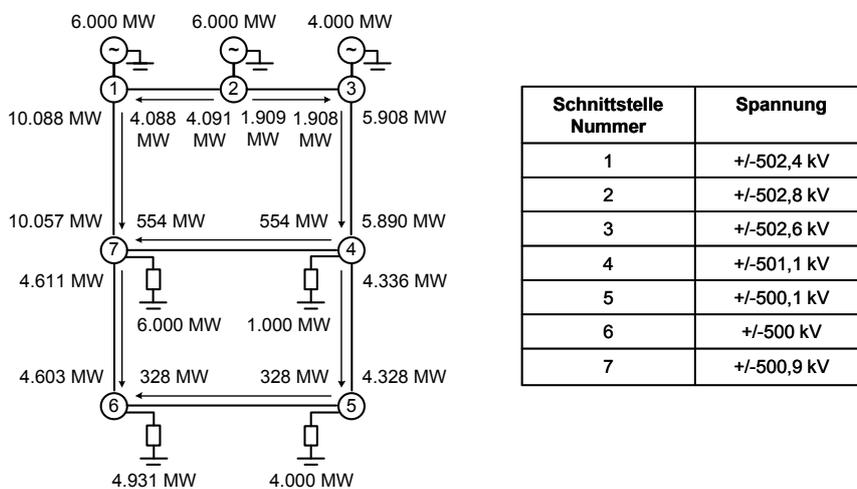
Abb. 11: Overlay-Netz mit Leitungslängen, Einspeisungen sowie Abgängen



10.3.1 Normalbetrieb

Die Ergebnisse der Lastflussanalyse bestätigen die Einhaltung der maximalen Übertragungsleistung sowie der zugehörigen Nennspannungen (Abb. 12). Mit 10.088 MW weist die Belastung zwischen den Schnittstellen **1** und **7** ein Maximum auf. Wegen der deutlich größeren Entfernungen über **3** und die Traverse **4** nach **7** sowie **5** nach **6** ist der Lastfluss auf diesen Verbindungen dagegen gering.

Abb. 12: Lastfluss im Overlay-Netz im Normalbetrieb



10.3.2 Lastflussanalyse im Fehlerfall

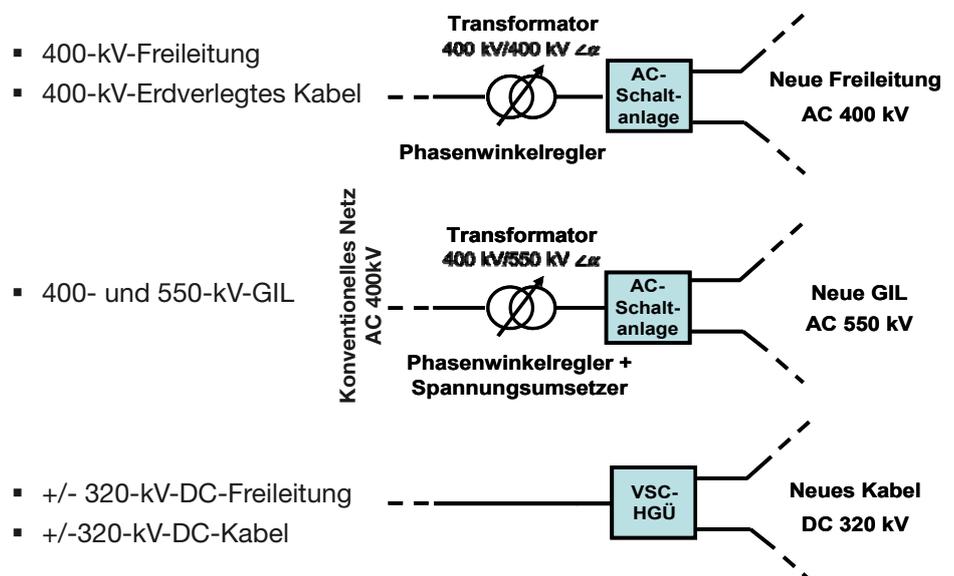
Hierzu wird beispielhaft ein Leistungsausfall zwischen den Schnittstellen **4** und **5** unterstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass das n-1 Kriterium eingehalten wird. Die Leistung zwischen den Schnittstellen **1** und **7** ist mit 97,6% am Limit belastet. Da ein Teil der Nord-Süd-Verbindung fehlt, kommen die Traversen zum Tragen.

11 Monetäre Systembewertung

Beispielhaft für eine Übertragungsleistung von 6.000 MW und eine Ausbaulänge von 400 km werden die Auswirkungen quantitativ bewertet. Die Bewertung berücksichtigt die derzeit verfügbaren oder etablierten Technologien. Für DC-Kabelsysteme gilt eine Betriebsspannung von max. +/-320 kV, für AC-Systeme eine max. Spannung von 400 kV bzw. 550 kV. Die Betrachtungen berücksichtigen das komplette System. Hierzu zählen bei DC-Systemen Stationen und Transportmittel, bei AC-Systemen gasisolierte Schaltanlagen, Trafos sowie Längs- und Querregler zu Laststeuerung.

Sechs verschiedene Varianten werden betrachtet (Abb. 13), wobei bei den erdverlegten Lösungen alternativ zur reinen Erdverlegung auch Tunnellösungen bewertet werden. Als Referenz dient das konventionelle AC-System mit 400-kV-Freileitungen. Die Varianten sind:

Abb. 13: Schema 400-kV-AC-Freileitung/Kabel



11.1 Kostenvergleich

Die quantitativen Bewertungen berücksichtigen die wichtigsten monetären Einflussgrößen. Hierzu zählen Investitionen, Betriebskosten sowie Stromverluste. Die Investitionen gehen von derzeit üblichen spezifischen Werten der Literatur aus.^{16 17}

Für die Bewertung der Kapitalkosten wird von einem Zinssatz von 8 % und einer Abschreibungszeit von 40 Jahren ausgegangen. Die Betriebskosten umfassen die Kosten für die Reparatur einschließlich der Bevorratung von Ersatzteilen. Die im Vergleich zu GIS-Schaltanlagen

¹⁶ Wirtschaftlichkeitsvergleich der geschlossenen und offenen Bauweise in großstädtischen Gebieten (Bewag AG, GuD Consult GmbH)

¹⁷ G.L.P. Aanhaanen Eindhoven, 27th of March 2006

und Freileitungen (80 Jahre Nutzungszeit) geringere Lebensdauer von Kabeln und HGÜ-Systemen (40 Jahre Nutzungszeit) wird durch einen Retrofitting-Zuschlag berücksichtigt. Die Stromverluste berücksichtigen die in den DC-Anschlussstationen und beim Transport auftretenden Verluste sowie den Kühlbedarf.

Die Angaben zu den Kosten sind als eine grobe Abschätzung zu betrachten. Sie sind ggf. im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu verifizieren. Für eine erste Bewertung sind nicht die absoluten Werte, sondern die Kosten der Systeme im Vergleich zueinander entscheidend. Zur Vereinheitlichung der Aussagen erfolgt die Darstellung der Ergebnisse deshalb in Prozentangaben.

Die Ergebnisse des Kostenvergleichs beschreibt Abb. 29. Sie bestätigen die wirtschaftlichen Vorteile von AC Freileitungssystemen (Balken A). Für erdverlegte Kabelsysteme (B) ist demgegenüber von 4-5 fach, bei einer Tunnellösung (C) sogar von 5-6 fach höheren Kosten auszugehen. Der Balken C1 beschreibt ergänzend die Aufwendungen für die E-Technik.

Die Balken D-G beschreiben die Kosten von 400 und 550 kV-GIL-Systemen. Hiernach ist eine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber AC Kabelsystemen gegeben, wenn hohe Übertragungsleistungen nachgefragt werden. Wie die Balken F und G zeigen, führt der Einsatz von Tunneln bei GIL zu nicht unbeträchtlichen Mehrkosten. Da mit der Einbringung der 400- und 500-kV-GIL-Systeme bereits die Vorleistung für eine später nutzbare 800-kV-Spannungsebene erbracht wird, bietet die Flexibilität eines Tunnels keine größeren Vorteile. Die Balken F1 und G1 weisen auch hier die Kosten für die reine E-Technik aus.

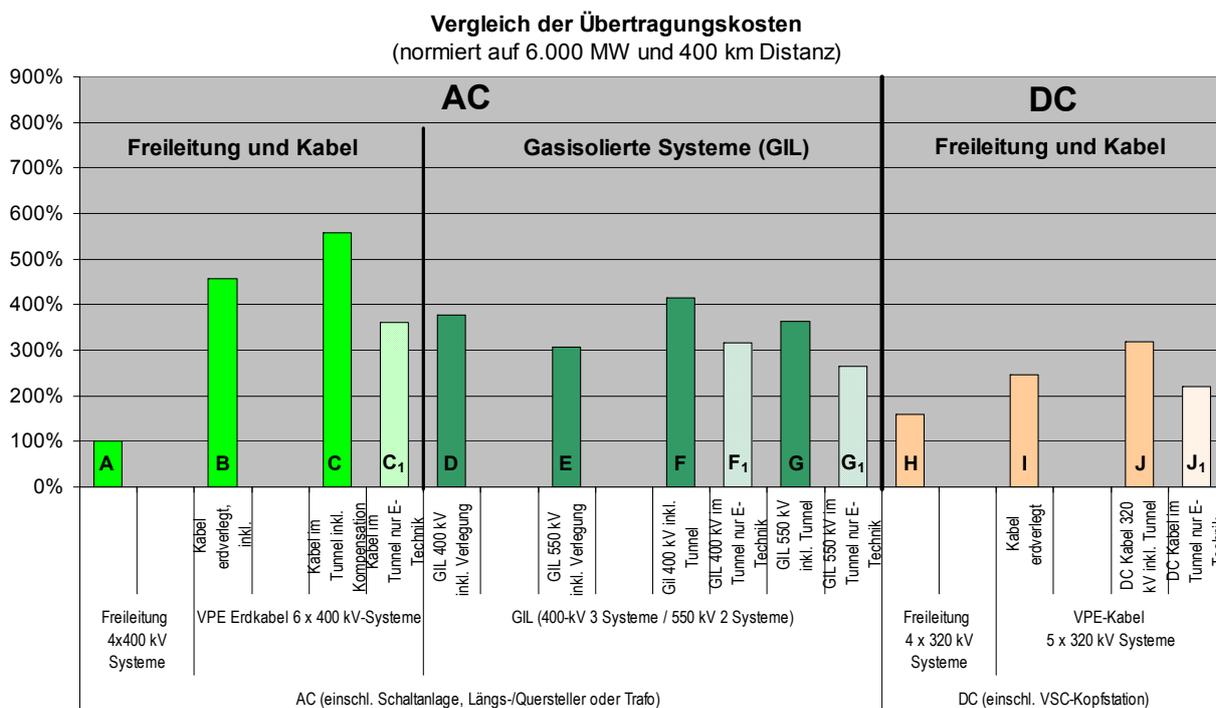


Abb. 14: Netzausbautechnologien – Vergleich der Übertragungstechnologien

Die Kosten der DC-Übertragungssysteme beschreiben die Balken H bis J. Wie bei AC-Systemen besitzen auch hier Freileitungssysteme Vorteile. Trotz geringerer Leitungskosten ist im Vergleich zu einer AC-Lösung jedoch von höheren Gesamtaufwendungen auszugehen. Sie resultieren aus den höheren Kosten der Umrichterstationen. Dies gilt trotz der bei AC unterstellten GIS-Schaltanlagen und zugehörigen Quer- und Längsreglern.

Die DC-Erdverkabelung (I) lässt im Vergleich zu einer AC Erdkabel-lösung (B) deutlich geringere Kosten erwarten. Neben geringeren Kabelkosten liegt dies u.a. in fehlenden Kompensationseinrichtungen sowie deutlich geringeren Tiefbaukosten begründet. Im Vergleich zum DC-Erdkabel ist bei einer Tunnellösung von um 50 % höheren Kosten auszugehen. Der Vergleich der Balken A und J1 zeigt aber, dass die Kosten für die reine E-Technik (ohne Tiefbaukosten) in einer Größenordnung liegen, die langfristig unter Berücksichtigung weiterer Kostensenkungspotenziale für die Wettbewerbsfähigkeit von DC-Kabelsystemen spricht. Dies setzt jedoch voraus, dass der Tunnel als Infrastrukturbeitrag von Dritten gestellt wird.

11.2 Qualitative Bewertung

Die quantitative Bewertung vernachlässigt langfristige Aspekte, die gerade beim Aufbau eines Overlays von Bedeutung sind. Hierzu zählen qualitative Kriterien, die auf Akzeptanz und Realisierungsfähigkeit eines Systems abheben. Folgende Aspekte sind relevant:

- **Platzbedarf:** Bei DC-Kabelsystemen, die in engem Verbund mit Infrastrukturen realisiert werden, sollten sich Vorteile ergeben. Der derzeit höhere Platzbedarf sollte sich langfristig durch Weiterentwicklung sowie Steigern der Bauhöhe reduzieren lassen.
- **Installations- sowie Reparatur- und Wartungsfreundlichkeit:** Aus der guten Zugänglichkeit von Tunneln resultieren Vorteile in Bezug auf Wartung und Reparatur. Inwieweit sich negative Effekte aus einer gegenseitigen Beeinflussung im Fehlerfall vermeiden lassen, ist noch zu prüfen.
- **Gesellschaftliche Akzeptanz:** Generell ist bei erdverlegten Lösungen von einer höheren Akzeptanz auszugehen. Durch die Kombination mit Infrastrukturen wird die Erschließung neuer Trassen vermieden, was die Akzeptanz zusätzlich erhöhen sollte.
- **Genehmigungsfähigkeit:** DC-Systeme weisen geringere elektromagnetische Felder auf, mit Vorteilen für die Genehmigungsfähigkeit. Da zudem die Bodenerwärmung im Vergleich zu AC-Kabeln geringer ist, sollte dies für DC-Kabelsysteme sprechen.
- **Entwicklungsstand:** AC-Systeme einschließlich GIL besitzen in Bezug auf den Entwicklungsstand Vorteile. Ein gestufter DC-Ausbau könnte diesen Nachteil jedoch relativieren. Dies setzt eine Struktur

voraus, die ein entsprechend flexibles Vorgehen ermöglicht. Dies spricht zu Gunsten von Tunnellösungen.

- **Potential Leistungssteigerung:** AC Systeme gelten als weit entwickelt. Entwicklungspotenziale betreffen damit vorrangig DC-Lösungen. Bis 2020 sollten VPE-Kabel mit 500 kV zur Verfügung stehen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass DC-VSC-Stationen in Bezug auf Kosten, Bauvolumen und Verluste weiter optimiert werden.
- **Innovationsfähigkeit:** Tunnelbasierte Lösungen erlauben ein flexibles Vorgehen. Die Versorgungsstruktur lässt sich damit an den technischen Entwicklungsstand anpassen. Ggf. ist sogar zu einem späteren Zeitpunkt der Umstieg auf eine andere Technologie denkbar. Dies spricht für einen hohen Innovationsgrad.
- **Kombination mit anderen Medien:** Die Schwierigkeit einer Trassenfindung gilt auch für andere Medien. Mit einer tunnelbasierten Lösung besteht die Möglichkeit, mehrere Infrastrukturen in einem System zu bündeln. Dies sollte die Akzeptanz steigern.
- **Auswirkung auf Volkswirtschaft:** Die Versorgung mit Energie ist Voraussetzung für die Entwicklung einer Volkswirtschaft. Systeme, die eine flexible Entwicklung ermöglichen und innovationsfähig sind, bieten damit klare Vorteile, trotz der in der Realisierungsphase höheren Kosten. Dies spricht für kanalbasierte Lösungen.

11.3 Schlussfolgerungen aus der Systembewertung

Die Ergebnisse bestätigen die Vorteile von AC-Freileitungen in Bezug auf Investitionen und Kosten. Inwieweit eine entsprechende Akzeptanz in der Bevölkerung zu gewinnen ist, gilt derzeit jedoch als unsicher. AC-Kabelsysteme sind in Bezug auf Investitionen und Kosten den anderen Systemen deutlich unterlegen. Sie sollten deshalb nur zum Tragen kommen, wenn andere Lösungen ausscheiden.

Erdverlegte GIL-Systeme stellen wegen ihrer hohen AC-Übertragungsleistungen eine interessante Option für ein Overlay-Netz dar. Die hohen Investitionen lassen aber erhebliche Anlaufkosten erwarten.

DC-Systeme sind derzeit wegen ihrer hohen Stationskosten benachteiligt. Dennoch weisen die Ergebnisse im Vergleich zu erdverlegten AC-Lösungen relativ günstige Gesamtkosten auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die verfügbare Technologie derzeit nur geringere Übertragungsleistungen zulässt. Zu einem späteren Zeitpunkt wird damit eine Ertüchtigung erforderlich.

Gegenüber erdverlegten DC-Kabelsystemen ist bei Tunnellösungen von erhöhten Aufwendungen auszugehen. Diese höheren Aufwendungen bieten aber einen hohen Flexibilitätsgrad, der bei zukünftigen Ertüchtigungsmaßnahmen zum Tragen kommen sollte.

12 Umsetzung

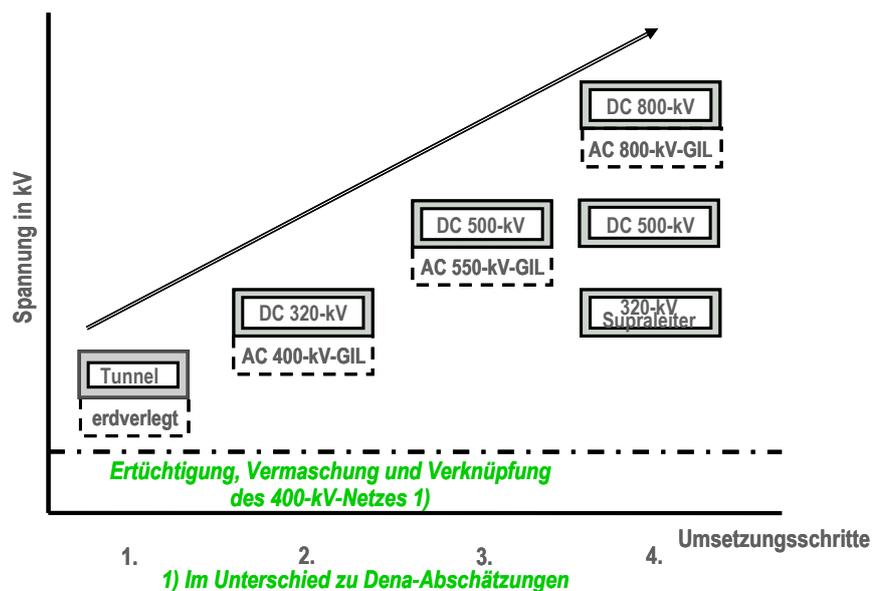
Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, stellt der Um- und Ausbau der Stromübertragungssysteme die Basis für einen großflächigen Energieaustausch und die nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien dar. Denkbar sind hierbei Umsetzungskonzepte mit Freileitungen, Kabeln oder GIL, wobei eine Kombination mit Infrastrukturen Vorteile bei der Umsetzung bietet.

Die Erfahrungen mit der kritischen Öffentlichkeit sprechen dafür, dass eine Umsetzung eine konzertierte Aktion von Bund, Ländern und Transportnetzbetreibern erfordert. Hierzu sind legislativ, administrativ und institutionell die entsprechenden Voraussetzungen zu schaffen. Die Finanzierung könnte im Rahmen einer gemischt staatlich-privaten Aktion erfolgen.

Für eine Umsetzung ist zu definieren, welche Leistung langfristig zu übertragen ist. In diesem Zusammenhang sind Spannungsebene (Wechsel- oder Gleichspannung), Technologie (Freileitung, Kabel oder GIL) sowie bautechnische Ausgestaltung (Mast, Erdverlegung oder Tunnel) festzulegen.

Abhängig von der gewählten Technologie ist für die Realisierung von der in Abb. 15 dargestellten Vorgehensweise auszugehen, wobei die Empfehlungen in der Netzstudie Dena II zu beachten sind. Das Umsetzungskonzept bietet in der ersten Phase noch alle Freiheiten. Mit der Entscheidung über die endgültige Konzeption sollte aber Kontinuität gewahrt bleiben, um die Vorteile der gewählten Lösung voll wirksam werden zu lassen:

Abb. 15: Umsetzungskonzept zum Aufbau eines Overlays



Folgende Schritte umfasst die Realisierungsphase:

1. Die Umsetzung beginnt mit einer Ertüchtigung, Vermaschung und Verknüpfung des bestehenden Übertragungsnetzes mittels Freileitungen, AC-Kabel oder GIL. Basis sind die Empfehlungen von Dena II. Ziel ist eine gezielte Verstärkung des Übertragungsnetzes und eine optimale Anpassung an das zu entwickelnde Overlay-Netz.
2. Parallel hierzu ist die zukünftige Konzeption festzulegen. Neben Freileitungen bei Nutzung der bestehenden Bahnstromnetze stehen als Technologievarianten erdverlegte AC-GIL- oder tunnelbasierte DC-Kabellösungen zur Diskussion.
3. Bei einer tunnelbasierten DC-Kabellösung könnte ein erster Umsetzungsschritt die Verbindung von Nord- und Westdeutschland darstellen. Für die Erstausrüstung käme die derzeit verfügbare +/-320-kV-DC-Technik mit VSC-Stationen zur Anwendung.
4. In einem zweiten Schritt könnte die Trasse mit +/-500-kV-DC-Kabelsystemen ertüchtigt werden. Bei einer Umsetzung mit GIL (400 kV AC) wäre für eine Spannungserhöhung lediglich eine Druckerhöhung und Verbesserung des Isoliergases erforderlich.
5. Eine weitere Erhöhung der Versorgungsspannung ist dann abhängig von der technischen Entwicklung. Sollte die Supraleitung für Transportaufgaben verfügbar sein, könnte sogar eine Reduzierung der Betriebsspannung sinnvoll sein.

13 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Integration erneuerbarer Energien den Netzausbau voraussetzt. Hiermit verbunden ist gleichzeitig eine Reduktion des sonst erforderlichen Energiespeicherungsbedarfs.

Die Ausführungen verdeutlichen, dass sich mit der Integration erneuerbarer Energien die Versorgungsaufgaben verändern. Neben der Einspeisung fluktuierender Energie fällt dem Transport von größeren Energiemengen über längere Distanzen eine große Bedeutung zu. Eine Voraussetzung für den Ausbau des Übertragungsnetzes ist die Akzeptanz durch die Bevölkerung. Die Kombination von elektrischen Versorgungssystemen mit anderen Infrastrukturen könnte hier einen positiven Beitrag leisten.

Die Umsetzung von Energieübertragungsprojekten ist als gesamtstaatliche ordnungspolitische Aufgabe (Governance) zu betrachten. Mit der Einbeziehung von Trassen des Bundes und der Länder zum Aufbau eines Overlay-Netzes könnte dies unterstrichen werden.

Neue Ansätze zur Realisierung von Übertragungssystemen bieten Chancen für Innovationen im Übertragungsnetzbereich und Möglichkeiten für Kostensenkungen. Darüber hinaus bieten Innovationen die Chance, um im Übertragungsnetzbereich die Technologieführerschaft zu erhalten und ausbauen.

Der Aufbau des Overlay-Netzes ist als Impuls für einen großflächigen europaweiten Netzausbau zu betrachten. Hiermit sollten Effizienz- und Beschäftigungseffekte verbunden sein.

14 Handlungsbedarf

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Kombination von Infrastrukturen mit elektrischen Energieversorgungssystemen technisch, ökonomisch und ökologisch realisierbar ist. Für eine erste Ausbaustufe sind die benötigten elektrischen Technologien teilweise schon verfügbar. Mit weiteren Entwicklungsschritten sollten auch höhere Übertragungsspannungen und -leistungen sowie sinkenden Kosten möglich werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung war eine möglichst lösungsoffene Beschreibung der Möglichkeiten. In einem nächsten Schritt wären folgende Handlungsschritte vorzusehen:

1. Abstimmung mit Ministerien und Ländern zur Modifizierung der Genehmigungsverfahren für Projekte von bundesweitem Interesse
2. Analyse geeigneter Bahntrassen zusammen mit der Deutschen Bahn AG
3. Identifizierung einer oder mehrerer Übertragungstrecken in Deutschland z.B. Nordsee nach Ruhrgebiet
4. Erstellen einer Machbarkeitsstudie für diese Übertragungstrecke einschließlich der Kostenermittlung
5. Identifizierung eines Overlay-Netzes für ganz Deutschland unter Berücksichtigung der Nachbarländer
6. Identifizierung und Bau einer Pilotstrecke als erstes Teilstück des Overlay-Netzes
7. Definition von Entwicklungsaktivitäten

VDE

**VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.**

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main

Telefon 069 6308-0
Telefax 069 6312925
<http://www.vde.com>
E-Mail service@vde.com

