

Offshore Windparks als Stromlieferant zur Wasserstoffherzeugung – Szenarienbetrachtung unter ökologischen Gesichtspunkten

Thomas Smolka, Stefan Federlein, Uwe Macharey

Institut für Hochspannungstechnik
RWTH Aachen
Schinkelstrasse 2
52062 Aachen
Tel.: +49-241-8090013
E-Mail: smolka@ifht.rwth-aachen.de

Am meisten verbreitet ist die Nutzung der Windenergie über die Einspeisung der elektrischen Energie in das bestehende Übertragungsnetz. Die Netzanbindung der offshore Windparks stellt die Netzbetreiber vor eine besondere Herausforderung, denn die transformierte Windenergie befindet sich in der Nord- und Ostsee, jedoch wird sie in den Ballungsgebieten hunderte Kilometer südlich benötigt. Beim Anschluss von offshore Windparks großer Leistung muss auf eine netzverträgliche Anschlusstechnik geachtet werden, so dass es nicht zu großräumigen Netzstörungen kommt. Insbesondere darf es bei kraftwerksnahen 3-poligen Kurzschlüssen bei Fehlerklärungszeiten bis zu 150 ms im gesamten Betriebsbereich nicht zum Trennen der Erzeugungseinheiten vom Netz kommen. Die Wahl der Anschlusstechnik darf nicht zu unzulässigen Rückwirkungen auf die Netzspannung führen.

Eine andere Möglichkeit der Windenergienutzung, ohne Integration in das bestehende Übertragungsnetz, ist die Nutzung von Windenergie zur Wasserstoffherzeugung. Schon seit Ende des 19. Jahrhunderts sind zahlreiche Konzepte einer „Wasserstoffwirtschaft“ entworfen worden. Bei vielen dieser Vorschläge entstand jedoch der Eindruck, dass Wasserstoff (H_2) die perfekte Alternative, sowohl für die Versorgungsengpässe der Energieversorgung, als auch für die Entsorgungsengpässe sei und man zahlreiche Zwischenschritte und Entwicklungsstufen einer sich ändernden Energiewirtschaft überspringen kann. In den meisten aktuellen Untersuchungen wird jedoch eine sehr differenzierte, sich über Jahrzehnte erstreckende Entwicklung vorausgesetzt, damit der Einstieg in eine umfangreiche Wasserstoffwirtschaft sinnvoll ist.

Der Beitrag befasst sich mit einer Szenarienbetrachtung zur ökoeffizienten Nutzung der Windenergie auf See. Hier bedeutet Ökoeffizienz, die Einhaltung optimaler ökologisch-ökonomischer Rahmenbedingungen unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit. Anhand eines Referenzwindparks auf Basis der DENA Netzstudie, werden verschiedene Szenarien zur Wasserstoffherzeugung aus Windenergie analysiert. Die offshore Wasserstoffherzeugung wird dabei der onshore Erzeugung gegenübergestellt und ganzheitlich bewertet. Neben der Analyse technischer Parameter, wie Wirkungsgrad und Volllaststundenzahl der Windenergie, werden die unterschiedlichen Szenarien auch einer kompletten Ökobilanz unterzogen, um die ökologischen Auswirkungen der Szenarien zu vergleichen. Die Kosten der Szenarien werden ebenfalls abgeschätzt, was allerdings auf Grund einiger noch nicht auf dem Markt befindlicher Betriebsmittel (Elektrolyse- und Umkehrosmoseanlagen in der benötigten Größenordnung etc.) nur qualitativ möglich ist.

Ökologisch-ökonomische Bewertung verschiedener Konzepte für die Leistungsübertragung von Offshore- Windparks in Ballungsgebiete



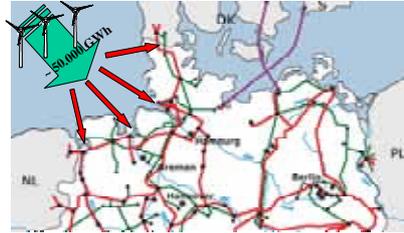
Dipl.-Ing Stefan Federlein
Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Gliederung

- Einleitung und Ziel
- Szenarien der dena-Studie
- Vorstellung der H₂-Szenarien und des Referenzwindparks
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung

- Ausbaupotential an Land (onshore) ist überwiegend erschöpft
→ Herausforderung für den Ausbau auf See (offshore)
- Strategie der Bundesregierung für instal. Leistung offshore:
Bis 2010 → 2-3 GW
Bis 2030 → 20-25 GW
- **Konsens:**
Windkraft soll genutzt werden → effizienteste Möglichkeit bleibt umstritten



Mögliche Alternativen:

- direkte Einspeisung in das bestehende Energieversorgungsnetz
- Umwandlung der Windenergie in andere Energieformen (z.B. H₂)

Zielsetzung

→ Gewinnung neuer Erkenntnisse zur ökoeffizienten Nutzung der Windenergie auf See

Ökoeffizienz?

→ Einhaltung optimaler ökologisch-ökonomischer Rahmenbedingungen unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit.

Schwerpunkt:

→ Simulation verschiedener Szenarien zur Wasserstoffherzeugung aus Windenergie in Offshore-Windparks (OWPs)

dena-Studie: Energieübertragung von OWPs

4 Übertragungstechniken

- Hochspannungs-Drehstromübertragung (HVAC-Kabel)
- Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HVDC-Kabel)
 - Konventionelle Thyristortechnik
 - Moderne Transistortechnik mit Isolierschicht-Bipolartransistor (IGBT oder VSC „Voltage Source Converter“)
 - > HVDC Light® (ABB)
 - > HVDC Plus® (Siemens)
- GIL-Übertragungssysteme (Siemens)
- Supraleitende Kabel (Nexans)



Welche Lösung besitzt die höchste Ökoeffizienz?

dena-Studie: Ausgewählte Szenarien

Anbindung von OWPs

OWPs 2010	Leistung	Einspeise-Spg.	See-kabel	Land-kabel	GIL	Frei-leitung	Nenn-spg.	Anz. Systeme	Mio €
	MW	kV	km	km	km	km	kV		
N-OWP-C	500	380	200	0	0	0	220	2	340
N-OWP-G	252	380	64	15	0	0	150	1	89
O-OWP-J	385	380	122	11	0	0	150	2	180
N-OWP-H	1378	380	100*	0	15	80	200-400	6 + 1xGIL + 1xFL	1743

Netzausbau

Zeithorizont	2010			2015
Strecke Neubau	Hamburg/Nord – Dollern	Neuenhagen – Bertikow/Vierraden	Viesselbach – Altenfeld	Diele-Niederrhein
380 kV Doppelleitung (2200 MVA pro Stromkreis)	45 km	110 km	80 km	200 km
Kosten	42 Mio €	109 Mio €	87 Mio €	148 Mio €

H₂-Szenarien / Referenzwindpark

4 Szenarien zur Wasserstoffherzeugung:

offshore

- GH₂-Pipeline
- LH₂-Schifftransport

onshore

- H₂-Onshore AC
- H₂-Onshore DC

Referenzwindpark:

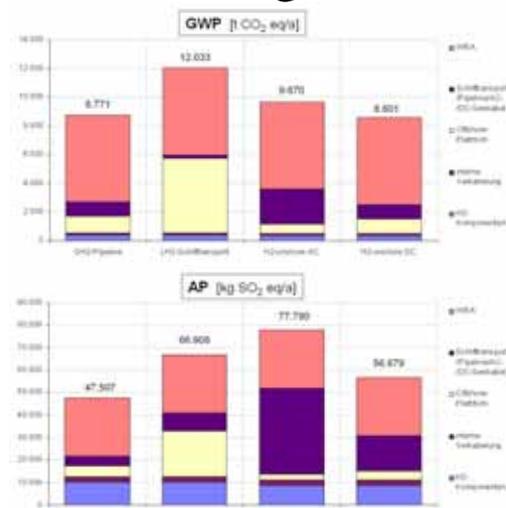
- Leistung: 160 MW
- Entfernung: 250 km
- Volllaststunden: 3800 h/a



Ökologische Untersuchungen

Die Szenarien im Vergleich

- GH₂-Pipeline
→ Auswirkungen der Pipeline gering
→ geringstes AP
- LH₂-Schifftransport
→ größtes GWP wegen Offshore-Plattform
→ Schiffsemissionen bei GWP vernachlässigbar
- H₂-Onshore AC
→ kleinste Plattform
→ größtes AP wegen Seekabel
- H₂-Onshore DC
→ geringstes GWP
→ AP größer wegen Seekabel



Ökologische Untersuchungen

Reihenfolge der geringsten absoluten Treibhauspotentiale

1. DC-
2. Pipeline-
3. AC-
4. Schiff-Szenario

Sensitive Parameter

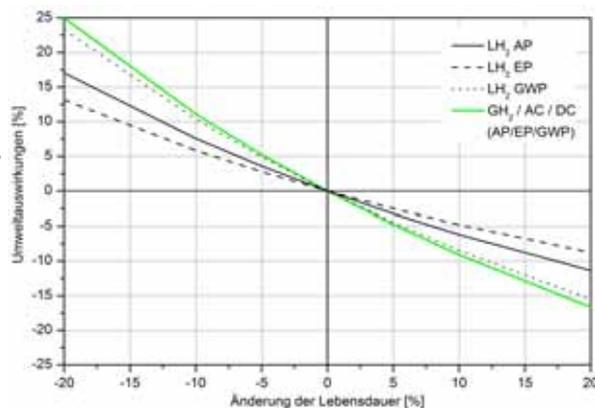
- Lebensdauer der Komponenten
- Entfernung offshore
- Wirkungsgrad → Technische Analyse

Ökologische Untersuchungen

Einfluss der Lebensdauer

Ergebnis → $1/x$ -Funktion:

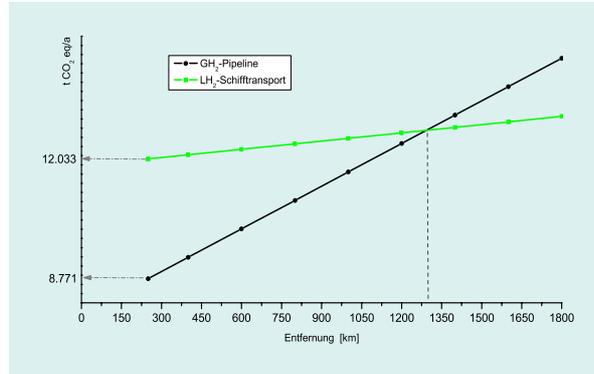
- Verlängerung der LD um 20%
→ Reduzierung der Umweltauswirkungen um 16%
- Verkürzung der LD um 20%
→ Erhöhung der Umweltauswirkungen um 25%



Ökologische Untersuchungen

Ecological break even distance (Pipeline – Schifftransport)

GWP



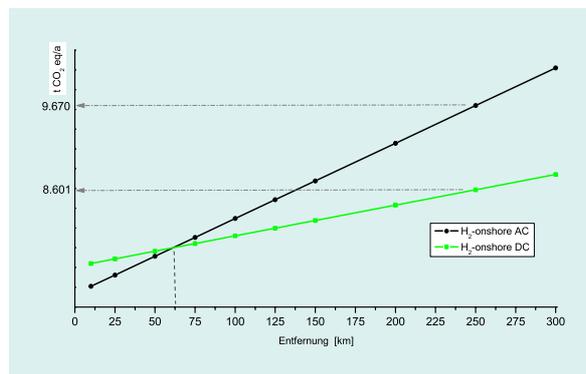
Vergleich der CO₂-Emissionen von Schiff- und Pipeline-Szenario:

- Größe der Plattform und Pipeline sind entscheidend
- Schnittpunkt: 1300 km

Ökologische Untersuchungen

Ecological break even distance (AC – DC)

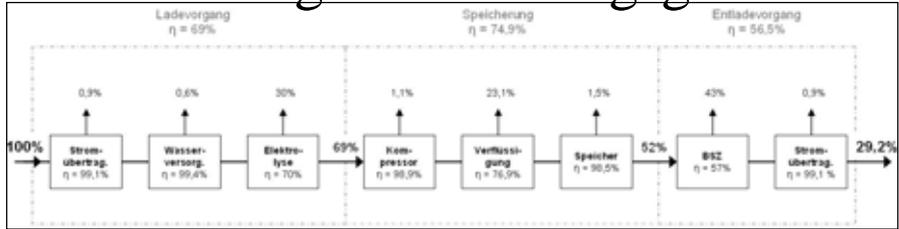
GWP



Vergleich der CO₂-Emissionen von AC- und DC-Szenario:

- Seekabel (Aderzahl und Querschnitt) sind entscheidend
- Schnittpunkt: 63 km

Betrachtung der Wirkungsgrade



(Energiefluss für GH₂-Pipeline)

H ₂ -Szenario	η _{Ladevorgang}	Wirkungsgrade [%]			
		η _{Speicherung}		η _{gesamt}	
		mit	ohne	mit	ohne
		Verflüssigung			
GH ₂ -Pipeline	69,0	74,9	97,4	52,0	67,1
LH ₂ -Schifftransport	69,0	75,7	X	52,2	X
H ₂ -Onshore AC	51,1	75,7	98,5	38,6	50,2
H ₂ -Onshore DC	63,1	75,7	98,5	47,8	62,2
Mittelwert der Szenarien				47,7	

Reihenfolge unter rein technischen Bedingungen

1. Schiff-
2. Pipeline-
3. DC-
4. AC-Szenario



Betrachtung der Wirkungsgrade

Einfluss von Wirkungsgrad auf Wirkungspotential

$$f(\eta) = \frac{\text{Gesamtauswirkung [kg CO}_2\text{-Äquiv./a]}}{\text{Volllaststunden [h/a] \cdot installierte Leistung [MW] \cdot \eta[\%]} } \Rightarrow \left[\frac{\text{g CO}_2\text{-Äquiv.}}{\text{kWh}} \right]$$

Umweltbelastung	GWP	AP	EP
	[g CO ₂ -Äquiv. kWh]	[mg SO ₂ -Äquiv. kWh]	[mg PO ₄ -Äquiv. kWh]
Stromkohlekraftwerk	900	500	70
Atomkraftwerk	20	20	5
GH ₂ -Pipeline	27,1	149	7,8
LH ₂ -Schifftransport	37,7	214	12,3
H ₂ -Onshore AC	41,0	330	13,0
H ₂ -Onshore DC	29,5	196	8,7
Mittelwerte der H ₂ -Szenarien	33,8	222	10,5

Reihenfolge mit geringsten spezifischen Umweltauswirkungen

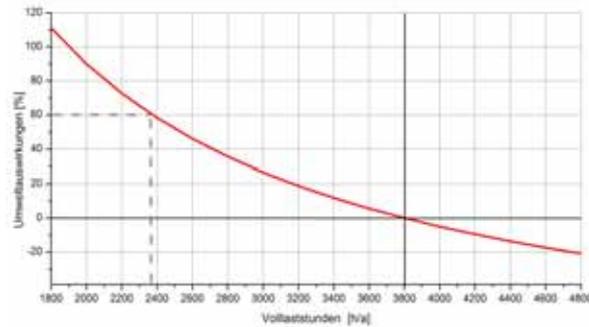
1. Pipeline-
2. DC-
3. Schiff-
4. AC-Szenario



Kritische Analyse

Einfluss der Volllaststunden auf spez. Umweltauswirkungen

Prognostizierte Volllaststunden: 3600 – 4000 h/a
 Tatsächliche Volllaststunden in Mittelgrunden (Horns Rev): 2365 h/a

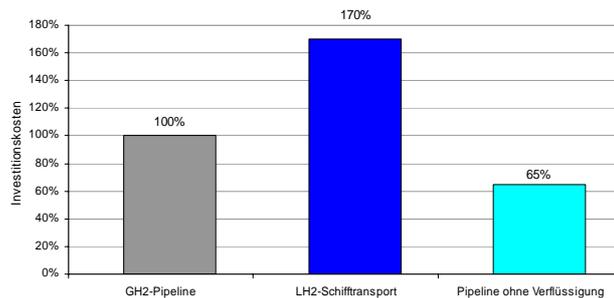


2. Ökobilanzwerkstatt Juni 2006



Ökonomische Aspekte

Kostenvergleich von Pipeline- und Schiff-Szenario



Weitere offene Fragen des Schiff-Szenarios:

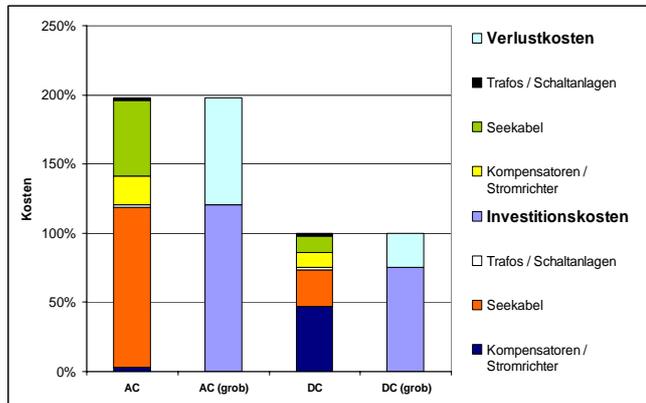
- Verladung der Kryotanks offshore → Seegang
- Existierende Vorschriften für Container-Terminal → nur wenige LH₂-Tanks

2. Ökobilanzwerkstatt Juni 2006



Ökonomische Aspekte

Kostenvergleich von AC und DC bei 250 km



Zusammenfassung

Ergebnisse der Szenarien zur Wasserstoff-Erzeugung in Offshore-Windparks unter ökoeffizienten Bedingungen

Ergebnisse der ökologisch-technischen Untersuchung:

		Kosten:
1. GH ₂ -Pipeline	(27 g CO ₂ /kWh)	+
2. H ₂ - Onshore DC	(30 g CO ₂ /kWh)	++
3. LH ₂ -Schifftransport	(37 g CO ₂ /kWh)	+++++
4. H ₂ -Onshore AC	(41 g CO ₂ /kWh)	++++

Einfluss der Lebensdauer

→ Bei Verkürzung der LD steigen Umweltauswirkungen stark an

Entfernung auf See

→ entscheidend für ökoeffizientes Wasserstoff-Szenario („Reihenfolge“)

Anzahl der Volllaststunden

→ großer Einfluss auf spezifische Umweltauswirkungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ausblick

Wasserstoff-Thematik:

- Verifizierung der Daten
- Genauere Ermittlung der Kosten
- Definition neuer Szenarien

Analyse der dena-Netzstudie:

- Gegenüberstellung der Übertragungstechniken unter ökoeffizienten Gesichtspunkten
- Aufstellung eines Gesamtkonzepts zur Netzanbindung der Windenergie

(Vergleich der entstehenden Umweltauswirkungen mit Windenergie gegenüber denen des vorhandenen Kraftwerkparcs etc.)

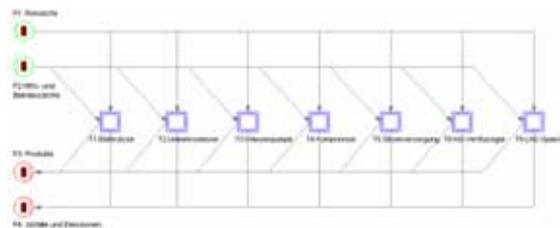
BACK UP

Ökologische Untersuchungen

Untersuchungsrahmen:

Gesamte Wasserstoffsystem inkl. WEA, Offshore-Plattform und Übertragungstechnik bis zur Speicherung des Wasserstoffs in flüssiger Form auf dem Festland.

Ökobilanzen in Umberto

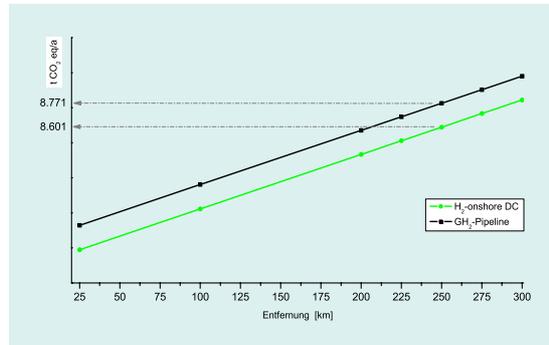


Stoffstromnetz der H₂-Komponenten

Ökologische Untersuchungen

Ecological break even distance (Pipeline – DC)

GWP

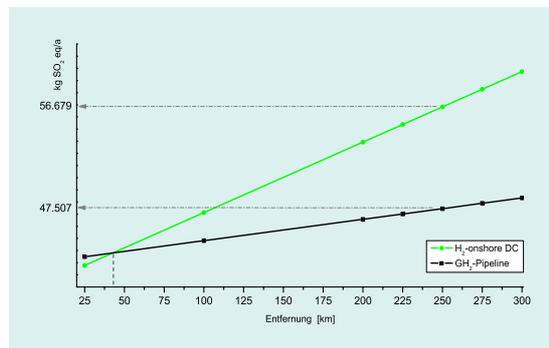


Vergleich der CO₂-Emissionen von Pipeline- und DC-Szenario:
 Umweltauswirkungen steigen mit zunehmender Entfernung gleich stark
 → kein Schnittpunkt

Ökologische Untersuchungen

Ecological break even distance (Pipeline – DC)

AP



Vergleich der SO₂-Emissionen von Pipeline- und DC-Szenario:
 → kupferhaltiges Seekabel ist ausschlaggebend
 → Schnittpunkt: 44 km

Ökonomische Aspekte

Geschätzter Kostenvergleich von Pipeline- und DC-Szenario

Kostenverursachende Unterschiede:

- Größe der Offshore-Plattform (Pipeline-Plattform ist ca. 15% größer)
- Übertragungstechnik (DC-Seekabel / Pipeline)

Abschätzung:

- Kosten der Offshore-Plattform können an Flächenbedarf abgeschätzt werden
- Ähnliche Verlegekosten von DC-Seekabel und Pipeline
- Kosten der aufwendigen Seekabel sind um ein Vielfaches höher als die der relativ einfachen Pipeline

Ergebnis:

Bei einer reinen Wasserstoff-Erzeugung ist die Pipeline-Variante unter ökonomischen Rahmenbedingungen vorzuziehen.

Zusammenfassung

Ergebnisse der Szenarien zur Wasserstoff-Erzeugung in Offshore-Windparks unter ökonomischen Bedingungen

Ergebnisse der ökonomischen Untersuchung:

Pipeline- und Schiff-Szenario

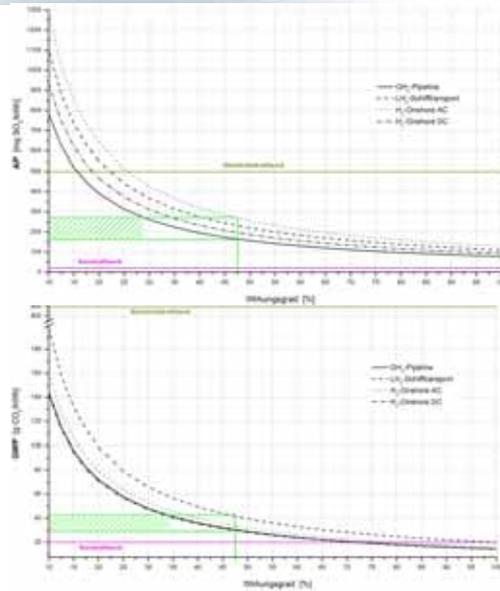
→ Investitionskosten der Schiff-Variante sind ca. 70% höher

AC- und DC-Szenario

→ Kosten der AC-Variante sind etwa doppelt so hoch

Schätzung

→ Kosten der DC-Variante sind um ein Vielfaches höher, als die der Pipeline-Variante.



dena-Studie

Ausgewählte Szenarien zur Anbindung von OWPs

- Verschiedene Entfernungen und Leistungen sollen abgedeckt werden (break-even-distance AC/DC sehr unterschiedlich → dena: >120km, Areva: ca. 50km)
- OWPs aus Zeithorizont 2010 → sinnvoll, zeitnah, große Leistungen u. Entfernungen

OWPs 2010	Leistung	Einspeise -Spg.	See- kabel	Land- kabel	GIL	Frei- leitung	Nenn- spg.	Anz. Systeme	Mio €
	MW	kV	km	km	km	km	kV		
N-OWP-C	500	380	200	0	0	0	220	2	340
N-OWP-G	252	380	64	15	0	0	150	1	89
O-OWP-J	385	380	122	11	0	0	150	2	180
N-OWP-H	1378	380	100*	0	15	80	200-400	6 + 1xGIL + 1xFL	1743

Bemerkung:

OWP-H ist nach dena die erste GIL-Variante → derzeit keine Daten im Detail vorhanden

*Dieses Seekabel soll nicht mitbilanziert werden → nur Übertragung von großer Plattform bis PCC

dena-Studie

Ausgewählte Szenarien zum Netzausbau

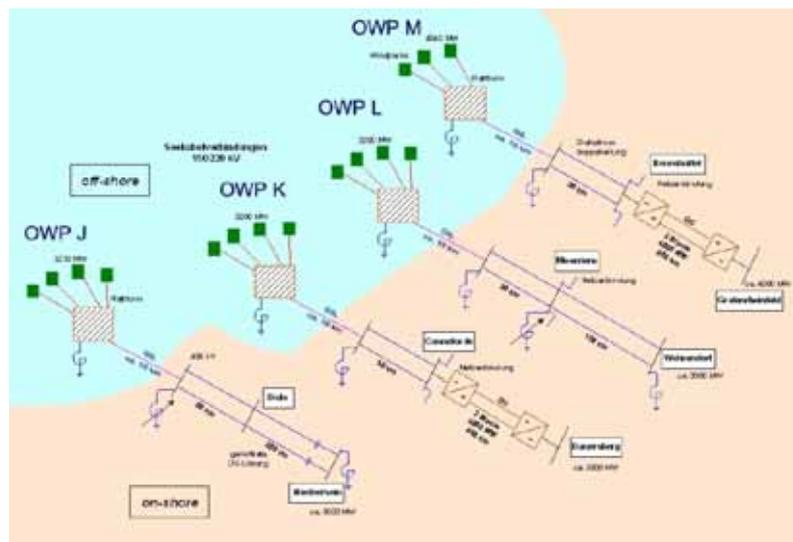
→ Ganzheitliche Bewertung des Leitungsneubaus für 2010 und 2015 sinnvoll → 4 neue Trassen 380kV

Zeithorizont	2010			2015
Strecke Neubau	Hamburg/Nord – Dollern	Neuenhagen – Bertikow/Vierraden	Viesselbach – Altenfeld	Diele-Niederrhein
380 kV Doppelleitung (2200 MVA pro Stromkreis)	45 km	110 km	80 km	200 km
Kosten	42 Mio €	109 Mio €	87 Mio €	148 Mio €

Angaben der dena zur Hochspannungsdrehstrom-Freileitung (pro Stromkreis)

Nennspannung 400kV, 4x385/35-Al/St, 4x850A, 2200 MVA

→ Netzausbau mittels 380kV-Doppelleitung (6 Stromkreise) → 13.200 MVA



Einleitung

- **Seit 2003: Ausbau der Windenergie an Land (onshore) ist rückläufig**
→ Ausbaupotential ist zu 50% erschöpft
- **Herausforderung für den Ausbau auf See (offshore)**
- **Strategie der Bundesregierung für instal. Leistung offshore:**
Bis 2010 → 2000-3000 MW
Bis 2030 → 20-25 GW (15% Beteiligung an Stromversorgung)
- **Jahr 2004: Windkraft beteiligt sich mit 5,5% an Stromerzeugung**
- **Einsparung an konventionellen Kraftwerken: 6% der installierten Windleistung**
→ große Konflikte in Politik und Wirtschaft
- **Konsens: Windkraft soll genutzt werden**
→ effizienteste Möglichkeit bleibt umstritten