

Wasserstoff – Das Speichermedium für erneuerbare Energie

– Eine strategische Betrachtung zur Erreichung der energiepolitischen Vorgaben der Deutschen Bundesregierung –

Detlef Stolten, Thomas Grube, Michael Weber

Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, Deutschland

www.fz-juelich.de/iek/iek-3, d.stolten@fz-juelich.de

Kurzfassung: Es wird ein Energiesystem für Deutschland entworfen, das eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 55% gegenüber 1990 erlaubt. Es basiert auf Windenergie, Elektrolyse, Wasserstoffnutzung im Straßenverkehr und der Residuallastdeckung mit Erdgaskraftwerken.

Keywords: Energiespeicher, Windenergie, Elektrolyse, Residuallast, Emission, Klimaziele

1 Einleitung

Die Energietechnik ist weltweit derzeit einem starken Wandel unterworfen. Die allgemein anerkannten Treiber dazu sind Klimawandel, Energieversorgungssicherheit, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und lokale Emissionen. Diese Treiber sind weltweit anerkannt, wobei ihre Wertigkeit je nach Land unterschiedlich gesehen wird. Nach dem durch eine Naturkatastrophe ausgelösten Kernkraftwerksunfall in Fukushima haben sich mehrere Länder von der Kernkraft abgewandt. In Deutschland hat dieses zu einem breiten politischen Konsens aller Parteien gegen weitere Kernkraftnutzung geführt. Gleichzeitig sollen die Emissionen der Klimagase weiter reduziert werden. Bezogen auf 1990 wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 40 % bis 2020, 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 80-95 % bis 2050 angestrebt [1]. Als *Grand Challenges* werden üblicherweise die Themen erneuerbare Energien, Elektromobilität, effiziente Kraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplung angesehen. Unter den oben genannten Forderungen zur Reduktion der Klimagase bleiben von diesen vier großen Themen nur noch zwei übrig, nämlich erneuerbare Energien und Elektromobilität auf der Basis erneuerbarer Energien. Weder Kraft-Wärme-Kopplung noch hoch effiziente zentrale Kraftwerke auf der Basis fossiler Energien können den oben genannten Forderungen für 2040 oder 2050 standhalten. Effiziente wasserstoffbetriebene Kraftwerke zur Kompensation der fluktuierenden erneuerbaren Energien, also insbesondere wasserstoffbetriebene Gasturbinen, werden zunehmend bedeutend werden.

2 Status der CO₂-Emissionen

In Deutschland werden 32 % der Treibhausgasemissionen in der Stromerzeugung, 17 % im Verkehr, 11 % im Bereich Haushalte sowie 16 % in den Bereichen Gewerbe/Industrie verursacht. Im Verkehr entstehen 11 %-Punkte des CO₂-Ausstoßes im Pkw-Verkehr und 6 %-Punkte im Schwerlast- sowie Bahn-, Schiffs- und Flugverkehr [2]. Um das untere Ziel von 80 % CO₂-Reduktion bis 2050 zu erreichen und unter Berücksichtigung, dass 2009 der CO₂-Ausstoß in Deutschland 26 % unter dem von 1990 lag, müssten beispielsweise der gesamte Stromsektor und der PKW-Verkehr CO₂-frei werden. Darüber hinaus ist ein Potenzial im Bereich der Haushalte und von Gewerbe und Industrie zur CO₂-Einsparung vorhanden. Im Schwerlastverkehr wird sich dieses nur schwierig und wenn, durch Biokraftstoffe erreichen lassen.

3 Strategische Konsequenzen

Daher können folgende Konsequenzen gezogen werden:

- Nur Elektromobilität auf der Basis von Batterien oder Brennstoffzellen kann die strikten Vorgaben erreichen.
- Nur erneuerbare Energien können die Vorgaben zur CO₂-freien Stromerzeugung erreichen.
- Erneuerbare Energien fluktuieren stark und benötigen daher große Speicherkapazitäten, wie sie durch Pumpspeicherkraftwerke oder geologische Gasspeicherung von Wasserstoff dargestellt werden können.
- Windkraft mit Wasserelektrolyse und Elektromobilität kann ein Gesamtsystem darstellen, das den Anforderungen gerecht wird und die Energiewelt verändern kann.
- Für dieses System gilt es zu prüfen, ob es technisch durchgängig darstellbar ist und ob es wirtschaftlich sein kann. Dabei soll das System mit möglichst wenigen Komponenten und weitestgehend mit existenten oder weitgehend entwickelten Komponenten erstellt werden.

4 Leistungsdichte als wesentliches Charakteristikum erneuerbarer Energien und deren Speichermedien

Das wichtigste Argument für die Auswahl erneuerbarer Techniken sollte nicht die potentielle Leistung sein, sondern die Leistungsdichte. Die Leistungsdichte an der aktiven Fläche des technischen Aggregates stellt ein Maß für den technischen Aufwand dar, der notwendig ist, die jeweilige erneuerbare Primärenergie in Strom umzuwandeln. Während Wasserkraft im Bereich einiger Kilowatt pro Quadratmeter liegt, liegt die Leistungsdichte von Windkraft bei etwa 150 W/m² und die von Photovoltaik bei etwa 15 W/m². Wasserkraft ist in Deutschland praktisch voll ausgebaut, Windkraft und Photovoltaik bieten hingegen noch große Zubaumöglichkeiten. Aufgrund der höheren Leistungsdichte wird für das folgende Szenario die Windkraft ausgewählt.

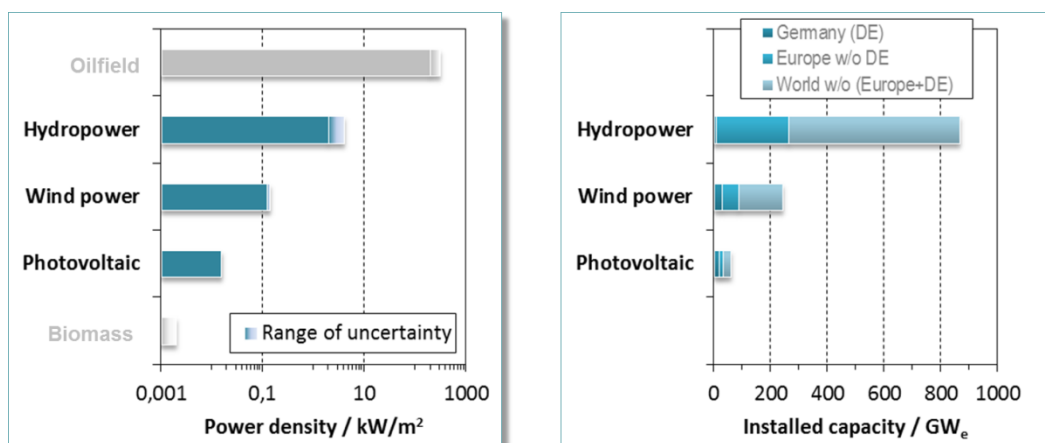


Abbildung 1: Leistungsdichte und installierte Kapazität erneuerbarer Energien im Vergleich

Ähnliche Überlegungen gelten bei der Auswahl des bevorzugten Speichermediums. Lithiumionenbatterien liegen heute bei einer Speicherdichte von etwa 2 MJ/l und werden, um eine lange Lebensdauer zu erreichen, zu etwa 50 % be- und entladen. Damit ergibt sich eine effektive Speicherdichte von etwa 1 MJ/l bei etwa 0,5 MJ/kg. Wasserstoff in einem Autotank bei 700 bar hat eine volumenspezifische Speicherdichte von etwa 4 MJ/l und etwa 4 MJ/kg jeweils einschließlich des Tanks sowie eine physikalische Speicherdichte im flüssigen Zustand von 8,46 MJ/l. Dieses sind die beiden für Elektromobilität infrage kommenden Energiespeicher. Benzin hingegen hat eine im Vergleich hervorragende Speicherdichte von 37 MJ/l des reinen Kraftstoffes bei einem vernachlässigbaren Eigenvolumen des Tanks und etwa knapp 30 MJ/kg einschließlich des Tanks. Aufgrund der 4-6 Mal höheren Speicherdichte von Wasserstoff gegenüber Batterien wird dieser als Speichermedium ausgewählt. Eine Zusammenstellung verschiedener Speicher dichten zeigt die folgende Tabelle.

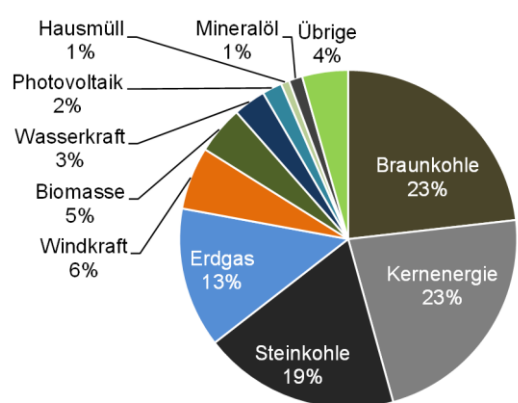
Table 1: Energiedichte von Benzin und Ethanol im Vergleich zu Wasserstoff und Batterien

	Physikalische Speicherdichte		Technische Speicherdichte	
	[MJ l ⁻¹]	[MJ kg ⁻¹]	[MJ l ⁻¹]	[MJ kg ⁻¹]
Benzin	31	43	–	35
Ethanol	21	27	–	
Wasserstoff	5 @ 700 bar	120	4 @ 700 bar	15
Batterien	1.5	0.5	Kühlzellen	dito

5 Status der Stromerzeugung und Windkraftanlagen in Deutschland

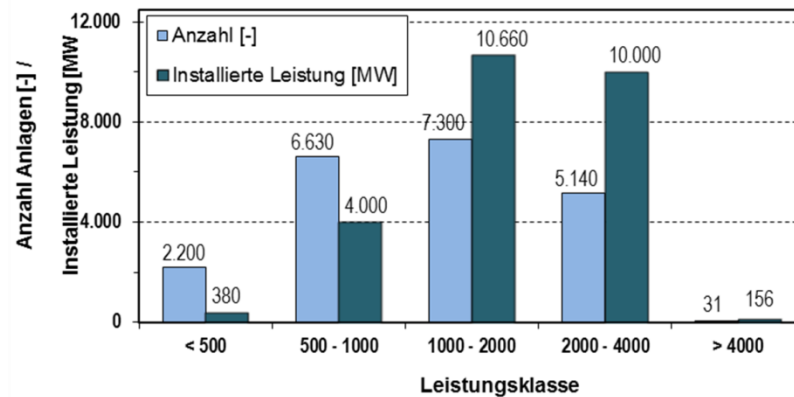
Die Verteilung der Stromerzeugung nach Primärenergien im Jahre 2010 ist in dem folgenden Bild dargestellt.

Abbildung 2: Verteilung der Stromerzeugung von 490 TWh im Jahre 2010 in Deutschland auf die Primärenergien



Die Verteilung der installierten Windkraftanlagen in Deutschland im Jahre 2010 zeigt das folgende Bild. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche, gewichtete Leistung von 1,23 MW pro Windkraftanlage.

Abbildung 3: Verteilung der installierten Windkraftanlagen in Deutschland auf die verschiedenen Leistungsklassen im Jahre 2010



6 Erneuerbares Szenario mit konstanter Anzahl von Windkraftanlagen

Es wird folgendes Szenario aufgestellt:

- Die Windkraftanlagen an Land werden in ihrer Anzahl auf dem Stand von Ende 2011 konstant gehalten, aber von ihrem Durchschnittswert von 1,2 MW pro Anlage auf 7,5 MW pro Anlage angehoben. Die Auslastung wird von heute knapp 1400 auf 2000 Vollaststunden angehoben – ein Wert der heute von 3 MW Anlagen im bundesweiten Mittel leicht übertroffen wird [3].
- Die Off-Shore-Windenergie wird auf 70 GW ausgebaut [4].
- Die Fotovoltaik wird mit der Ende des Jahres 2011 installierten Leistung von 24,8 GW zeitabhängig berücksichtigt.
- Der Beitrag anderer erneuerbarer Energien wird auf dem Niveau von 2010 als zeitlich konstant angenommen. Sie tragen somit weder zu den Fluktuationen noch zu deren Glättung bei.
- Die Fluktuationen von Wind- und Solarenergie werden im Bedarfsfall über Gaskraftwerke kompensiert. Kraftwerke für andere fossile Energieträger werden nicht mehr gebaut. Ihr Beitrag wird hier bereits nicht mehr berücksichtigt.
- Überschüssige Stromerzeugung wird zur Produktion von Wasserstoff mittels Elektrolyse genutzt, über ein Wasserstoffpipelinennetz an Tankstellen verteilt und in Brennstoffzellen-PKWs verwendet. Dabei wird von einem Verbrauch von 1 kg Wasserstoff pro 100 km ausgegangen und einer durchschnittlichen Fahrleistung von 14.900 km pro Jahr für das Auto.
- Im Bereich der Hauswärmeversorgung wird die Hälfte des 2010 verbrauchten Erdgases eingespart. Dieses könnte bei Bedarf zur Stromerzeugung verwendet werden.

Das Szenario wurde bewusst einfach und mit wenigen Komponenten gestaltet. Es soll in einem durchgängigen Konzept die Machbarkeit der erneuerbaren Energieversorgung aufzeigen. Der Beitrag anderer Energiespeicher und des transnationalen Stromaustauschs

wird als vergleichsweise gering erachtet und daher hier vernachlässigt. Die Besonderheit liegt in der engen Verzahnung zwischen den stationären Sektoren und dem Transportsektor. Das Bindeglied stellt dabei der Wasserstoff dar. Für seine Verwendung gibt es im Hinblick auf die sehr großen Mengen zwei grundlegende Optionen: die netzgebundene Rückverstromung und die Verwendung als Treibstoff. Die Effizienz der Rückverstromung mit oder ohne Erdgasnetzeinspeisung wird maximal der der Erdgasverstromung entsprechen - wird der Wasserstoff zuvor zur Methanisierung von CO₂ verwendet, ist die Gesamteffizienz geringer. Benutzt man den Wasserstoff aber als Treibstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist schon der Energiebedarf (Tank-to-Wheel) um etwa 50% geringer als der von benzingetriebenen Fahrzeugen (Abbildung 4). Gleichzeitig ist die auf den Heizwert bezogene vermiedene CO₂-Emission der erdölbasierten Treibstoffe aber um 25 % höher als die von Erdgas, so dass die Verwendung im Straßenverkehr zusammen 2,5 mal so viel CO₂-Entstehung vermeidet wie die Rückverstromung in Kraftwerken. Die Methanisierung wird heute auch als ein Weg der Energiespeicherung bei vorhandener Transportmöglichkeit für das Zielprodukt diskutiert, bewirkt aber eine Verschiebung der CO₂ Emission vom Kohlekraftwerk zum flexibleren Gaskraftwerk und erlaubt damit keine CO₂-Vermeidung in der geforderten Größenordnung bei einem auch erheblichen technischen Aufwand.

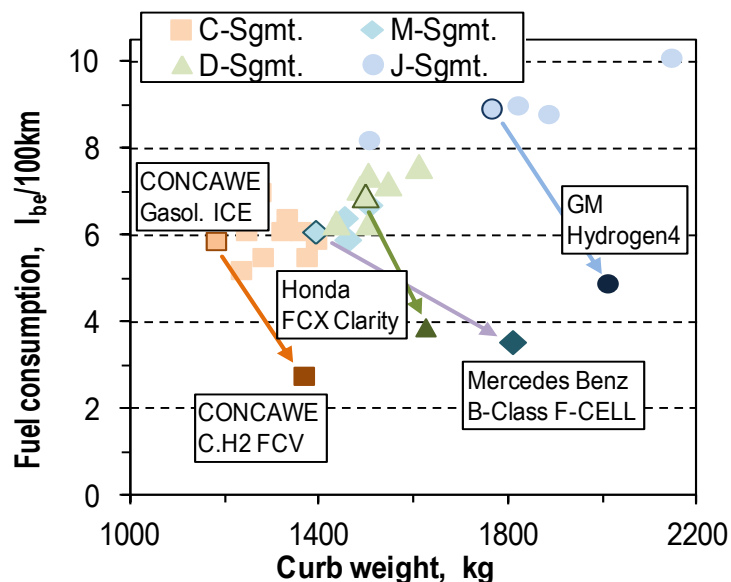


Abbildung 4: Energiebedarf von Brennstoffzellen-Pkw-Demonstratoren und aktuellen Benzinfahrzeugen (Basismotorisierung, eigene Auswertung von Herstellerangaben)

7 Vorgehensweise

Die Berechnungen beruhen auf den von den Übertragungsnetzbetreibern zur Verfügung gestellten Viertelstundendaten für Wind- und PV-Einspeisung sowie für die vertikale Netzlast. Die Windprofile des Jahres 2010 werden entsprechend obiger Vorgaben skaliert; die Anhebung der Auslastung geschieht durch Anwendung einer Verstärkungsfunktion, die vorwiegend auf den unteren Leistungsbereich wirkt. Die PV-Vorhersageprofile des Jahres 2010 werden für die Zeiten, wo sie von einzelnen Netzbetreibern noch nicht veröffentlicht wurden, von 50Hertz übernommen und alle so skaliert, dass sich für jeden Netzbetreiber die exakt gemessene Jahressumme ergibt. Im Anschluss werden sie zunächst noch einmal linear datumsabhängig skaliert um den unterjährigen Zubau zu berücksichtigen und schließlich wieder auf die installierte Leistung laut Szenario skaliert. Für Elektrolyseure wird ein Wirkungsgrad von 70%_{LHV} angenommen – als Mindestauslastung des letzten zugebauten

Elektrolyseurs werden 1000 Vollaststunden angesetzt. Für Gaskraftwerke wird wegen des dynamischen Betriebs ein 15 %-iger Abschlag auf heutige, über verschiedene Hersteller gemittelte Nennlastwirkungsgrade, 58,5 % (GuD) beziehungsweise 36,5 % (Gasturbine) angewendet. Für die Anteile der jeweiligen Kraftwerke siehe Abschnitt 10 „Diskussion“.

8 Anmerkung zu den Annahmen

Unter der Maßgabe, von heute verfügbaren Technologien auszugehen, wurde der spezifische Kraftstoffverbrauch für Pkw mit Brennstoffzellen gemäß dem heutigen Stand mit 3,3 Liter Dieseläquivalent oder 1 kg je 100 km angenommen [5]. Zu erwartende Verbrauchsreduktionen würden die Fahrzeuganzahl, die sich mit der laut Szenario ermittelten Wasserstoffmenge versorgen ließe, erhöhen. Dem steht eine im Zeitverlauf wachsende Flotte von Fahrzeugen bei nur leicht absinkender jährlicher Fahrleistung gegenüber. Die Studie GermanHy geht beispielsweise von einem Pkw-Bestand von 52,1 Mio. Pkw im Jahr 2050 aus [6]. In [7] werden 41,7 Mio. für das Jahr 2011 genannt. Die über alle Antriebsarten gemittelten Fahrleistungen reduzieren sich laut Shell Pkw-Szenarien [8] von heute etwa 12.200 km auf etwa 11.900 km im Jahr 2030. Andere Angaben zu aktuellen Pkw-Fahrleistungen findet man beispielsweise in [9] mit 11.400 km. Es wird in erster Näherung angenommen, dass sich die oben genannten Effekte gegenseitig aufheben. Die gleiche Annahme gilt für die Begrenzung der Anzahl der Windturbinen auf den heutigen Stand und die in der Realität möglicherweise nicht überall erreichbare Erhöhung der mittleren Windturbinenleistung auf 7,5 MW. Der auf der Transmissionsebene anfallende Netzverlust ist zwar nicht in der vertikalen Netzlast enthalten, wird aber in den amtlichen Statistiken bisher nicht einzeln ausgewiesen. Da er – wenn Gaskraftwerke nah am Verbraucher gebaut werden – nur bei starker Einspeisung der Erneuerbaren erheblich relevant wird, lässt er sich durch einen geringen zusätzlichen Ausbau der Erneuerbaren auch weitgehend kompensieren.

9 Energie- und CO₂-Ergebnisse des Szenarios

Mit diesem Energiesystem kann sowohl die Netzlast von in Summe 488 TWh (2010) gedeckt als auch der Verkehr mit 5,4 Mio. t Wasserstoff versorgt werden. Die Netzlastdeckung teilt sich wie folgt auf die Energieträger auf: 75 % Wind und PV, 10 % sonstige erneuerbare Energien und 15 % Erdgas (Abbildung 5). Mit dem Wasserstoff können der Großteil der Fahrzeuge im Straßenverkehr ersetzt werden. Wählt man die Verhältnisse zwischen den Fahrzeugzahlen entsprechend denen der GermanHy Studie für 2050 [6], sind dies 28 Mio. PKW, 2 Mio. leichte Nutzfahrzeuge und 47.000 Busse – d.h. 68- respektive 62- und 55 % des jeweiligen deutschen Bestandes im Jahr 2011. Zur Deckung der Residuallast reicht die heute verstromte Erdgasmenge aus.

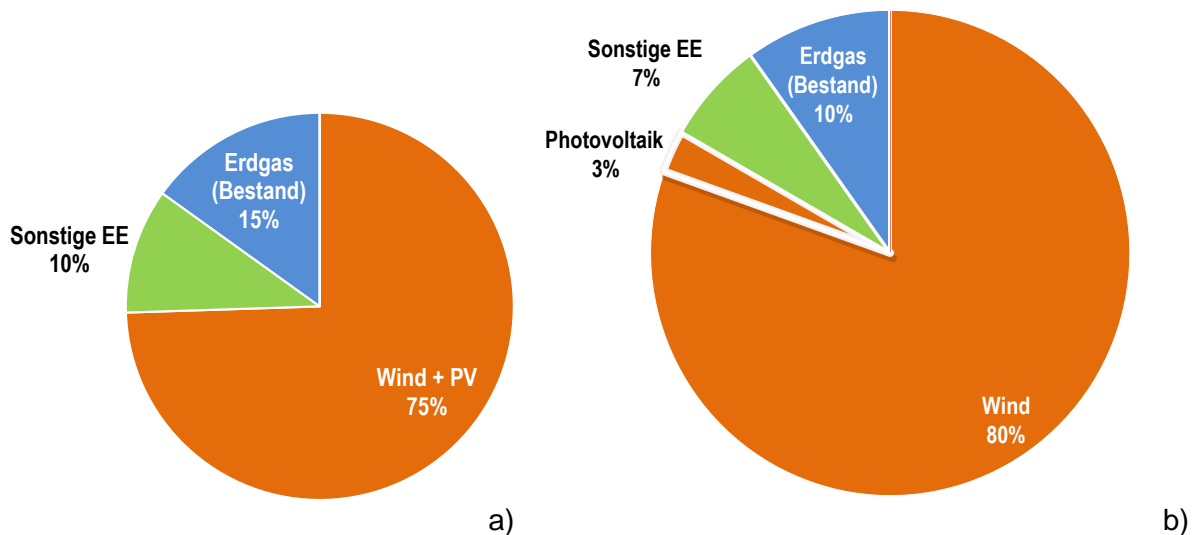


Abbildung 5: Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung lt. Szenario bei Bezug auf
a) die vertikale Netzlast allein (488 TWh_e)
b) die Gesamterzeugung inklusive des Stroms für die Elektrolyse (745 TWh_e).

Durch die Substitution von erdölbasierten Treibstoffen im Verkehrssektor werden mit der gegebenen Wasserstoffmenge knapp 9 %-Punkte des CO₂-Gesamtausstoßes des Jahres 2009 eingespart. Die Einsparung im Stromsektor beträgt 27 %-Punkte. Der Anteil der Stromerzeugung für die öffentliche Versorgung an den CO₂-Emissionen reduziert sich auf 5,4 % der verbleibenden Gesamtmenge.

Unter Berücksichtigung der zwischen 1990 und 2009 bereits erfolgten Gesamtreduktion um 26,5 % können gegenüber 1990 insgesamt 697 Mio. t CO₂ beziehungsweise 55 % eingespart werden (**Abbildung 6**). Es verbleiben Emissionen in Höhe von 567 Mio. t CO₂-Äquivalent.

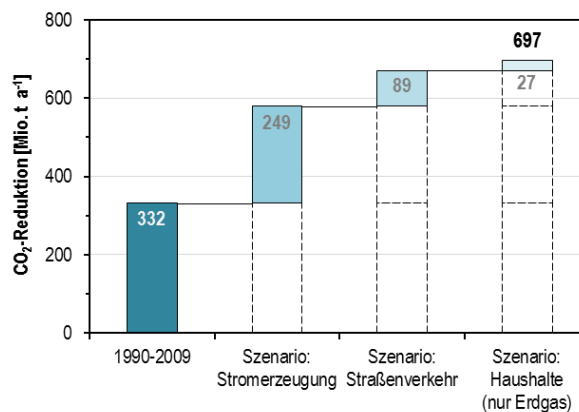


Abbildung 6: Beiträge zur Reduktion der CO₂-Emissionen.

10 Diskussion der Ergebnisse

Das CO₂-Reduktionsziel der Bundesregierung für 2030, von -55% gegenüber 1990 wird mit dem beschriebenen Szenario voll erreicht.

Wesentliches Element ist die Speicherung von Überschussenergie in Form von Wasserstoff, dessen Überführung in den Straßenverkehr und seine Verwendung in hocheffizienten

Brennstoffzellenantrieben. Diese Anwendung des Wasserstoffs ist einerseits die mit dem höchsten CO₂-Vermeidungspotential - gegenüber allen Varianten der netzgebundenen Rückverstromung, und andererseits erlaubt sie den höchsten Erlös unter den Massenanwendungen.

Zusätzlich zu 22 GW an existenten Gaskraftwerken werden 42 GW an neuer Kapazität benötigt. Setzt man ab einer Auslastung von 700 Volllaststunden GuD-Anlagen ein, werden durch diese 68 TWh erzeugt und durch einfache Gasturbinenanlagen nur 5,5 TWh. Zudem werden bei der gewählten Kappungsgrenze 84 GW an Elektrolyseurkapazität benötigt, 9 Mrd. Nm³ an Gasspeicherkapazität, 9.800 Tankstellen und 43-59.000 km Pipeline, wenn alle Tankstellen per Pipeline angeschlossen werden, wobei der höhere Wert einen Umwegfaktor von 1,5 für lokale Verteilnetze beinhaltet.

11 Zusammenfassung

Der Vergleich der Jahrgänge von Netzlast und Stromangebot bei deutlichem Ausbau der Windkraft *On-shore* und *Off-shore* zeigt:

- Der Strombedarf kann unter Verzicht auf Kernkraft, Kohle und Mineralöl und ohne Erhöhung der Erdgaseinfuhren gedeckt werden.
- Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung beträgt dann etwa 90%; wobei 34 % der Erzeugung als Überschuss in die Elektrolyse gehen.
- Überschüsse aus der Stromproduktion reichen u.a. zur Versorgung von 28 Mio. Brennstoffzellen-Pkw mit Wasserstoff. Auf Basis typischer Verbrauchsdaten des Jahres 2010 werden durch Wasserstoff im Verkehr 81 Mio. t_{CO2} entsprechend 6,5 % der Gesamtemission von 1990 eingespart.
- Im Stromsektor werden bezogen auf 1990 20 %-Punkte und im Hauswärmebereich 2,2%-Punkte eingespart. Zusammen mit den 2009 bereits erreichten 26,5%-Punkten ergibt sich eine Reduktion von 55 %.

Literatur

- [1] Deutsche Bundesregierung (2011) *Eckpunktepapier*. Beschluss vom 6.6.2011 <http://www.bmu.de/energiewende/downloads/doc/47467.php>
- [2] Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen – 1990 - 2009 (Endstand: 17.01.2011), Umweltbundesamt 2011
- [3] BWE (2011) *Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land – Kurzfassung*. Bundesverband WindEnergie e.V. (Hrg.), Berlin, Mai 2011
- [4] BMU (2011) *Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Berlin, Juni 2011
- [5] Angaben für Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL, www.daimler.com, zuletzt besucht am 03.02.2012
- [6] BMVBS (2009) *GermanHy - Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?* Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- [7] Pkw-Anzahl in Deutschland. www.destatis.de, zuletzt besucht am 03.02.2012
- [8] Shell Pkw-Szenarien bis 2030. www.shell.de, zuletzt besucht am 03.02.2012
- [9] DESTATIS