

L. Jarass | G. M. Obermair

Welchen **Netzumbau** erfordert die **Energiewende?**



mit **Netzentwicklungsplan 2012**



MV-Verlag, Münster, 2012
280 S., 21 €
ISBN 978-3-86991-641-5

Welchen Netzbau erfordert die Energiewende?

unter Berücksichtigung des Netzentwicklungsplans 2012

Energiewende – eine Einführung.....	15
Teil I : Änderung der Stromversorgung durch die Energiewende	21
1 Struktur und Entwicklung der Stromversorgung.....	22
2 Erneuerbare Energieträger: räumliche und zeitliche Verteilung des Angebots	42
Teil II : Grundlagen des Netzbbaus	58
3 Zuverlässige Stromversorgung bei hohen Anteilen stark fluktuierender erneuerbarer Erzeugung.....	59
4 Repowering bestehender Leitungen	95
5 Leitungsneubau durch Erdkabel statt Freileitung	117
Teil III : Optimierung des Netzbbaus	138
6 Netzbau: nicht zu viel und nicht zu wenig.....	140
7 Maßnahmen zur Optimierung des Netzbbaus.....	163
Teil IV : Realisierung des Netzbbaus.....	196
8 Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz des Netzbbaus.....	197
9 Überschätzung des Übertragungsbedarfs führt zu falschen gesetzlichen Vorgaben	218
10 Netzentwicklungsplan 2012.....	237

Gliederung

Überblick.....	5
Energiewende – eine Einführung.....	15
Teil I : Änderung der Stromversorgung durch die Energiewende	21
1 Struktur und Entwicklung der Stromversorgung.....	22
1.1 Umbau des Stromversorgungssystems für die Energiewende erforderlich	22
1.1.1 Die zukünftige Stromversorgung bestimmt den erforderlichen Netzbau	22
1.1.2 Entwicklungspfade für die zukünftige Stromerzeugung in Deutschland	24
1.2 Installierte Leistung und Stromerzeugung.....	26
1.2.1 Installierte Leistung in 2010 und Prognosen für 2020 bis 2050	26
1.2.2 Stromerzeugung in 2010 und Prognosen für 2020 bis 2050	29
1.2.3 Volllaststunden der Kraftwerke in 2010 und Prognosen für 2020 bis 2050	32
1.2.4 Pumpspeicherkraftwerke.....	34
1.3 Energiepreisentwicklung	36
1.3.1 Energiepreise in der OECD 1978-2011.....	38
1.3.2 Energiepreise in Deutschland 1981-2011	40
2 Erneuerbare Energieträger: räumliche und zeitliche Verteilung des Angebots	42
2.1 Windenergie	43
2.1.1 Reguläre und chaotische Strömung	44
2.1.2 Mittelfristig kaum prognostizierbare Windschwankungen und Aussetzer	47
2.2 Sonnenenergie	52
2.2.1 Nutzungsformen der Sonnenenergie.....	52
2.2.2 Photovoltaik.....	53
2.3 Strom aus Biomasse, Wasserkraft und EE-Gas	57

Teil II : Grundlagen des Netzbbaus	58
3 Zuverlässige Stromversorgung bei hohen Anteilen stark fluktuierender erneuerbarer Erzeugung	59
3.1 Technische Grundbegriffe der elektrischen Energieversorgung	59
3.1.1 Leistung und Energie	59
3.1.2 Strom	61
3.1.3 Stromübertragung	64
3.1.4 Vernetzung aller Stromerzeuger und Stromverbraucher	67
3.2 Gesetzliches Grundprinzip: Jederzeitige Deckung der Stromnachfrage	70
3.2.1 Versorgung von Stromverbrauchern	70
3.2.2 Übertragung von erneuerbaren Energien: modifiziertes (n-1)-Kriterium	73
3.3 Starke Schwankungen von Stromangebot und Stromnachfrage	76
3.3.1 Tages- und Jahresgang der Stromnachfrage	76
3.3.2 Erneuerbare Stromproduktion immer häufiger höher als momentane Stromnachfrage	77
3.4 Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage	80
3.4.1 Ausgleich durch Netzbau	81
3.4.2 Ausgleich durch Erzeugungsmanagement	82
3.4.3 Ausgleich durch Lastmanagement	86
3.4.4 Ausgleich durch Energiespeicher	90
3.4.5 Beispiel: Ausgleich von Windenergieschwankungen	93
4 Repowering bestehender Leitungen	95
4.1 Netzoptimierung durch Leiterseiltemperaturmonitoring	95
4.1.1 Erhöhung der Übertragungsleistung durch Leiterseiltemperaturmonitoring	96
4.1.2 Leiterseiltemperaturmonitoring ist Stand der Technik	99
4.1.3 Auslastungsmonitoring und Leiterseiltemperaturmonitoring ergänzen sich vorzüglich	99
4.2 Netzverstärkung durch Hochtemperaturleiterseile	100
4.2.1 Gesicherte Erhöhung der Übertragungsleistung durch Hochtemperaturleiterseile	100
4.2.2 Hochtemperaturleiterseile (bis 150°C) sind Stand der Technik	101
4.3 Kombination aus Leiterseiltemperaturmonitoring und Hochtemperaturleiterseilen	104
4.3.1 Großes Potenzial von Leiterseiltemperaturmonitoring und Hochtemperaturleiterseilen	104
4.3.2 Netzoptimierung und Netzverstärkung deutlich billiger als Leitungsneubau	106

4.3.3	Netzoptimierung und Netzverstärkung bestehender Leitungen vor Leitungsneubau gesetzlich geboten	107
4.4	Grenzbedingungen beim Netzbau	108
4.4.1	Thermische Grenzleistung	109
4.4.2	Dynamische Netzstabilität und System-Grenzleistung	111
4.4.3	Optimierung und Flexibilisierung des bestehenden Drehstromnetzes.....	113
5	Leitungsneubau durch Erdkabel statt Freileitung	117
5.1	Einsatzmöglichkeiten von Erdkabeln	117
5.1.1	Naturnotwendig gegebene Grenze für Drehstromverkabelung: Blindstrom	117
5.1.2	Verkabelung von Nieder-, Mittel- und Hochspannungsleitungen (bis 110 kV).....	118
5.1.3	Verkabelung von Höchstspannungsleitungen (220/380 kV).....	120
5.1.4	Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ).....	122
5.2	Versorgungssicherheit von Erdkabeln	124
5.2.1	Fehlerraten und Ausfalldauern pro Fehler.....	124
5.2.2	Ausfalldauern von Erdkabeln und Freileitungen pro Jahr.....	127
5.3	Kosten einer Verkabelung von Hoch- und Höchstspannungsleitungen.....	130
5.3.1	Einzel- versus gesamtwirtschaftliche Kosten	130
5.3.2	Einzelwirtschaftliche Kosten von 110kV-Erdkabeln optimieren	133
5.3.3	Investitionskosten von Freileitung, Teilverkabelung und HGÜ-Vollverkabelung – Beispiel für 380 kV.....	134
Teil III	: Optimierung des Netzbaus	138
6	Netzbau: nicht zu viel und nicht zu wenig.....	140
6.1	Netzbau muss wirtschaftlich zumutbar sein	140
6.1.1	Beschränkung des Netzbaus und damit der maximalen Stromeinspeisung gesetzlich geboten	140
6.1.2	Volle Zustimmung bei der Bundesnetzagentur für eine Begrenzung des Netzbaus	141
6.2	Objektive Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzbaus	143
6.2.1	Wirtschaftlich zumutbar ist das volkswirtschaftliche Optimum.....	143
6.2.2	Bestimmung des optimalen Netzbaus am Beispiel der Windenergie	147
6.3	Optimierung und Netzbauplanung	153
6.3.1	Beschränkung von Einspeisungsspitzen auch bei optimiertem Netz erforderlich.....	153
6.3.2	Fallbeispiele	157

7	Maßnahmen zur Optimierung des Netzbbaus	163
7.1	Maßnahmen zur Verringerung des notwendigen Übertragungsbedarfs	163
7.1.1	Erhöhung der Energieeffizienz.....	163
7.1.2	Kein Netzbau für kurzzeitige Einspeisespitzen	164
7.1.3	Stromnachfrage und Stromangebot besser aufeinander abstimmen	167
7.1.4	Optimierung des Zubaus von konventionellen Reservekraftwerken	171
7.2	Optimierung und Verstärkung des bestehenden Netzes	177
7.2.1	Optimierung und Verstärkung des bestehenden Netzes besonders gut geeignet für erneuerbare Energien.....	177
7.2.2	Netzrepowering erleichtert Kernkraftwerksausstieg	178
7.2.3	Klärung von Unklarheiten beim Einsatz von Netzoptimierung und Netzverstärkung erforderlich	181
7.3	Bedeutung von Energiespeichern	182
7.3.1	Pumpspeicherkraftwerke	182
7.3.2	Zukünftige Speichertechnologien.....	185
7.4	Leitungsneubau als HGÜ-Overlaynetz.....	185
7.4.1	Overlaynetz erforderlich	186
7.4.2	HGÜ-Leitungen erhöhen die Netzstabilität.....	188
7.4.3	HGÜ-Overlaynetz schrittweise realisieren	190
7.4.4	Europäisches Offshore-Supergrid.....	193
Teil IV : Realisierung des Netzbbaus.....		196
8	Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz des Netzbbaus	197
8.1	Leitungsneubau für erneuerbare Energien wird eher akzeptiert.....	198
8.1.1	Leitungsneubau für konventionelle Kraftwerke konterkariert die Energiewende	198
8.1.2	Verbrauchsvorrang für erneuerbare Energien wieder einführen	200
8.1.3	Leitungsneubau für internationalen Handel von konventioneller Energie widerspricht den Zielen des EEG	201
8.1.4	Fazit.....	203
8.2	Transparenz beschleunigt den Netzbau	204
8.2.1	Öffentlichkeit der Verfahren ist Grundvoraussetzung für Bürgerbeteiligung.....	205
8.2.2	Lastflussanalysen sind zwingend erforderlich	206
8.3	Verkabelung erleichtert und beschleunigt den Leitungsneubau	207
8.3.1	Erdkabel deutlich schneller umsetzbar als Freileitungen	208
8.3.2	Neubau von 110kV-Leitungen seit 2011 als Erdkabel vorgeschrieben	209
8.3.3	Meist keine Beantragung von 380kV-Erdkabelösungen durch den Vorhabenträger	210

8.4	Angemessener Ausgleich der Vorteile und der Lasten des Netzbbaus.....	214
8.4.1	Vorschläge für eine angemessene Kostenüberwälzung.....	214
8.4.2	Kompensationsmöglichkeiten.....	216
9	Überschätzung des Übertragungsbedarfs führt zu falschen gesetzlichen Vorgaben.....	218
9.1	Systematische Überschätzung des Leitungsneubaubedarfs durch Dena-Netzstudien und Übertragungsnetzbetreiber	218
9.1.1	Dena-Netzstudie-I lässt kostengünstige Alternativen ganz unberücksichtigt.....	218
9.1.2	Dena-Netzstudie-II: Annahmen rechtswidrig, Ergebnisse sachwidrig	219
9.1.3	Netzauslastungsmodell der Übertragungsnetzbetreiber ohne belastbare Aussagen.....	220
9.1.4	Fazit	221
9.2	Rechtliche Vorgaben für den Netzbau	222
9.2.1	Europarechtlicher Rahmen zum Netzbau.....	222
9.2.2	Energieleitungsausbaugesetz vom 21. August 2009.....	225
9.2.3	Netzausbaubeschleunigungsgesetz vom 05. August 2011	233
10	Netzentwicklungsplan 2012.....	237
10.1	Inhalt des Entwurfs des Netzentwicklungsplans	239
10.1.1	Netzmaßnahmen Startnetz: 2.000 km Leitungsneubauten	239
10.1.2	Netzmaßnahmen Leitszenario: weitere 4.600 km Leitungsneubauten	241
10.2	Bewertung des Entwurfs des Netzentwicklungsplans.....	244
10.2.1	Erhebliche Fehleinschätzungen und methodische Fehler	244
10.2.2	Zusammenfassung.....	250
	Quellen	251
	Stichwortverzeichnis.....	270

Liste der Abbildungen

Abb. 1.1 :	Entwicklungspfade für die zukünftige Stromerzeugung in Deutschland	24
Abb. 1.2 :	Installierte Leistung und Stromerzeugung, Deutschland 2010-2050	31
Abb. 1.3 :	Pumpspeicherkraftwerke, Deutschland 2012	34
Abb. 1.4 :	Rohölpreise 1973-2011	37
Abb. 1.5 :	Energiepreise für Haushalte und für Industrie, OECD 1978-2011.....	38
Abb. 1.6 :	Strompreise für Haushalte und für Industrie, OECD 1978-2011	39
Abb. 1.7 :	Energiepreise für Haushalte und für Industrie, Deutschland 1981-2011	40
Abb. 1.8 :	Strompreise für Haushalte und für Industrie, Deutschland 1983-2012.....	41

Abb. 2.1 : Zeitlicher Verlauf der Leistung einer Einzelanlage und einer Windparkgruppe an der Küste an 10 Starkwindtagen	48
Abb. 2.2 : Jährliche Windstromeinspeisung, Deutschland 1993-2011	48
Abb. 2.3 : Monatliche Windenergieerzeugung, Deutschland 2010-2011.....	49
Abb. 2.4 : EEG-Windstromeinspeisung, Deutschland 12/2009	50
Abb. 2.5 : Windenergieerzeugung, Deutschland 4/2011	50
Abb. 2.6 : Windenergieeinspeisung, Deutschland 1/2012	51
Abb. 2.7 : Photoelektrischer Effekt	54
Abb. 2.8 : Photovoltaikeinspeisung, Deutschland 1/2012	55
Abb. 3.1 : Zeitverlauf der Spannung von Generatoren	62
Abb. 3.2 : Skizze eines Drehstromgenerators	63
Abb. 3.3 : Übertragung von Windenergie über Mittel- und Hochspannungsnetz zum Höchstspannungsnetz.....	66
Abb. 3.4 : Deutsches Höchstspannungsnetz 2012.....	69
Abb. 3.5 : Versorgungssicherheit: Beispiel Stromnetz in Thüringen.....	72
Abb. 3.6 : Spannungsebenen für die Windstromeinspeisung.....	74
Abb. 3.7 : Tages- und Jahresgang der Stromnachfrage – Schema	77
Abb. 3.8 : EEG-Einspeisung und Stromnachfrage, Ostdeutschland 12/2011	78
Abb. 3.9 : Installierte Leistung versus Minimal- und Maximalnachfrage, Deutschland 2010-2050.....	79
Abb. 3.10 : Prognose der verfügbaren Leistung aus erneuerbaren Energien für 2 Wochen in 2020.....	80
Abb. 3.11 : Potenzial des Lastmanagements.....	88
Abb. 3.12 : Vergleichmäßigung der Erzeugung durch Pumpspeicherkraftwerke, Deutschland 2020	91
Abb. 4.1 : Leiterseiltemperatur in Abhängigkeit von Wetterbedingungen und Strombelastung.....	96
Abb. 4.2 : Erhöhung der Übertragungsleistung durch Leiterseiltemperaturmonitoring – Schema.....	98
Abb. 5.1 : Erhöhung der Übertragungsleistung von VPE-Kabeln 1997-2009.....	123
Abb. 6.1a : Nutzen, Kosten und Nettoertrag in Abhängigkeit vom Netzausbaugrad	146
Abb. 6.1b : Grenznutzen und Grenzkosten in Abhängigkeit vom Netzausbaugrad	146
Abb. 6.2 : Erstellung einer Grenznutzen-Kurve aus der Dauer-Leistung-Kurve – Schema	149
Abb. 6.4 : Optimierte Netzbeschränkung bewirkt sehr geringe Energieaussperrung	154
Abb. 6.3 : Durch Einspeisemanagement 'ausgesperrte' Windenergie.....	156
Abb. 6.5 : Optimierung des 110kV-Netzanschlusses eines Windparks	158
Abb. 6.6 : Optimierung der HGÜ-Offshore-Netzanschlüsse	160
Abb. 6.7 : Optimierung der 380kV-Fernübertragung von Windenergie	161
Abb. 7.1 : Virtuelles Stromversorgungssystem – Schema.....	170
Abb. 7.2 : Regionale Stromungleichgewichte in 2020	171
Abb. 7.4 : Kernkraftwerke in Deutschland	180
Abb. 7.5 : Vorschlag für ein Overlaynetz in Deutschland	192
Abb. 7.6 : Europäisches Offshore-Supergrid – voller Ausbau	194

Abb. 8.1 : Haupttreiber für Leitungsneubau in Europa.....	202
Abb. 8.2 : Geplante 380kV-Teilverkabelung Wilhelmshaven-Conneforde	212
Abb. 9.1 : Netzneubauprojekte gemäß Energieleitungsausbaugesetz	227
Abb. 9.2 : Lage der Leitungsvorhaben gemäß Energieleitungsausbaugesetz.....	231
Abb. 10.1 : Schritte zur Erstellung des Netzentwicklungsplans 2012.....	238
Abb. 10.2 : Netzmaßnahmen für das Startnetz	240
Abb. 10.3 : Netzmaßnahmen gemäß Leitszenario B2022.....	243

Liste der Tabellen

Tab. 1.1 : Installierte Leistung, Deutschland 2010-2050	27
Tab. 1.2 : Installierte Leistung der erneuerbaren Energieträger, Deutschland 2010-2050	28
Tab. 1.3 : Stromerzeugung, Deutschland 2010-2050.....	29
Tab. 1.4 : Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, Deutschland 2010-2050	30
Tab. 1.5 : Volllaststunden von erneuerbaren, fossilen und Kernkraftwerken, Deutschland 2010-2050	32
Tab. 1.6 : Volllaststunden der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, Deutschland 2010-2050	33
Tab. 1.7 : Pumpspeicherkraftwerke, Deutschland 2012	35
Tab. 1.8 : Pumpspeicherkraftwerke, einsetzbar für das deutsche Übertragungsnetz, 2012 und 2020	36
Tab. 3.1 : Installierte Leistung von Wind- und Photovoltaikkraftwerken bezogen auf die Stromnachfrage	78
Tab. 3.2 : Flexibilität der verschiedenen Kraftwerksarten.....	84
Tab. 3.3 : Höchstlast versus gesicherte Leistung, Deutschland 2010-2050	86
Tab. 4.1: Thermische Grenzleistungen von Freileitungen und Erdkabeln	110
Tab. 5.1 : Fehlerraten von Hoch- und Höchstspannungskabeln.....	125
Tab. 5.2 : Fehler von Höchstspannungskabeln für unterschiedliche Leitungslängen	126
Tab. 5.3 : Ausfalldauern von Höchstspannungskabeln für unterschiedliche Leitungslängen	129
Tab. 5.4 : Investitionskosten von Erdkabeln versus Freileitung.....	136
Tab. 6.1 : Einzelwirtschaftliche Kosten des Netzanschlusses von Windkraftwerken.....	151
Tab. 7.1 : Konventionelle Kraftwerke in Bau, Deutschland 2012.....	173
Tab. 7.2 : Konventionelle Kraftwerke in Planung, Deutschland 2012	174
Tab. 7.3 : Außerbetriebnahmen der Kernkraftwerke gemäß Atomgesetz 2011 versus Atomgesetz 2002	179
Tab. 9.1 : Rechtsvorschriften zu Stromnetzen.....	223
Tab. 9.2 : Stand der Leitungsvorhaben gemäß Energieleitungsausbaugesetz	232
Tab. 10.1 : Installierte Kraftwerksleistungen, Leitszenario	242

Liste der Kästen

Kasten 2.1 : Mathematische Beschreibung der Strömungen in einem rotierenden Bezugssystem.....	45
Kasten 2.2 : Klimamodelle und Chaostheorie.....	46
Kasten 2.3 : Photoelektrischer Effekt.....	53
Kasten 3.1 : Beispiel zur versorgungssicheren Einbindung von Windenergie	75
Kasten 3.2 : Schwankungen des natürlichen Windenergieangebots und Maßnahmen zum Ausgleich	94
Kasten 4.1 : Dynamische Netzstabilität und System-Grenzleistung	111
Kasten 6.1 : Bestimmung des volkswirtschaftlichen Nettoertrags des Netzbbaus.....	146
Kasten 6.2 : Energetischer und monetärer Grenznutzen von Windenergieeinspeisung	148
Kasten 6.3 : Energieeinbuße durch Optimierung der Netzbeschränkung	154