

SW 2 **Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt:**

SW 3 **Strom-Wandlung - Basisdaten für 100%-Szenarien**

SW 4 Untersuchung zu Möglichkeiten und Grenzen der Stromwandlung in 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland (100prosim):

1. Langzeit-Stromspeicherung zum Ausgleich der schwankenden Stromerzeugung;
2. Bereitstellung von Antriebsenergie für Elektrofahrzeuge
3. Bereitstellung von Prozesswärme
4. Wirkung der Umstellung der elektrischen Niedertemperatur-Wärme-Erzeugung auf andere Quellen.

SW 5 Version: 120802

SW 7 Nur ein Teil der Energie kann in dem Augenblick und in der Form sinnvoll verwendet werden, wie sie ursprünglich produziert wurde.

SW 8 Die bestmögliche Abdeckung des Bedarfs an den verschiedenartigen Energiedienstleistungen - durch einen angemessenen Energiemix und zeitgerechte Bereitstellung - erfordert teilweise die nochmalige Wandlung der ursprünglich produzierten Energie.

SW 9 Zum Teil sind diese Wandlungen mit erheblichen Verlusten verbunden, was sich in einem Wirkungsgrad kleiner 100 Prozent ausdrückt.

SW 11 **Stromspeicherung:**

SW 12 Mit fossilen Energieträgern war es bisher möglich, die Leistung des Kraftwerksparks zu jedem Zeitpunkt an den momentanen Bedarf anzupassen. Das war vergleichsweise einfach, da die in den fossilen Brennstoffen chemisch gespeicherte Energie beliebig abrufbar ist.

SW 13 Auch mit erneuerbaren Brennstoffen kann Strom erzeugt werden, genau wie die fossilen sind sie abrufbar. Allerdings zeichnet sich ab, dass die Potenziale eng begrenzt und durch vielfältige Nutzungskonflikte noch weiter eingeschränkt sind. Zur vollen Übernahme der Stromversorgung werden sie nicht im Entferntesten ausreichen.

SW 14 Es zeichnet sich ab, dass Wind- und Solarstrom die tragenden Säulen der Stromversorgung bilden werden. Das Angebot aus diesen Quellen schwankt sehr stark. Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung: Abregelung der Wind- und Solaranlagen bei Überangebot, Lastverschiebung von Zeiten mit Unterangebot in Zeiten mit Überangebot, Europaweiter Austausch mit in anderen Wetterzonen gelegenen Regionen. Mit den genannten Verfahren können zwar gewisse Beiträge zum Ausgleich geleistet werden, die Gewährleistung einer lückenlosen Bedarfsdeckung ist aber grundsätzlich unmöglich.

SW 15 Im Prinzip wäre der Ausgleich durch mit Biobrennstoffen befeuerte Kraftwerke möglich, die bei Unterangebot von Wind- und Solarstrom einspringen. Aber auch für diesen Zweck werden die Biobrennstoff-Potenziale bei weitem nicht ausreichen. Außerdem werden sie für solche Anwendungen von größter Bedeutung sein, in denen Kohlenstoffhaltige Brennstoffe anders kaum substituierbar wären (z. B. Flugverkehr, Eisen-/Stahlherstellung).

SW 16 Allein mit der Speicherung von überschüssigem Strom für Zeiten mit Unterangebot wird eine jederzeit verlässliche Stromversorgung realisierbar sein.

SW 17 Für den Ausgleich kurzfristiger Schwankungen im Sekunden- bis Stunden-Bereich stehen bereits eine Reihe bewährter Technologien zur Verfügung, z. B. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher, Batteriespeicher. Darüber hinaus wird aber mit abnehmendem Anteil fossiler Brennstoffe auch die Langzeitspeicherung über Tage und Monate in steigendem Maß notwendig sein, um länger andauernde Wind- und Solarstrahlungs-arme Zeiten überbrücken zu können.

SW 18 Für die Langzeitspeicherung von Strom werden im Unterschied zu Kurzzeitspeichern sehr große und hinsichtlich Speicherkosten erschwingliche Speicherkapazitäten benötigt. Dafür kommen aus heutiger Sicht nur zwei Technologien in Betracht: Pumpspeicherkraftwerke und die unterirdische Speicherung von Gas.

SW 19

SW 20 **Antriebsenergie für Elektrofahrzeuge**

SW 21 Am Energieverbrauch im Verkehrsbereich haben die Straßenfahrzeuge gegenüber dem Luftverkehr und der Binnenschifffahrt den mit Abstand größten Anteil, im Jahr 2005 waren es in Deutschland 82,2 Prozent und zusammen mit dem Schienenverkehr 84,9 Prozent [153].

SW 22 Für den Breiteneinsatz im Verkehr an Land bilden Elektrofahrzeuge künftig die einzig erkennbare Alternative zu den heute noch nahezu gänzlich mit Erdöl betriebenen Verkehrs- und Transportmitteln.

SW 23 Mit Biokraftstoffen können Erdölprodukte wegen der begrenzten Potenziale nur in bescheidenem Umfang direkt ersetzt werden. Die Erzeugung von Methan aus elektrolytischem Wasserstoff zur weiteren Versorgung der KFZ-Flotte mit Verbrennungsmotoren erscheint wegen der extrem hohen Wandlungsverluste über die gesamte Kette wenig aussichtsreich.

SW 24 Bis auf den Schienenverkehr und O-Busse gibt es für die Landfahrzeuge heute keine direkte Verbindung zum Stromnetz, auch für die Zukunft sind dazu keine Ansätze zu erkennen.

SW 25 Folglich bleibt die Energiespeicherung zentrales Thema, zwei aussichtsreiche Speicherformen für Elektrofahrzeuge ohne Netzverbindung werden hier behandelt [77].

SW 27 **Prozesswärme**

SW 28 Wegen des Wegfalls fossiler Brennstoffe, aus denen Prozesswärme heute überwiegend erzeugt wird, und weil biogene Brennstoffe als Ersatz nur in sehr beschränktem Umfang verfügbar sein werden, wird künftig vermehrt Strom dafür eingesetzt werden müssen [106].

SW 30 **Umstellung elektrischer Niedertemperatur-Erzeugung**

SW 31 Durch Ersatz der heute mit Strom bereit gestellten Niedertemperaturwärme durch Solar- und Umgebungswärme wird Strom frei für höherwertige Anwendungen wie Elektromobilität und Prozesswärme [127].

SW 33 **1. Langzeit-Stromspeicher (LS)**

SW 34 Für die bewährte Technologie der **Pumpspeicherkraftwerke** mit erreichbaren Lade-/Entlade-Wirkungsgraden bis zu 80 Prozent gibt es in Deutschland wegen der geologischen Gegebenheiten und der gravierenden Umwelteingriffe nur sehr geringe Ausbaumöglichkeiten.

Mit einer anteiligen Nutzung der europäischen Potenziale an Pumpspeicherkraft in Skandinavien (hauptsächlich Norwegen), könnte theoretisch ein erheblicher Beitrag zur erforderlichen Regelleistung erbracht werden. Allerdings dürfte dies mit gravierenden Eingriffen in Natur und Umwelt verbunden sein, deren Vertretbarkeit aus heutiger Sicht nicht ohne weiteres vorausgesetzt werden kann. Außerdem wären dafür der Stromtransport über große Entfernungen mit hoher Leistung erforderlich. Das für 2015 geplante NorGer-Kabel von Kristiansand in Norwegen in die Wesermarsch wäre dafür ein bescheidener Anfang. Die Übertragungsverluste des Hin- und Rücktransports würden bei Verwendung der hocheffizienten HGÜ-Technik den Gesamtwirkungsgrad um ca. 10 Prozentpunkte auf ca. 70% reduzieren.

SW 36 Elektrolytisch aus Wind- und Solarstrom erzeugtes **Wasserstoffgas** kann wie Erdgas bereits heute in **unterirdischen Kavernen** in Norddeutschland gespeichert werden, allerdings unter Inkaufnahme eines niedrigeren Wirkungsgrades für die gesamte Kette Strom-Wasserstoff-Strom zwischen 21 und 43 Prozent.

SW 37 Die Technologie ist verfügbar, wie beispielsweise die seit 2004 in Betrieb befindliche autarke Stromversorgung auf der norwegischen Insel Utsira zeigt SW201.

SW 38 Hier wird von einem realistisch erreichbaren Kettenwirkungsgrad von 35 Prozent ausgegangen, resultierend aus einem Elektrolyse- und Komprimierungs-Wirkungsgrad von 67 Prozent gemäß [SW165] und einem Rückwandlungs-Wirkungsgrad (Gasturbine, Brennstoffzelle) von 52 Prozent.

SW 39 Es scheint in Norddeutschland ausreichend Möglichkeiten zur Herstellung von genügend Speicherkapazität für Deutschland zu geben. Wegen der Gefahr von Bodensenkungen durch die häufigen Druckwechsel beim Be- und Entladen muss allerdings sorgfältig geprüft werden, inwieweit die Nutzung von Erdgas-Speicherkavernen für die Wasserstoffspeicherung langfristig vertretbar ist. Aus Umweltsicht kritisch ist auch die hohe Salzlast durch die Ausspülung der Kavernen, die im Laufe der Betriebszeit wiederholt erforderlich wird.

SW 41 Die Veredelung des elektrolytisch erzeugten Wasserstoffgases zu **Methan** hätte den großen Vorteil, dass die gesamte Erdgas-Infrastruktur unverändert weiter genutzt werden könnte und das Gas wegen seiner hohen Energiedichte universell verwendbar wäre, z. B. auch im Verkehrsbereich. Allerdings läge der Gesamtwirkungsgrad der Kette Strom-Wasserstoff-Methan-Strom durch zusätzliche Verluste bei der Methanisierung noch unter denen der Wasserstoff-Speicherung.

SW 42 Wirkungsgrade von 85 Prozent sind für die Methanisierung des Wasserstoffs voraussichtlich möglich [183]. Bei einem als realistisch angenommenen Kettenwirkungsgrad Strom-Wasserstoff-Strom von 34,84 Prozent erscheint einschließlich Methanisierung ein Wirkungsgrad von 30 Prozent als möglich.

SW 43 Ein weiterer begrenzender Faktor ist die Bereitstellung von genügend Kohlenstoff zur Methanisierung von Wasserstoff. Im nachfossilen Zeitalter stehen primär nur noch die Abgase aus der Verbrennung von Biomasse für die Wiederverwendung des darin enthaltenen CO₂ zur Verfügung. Da die Potenziale von Biobrennstoffen aber eng begrenzt sind, werden diese voraussichtlich dringend für mobile Zwecke (Luftverkehr z. B.) benötigt, bei denen eine Rückgewinnung des Kohlenstoffs nicht realistisch erscheint. Daraus folgt: Je stärker die Wiederverwendung von Kohlenstoff aus der stationären Methanverstromung an ein vollständig geschlossenes Kreislaufsystem angenähert werden kann, um so größer könnte der Umfang der Methanisierung sein. Die prinzipiell mögliche Gewinnung von CO₂ aus der Luft wurde hier wegen des hohen Energieaufwandes nicht betrachtet.

SW 45 Die folgenden Betrachtungen bleiben auf die Langzeitspeicherung von Strom beschränkt, da hier wegen der geringen erreichbaren Wirkungsgrade im Vergleich zur Kurzzeitspeicherung wesentlich höhere Verluste zu erwarten sind.

SW 46 Die vorgelegten Angaben beziehen sich auf die Stromspeicherung in Form von methanisiertem Wasserstoff.

SW 48 **1.1. Nutzungs-Umfang LS**

SW 49 Der Nutzungs-Umfang von Langzeit-Stromspeichern kann durch den Anteil an der Brutto-Stromerzeugung angegeben werden, der zur Ladung abgezweigt muss, um eine lückenlose Stromversorgung gewährleisten zu können.

SW 51 **Status**

SW 52 Der Status ist unerheblich und mit 0 anzusetzen, da Langzeit-Stromspeicher im Referenzjahr 2010 noch nicht im Breitereinsatz waren.

SW 54 **Ziel-Ansatz**

SW 55 Bei der Festlegung, wieviel Strom für die Ladung von Langzeit-Stromspeichern künftig aufgewendet werden muss (Speicher-Input), ist die erforderliche Strommenge zur Gewährleistung einer lückenlosen Stromversorgung zuzüglich der bei Umwandlung und Speicherung entstehenden Verluste maßgeblich.

SW 56 - Welcher Anteil des gesamten jährlichen Stromverbrauchs zur Gewährleistung einer lückenlosen Stromversorgung von Langzeit-Stromspeichern geliefert werden muss, hängt vor allem vom zeitlichen Profil des Stromangebots ab.

SW 57 Das zeitliche Profil des Stromangebots hängt wiederum von dem Mischungsverhältnis Wind- und Solarstrom ab, wie zum Beispiel in einer interessanten Studie dazu gezeigt wird [205].

SW 58 - Die Verluste bei Umwandlung und Speicherung hängen von der verwendeten Speichertechnologie und ebenfalls dem zeitlichen Profil des Stromangebots ab.

SW 59 Zur Abschätzung des erforderlichen Speicher-Input steht ein Systemmodell aus Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Stromspeicher und Stromverbrauch zur Verfügung [203].

SW 60 Modellrechnungen mit verschiedenen Mischungsverhältnissen von Wind- und Solarstrom haben für die Speicherladung einen erforderlichen Anteil zwischen 43 und 63 Prozent an der Brutto-Stromproduktion ergeben.

SW 61 Hier wird für erste Grobabschätzungen ein mittlerer Pauschalwert von 50 Prozent vorgelegt.

SW 63 **1.2. Wirkungsgrad Wandlungskette LS**

SW 64 Bei der Umwandlung von Strom in Wasserstoff und Methan und bei der späteren Rückwandlung in Strom entstehen erhebliche Verluste.

SW 65 Maßgebliche Größe für das Energieszenario ist der Wirkungsgrad über die gesamte Wandlungskette als Verhältnis von Stromoutput zum Strominput, die verschiedenen Quellenangaben dazu [165], [172], [176], [183] weisen beachtliche Unterschiede auf.

SW 66 Für die Wandlungskette Strom - Wasserstoff - Methan - Strom wird, ausgehend von diesem Spektrum, ein Statuswert für den Wirkungsgrad von 22 Prozent angenommen und als Zielansatz gemäß Zeile 38 ein erreichbarer Wirkungsgrad von 30 Prozent vorgeschlagen.

SW 68 **1.3. Nutzbare Abwärme aus LS**

- SW 69 Die gesamte Differenz zwischen Strominput und Stromoutput der Wandlungskette wird letztendlich zu Abwärme, bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 Prozent ist das mit 70 Prozent der weitaus größte Teil vom Strominput.
- SW 70 Es liegt nahe, diese Abwärme bestmöglich zu nutzen. Um die Nutzungsmöglichkeiten abzuschätzen, sind Ort und Zeitprofil von Abwärme-Angebot und Niedertemperaturwärme-Nachfrage ins Verhältnis zu setzen.
- SW 71 Beim Abwärme-Angebot muss zwischen Wasserstoff-Elektrolyse, Methanisierung und Rückverstromung unterschieden werden, da diese Schritte auf jeden Fall zu verschiedenen Zeiten, aber auch an unterschiedlichen Orten stattfinden können.
- SW 72 Für eine Abwärmenutzung optimal wäre es, wenn alle drei Schritte dezentral an den Orten der Wärmenachfrage stattfinden. Andere Gesichtspunkte könnten allerdings dagegen sprechen, zum Beispiel im Fall einer gewissen Mindestgröße der Elektrolyse- und Methanisierungs-Anlagen, Wärmebedarf der Methanisierungs-Anlagen, Vorteile der Energieeinspeisung als Gas direkt an Wind- und Solarparks gegenüber Stromeinspeisung.
- SW 73 Zu diesem Thema sind bisher noch keine belastbaren Studien bekannt. Daher wird hier zunächst nur der Abwärmeanteil aus der Rückverstromung betrachtet, bei einem angenommenen elektrischen Wirkungsgrad der Rückverstromung gemäß Zeile 38 von 52 Prozent wären das 34 Prozent vom Strominput.
- SW 74 Da die für Breitereinsatz geeignet erscheinenden Technologien zur Wärmespeicherung über Wochen und Monate und die Fernwärmeleitung mit großen Wärmeverlusten verbunden sind und da das Zeitprofil sowie der Ort von Angebot und Nachfrage nur teilweise übereinstimmen werden, wird nur ein Teil der Abwärme aus Rückverstromung sinnvoll genutzt werden können.
- SW 75 Bis zu einer Klärung dieser komplexen Thematik wird für den Nutzungsgrad von Abwärme im Verhältnis zum Strominput hier ein Zielwert von 20 Prozent vorgeschlagen, der Statuswert ist nicht relevant und daher mit 0 angesetzt.

SW 77 **2. Elektrofahrzeuge (EF)**

- SW 78 Akkumulatoren sind die aus heutiger Sicht aussichtsreichsten Speicherform für Elektrofahrzeuge, daher bleibt die Betrachtung hier darauf beschränkt. Brennstoffzellen-Fahrzeuge können hier unberücksichtigt bleiben, da der Wirkungsgrad der gesamten Wandlungskette vom regenerativen Strom über die Wasserstoffelektrolyse bis hin zur Stromrückwandlung nicht weit von dem bei Akku-Fahrzeugen liegen wird, wenn die vorgelagerte Langzeit-Stromspeicherung bei Akku-Fahrzeugen mit berücksichtigt wird.

- SW 79 Mit **Akkumulatoren** kann elektrische Energie chemisch direkt gespeichert und wieder abgerufen werden, Hauptvorteil ist der vergleichsweise hohe Wandlungs-Wirkungsgrad von Strom zu Strom.

SW 81 **2.1. Nutzungs-Umfang EF**

- SW 82 Der Nutzungs-Umfang von Elektrofahrzeugen kann durch den Anteil an der Stromerzeugung angegeben werden, der zur Ladung der Akkumulatoren jeweils abgezweigt wird.

SW 84 **Status**

- SW 85 Der Status ist unerheblich und mit 0 anzusetzen, da Elektrofahrzeuge im Jahr 2007 noch nicht im Breitereinsatz waren und dies sich seither nicht gravierend verändert hat [153].

SW 87 **Ziel-Ansatz**

- SW 88 Bei der Festlegung, wieviel Strom für Elektrofahrzeuge künftig aufgewendet werden soll, ist folgender Aspekt von Bedeutung:

- SW 89 - Um mit Elektrofahrzeugen die selbe Verkehrsleistung wie im Referenzjahr 2007 zu erreichen, ist wegen der gegenüber den Verbrennungsmotoren 4-fach höheren Wirkungsgrade nur ca. 25 Prozent der Energie als Input für die Elektromotore erforderlich [159] (=Deckungsgrad).

SW 91 **2.2. Effizienz (EF)**

- SW 92 Die beim Laden und Entladen der Akkumulatoren, verallgemeinernd häufig als Batterien bezeichnet, entstehenden Verluste bestimmen den Lade-/Entlade-Wirkungsgrad [180]:

- SW 93 Konservativ werden jeweils die unteren Werte der angegebenen Spanne vorgeschlagen mit 65 Prozent für die heute im Fahrzeugbereich noch vorherrschenden Bleiakkus und 90 Prozent für die effizienteren Lithium-Ionen-Akkus.

SW 95 **2.3. Technologische Perspektiven (EF)**

- SW 96 Im Konsumbereich sind Lithium-Ionen-Akkus seit Jahren in breitem Einsatz.
- SW 97 Weiterentwicklungen zielen auf die größeren erforderlichen Speicherkapazitäten, höhere Reichweiten durch Steigerung der Speicherdichte und die Brandsicherheit auch bei Unfällen.
- SW 98 Die mit den gegenwärtigen Speicherdichten erzielbaren Reichweiten kommen noch nicht annähernd an die mit einer Tankfüllung Kraftstoff zurückzulegenden Strecken heran.
- SW 99 Dazu kommt, dass die Ladezyklen erheblich länger dauern, als die Betankung mit Kraftstoff.
- SW 100 Einer der verfolgten Lösungsansätze ist ein dichtes Netz von Schnell-Ladestationen.
- SW 101 Wenn Akkumulatoren je nach Energieangebot abwechselnd mit Brennstoffzellen genutzt werden sollen, ist ein anderer Ansatz besonders interessant, bei dem entladene Leihakkumulatoren an Tankstellen durch geladene Akkus komplett getauscht werden. Dies ist in Minutenschnelle machbar und würde wahlweise auch den Einsatz von kompatiblen Modulen mit Wasserstofftank und Brennstoffzelle ermöglichen.
- SW 102 Wegen der geringen Entladeverluste fällt kaum Abwärme an, deshalb sind effiziente Konzepte für die Vermeidung friererender Fahrzeuginsassen gefragt.
- SW 103 Ein ernstzunehmendes Problem ist in der Begrenztheit der weltweiten Lithiumvorkommen zu sehen, das Metall gehört zu den seltenen Stoffen.
- SW 104 Dies wird große Anstrengungen für eine Recyclingquote nahe 100 Prozent und für die Erschließung alternativer Stoffe bzw. Technologien erfordern.

SW 106 **3. Prozesswärme aus Strom (PS)**

- SW 107 Prozesswärme aus Brennstoffen mit einem Anteil von 41,2 Prozent an der gesamten Wärmebereitstellung wurde im Jahr 2005 in Haushalten (Kochen, Backen...), in der Industrie (Metallgewinnung, Kunststoffherstellung...), und in Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (Schweißen, Trocknen...) verwendet.[187].
- SW 108 Sie unterscheidet sich durch Temperaturen oberhalb 100°C vom Niedertemperatur-Wärmebedarf unterhalb 100°C (Raumwärme, Warmwasserbereitung mit einem Anteil von 58,8 Prozent [187]).
- SW 109 Der künftige Energiemix unterliegt einer großen Zahl von Einflüssen und lässt sich heute kaum seriös einschätzen, deshalb wird hier von einem gleichbleibenden Mengenverhältnis zwischen Prozess- und NT-Wärme ausgegangen.
- SW 110 Bei Übergang auf vollständig erneuerbare Energien aus heimischen Quellen wird das begrenzte Angebot an Holz und anderen Bioenergien bei weitem nicht ausreichen, um die großen, heute verfeuerten Brennstoffmengen zu ersetzen.
- SW 111 Um diese Lücke zu füllen, bietet sich Strom an, der sich mit Wirkungsgraden von annähernd 100 Prozent in Prozesswärme besonders hoher Qualität wandeln lässt.

SW 113 **3.1. Nutzungs-Umfang PS**

SW 114 **Status**

- SW 115 Der Status ist mit 0 anzusetzen, da im Referenzjahr definitionsgemäß noch keine Substitution von Brennstoffen durch Strom erfolgt ist.

SW 117 **Ziel-Ansatz**

- SW 118 Während im Bereich Niedertemperaturwärme durch verstärkten Wärmeschutz und beim Verkehr durch Umstellung auf Elektroantriebe hohe Effizienzgewinne zu erzielen sind, wird dies beim Strom und bei der Prozesswärme schwieriger sein.
- SW 119 Um die Auswirkungen der erforderlichen Energieeinsparung auf die Wirtschafts- und Lebensweise möglichst klein zu halten, wird es also darauf ankommen, vor allem bei Prozesswärme und den herkömmlichen Stromanwendungen möglichst hohe Deckungsgrade zu erzielen.
- SW 120 Daher wird empfohlen, nach der Bereitstellung von ausreichend Energie für Niedertemperaturwärme und Verkehr eine Angleichung der Deckungsgrade von Strom und Prozesswärme anzustreben.

SW 122 **3.2. Technologische Perspektiven (PS)**

SW 123 Prozesswärme-Bereitstellung mit Strom ist in den meisten Bereichen Stand der Technik, vorteilhaft wird sich die im Vergleich zu Brennstoffen hervorragende Regelbarkeit, Verlustarmut und Sauberkeit erweisen.

SW 124 Da insgesamt erheblich weniger Energie für Prozesswärme zur Verfügung stehen wird, kommt es sehr auf energieeffiziente Prozesse, sparsam herstellbare und langlebige Produkte und insgesamt die Vermeidung von Verschwendung in jeder Hinsicht an.

SW 125 Günstig für den Ausgleich von Schwankungen im Energieangebot und auch in ökonomischer Hinsicht wäre eine Betriebsführung in Abhängigkeit vom Stromangebot bei solchen Prozessen, die nicht unbedingt auf kontinuierlichen Betrieb angewiesen sind.

SW 127 **4. Elektrische Niedertemperaturwärme (EN)**

SW 128 Der größte Teil von Niedertemperatur-Wärme bis 100°C für Raumwärme und Warmwasser wird heute durch Brennstoffe und etwas Solar-/Umgebungswärme erzeugt (wird hier unter 'NT-Wärme' bilanziert).

SW 129 Zusätzlich wurde im Referenzjahr 2010 in Deutschland aber 10,5 Prozent des verbrauchten Stromes genutzt, um Niedertemperatur-Wärme zu erzeugen [194] (ist implizit in der Bilanz unter 'Strom' enthalten).

SW 130 Es erscheint wenig sinnvoll, NT-Wärme mit Temperaturen unter 100°C auch künftig weiter mit der hochwertigen Energieform Strom zu erzeugen, prädestiniert dafür ist die Nutzung der Solarstrahlung mit Flachkollektoren und der Umgebungswärme mit Erdkollektoren und Wärmepumpen.

SW 131 Aus diesem Grund wird empfohlen, den weitgehenden **Ersatz** der heutigen **elektrischen NT-Wärmebereitstellung** durch Solar- und Umgebungswärme vorzusehen.

SW 132 Vereinfachend wird hier angenommen, dass durch die Substitution keine Veränderungen im Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung zu berücksichtigen sind (dargestellt durch vorher und nachher 100 Prozent).

SW 134 Zur Errechnung der Energiemenge, die künftig die Strombilanz entlastet und die Niedertemperaturwärme belastet, kann nicht einfach vom absoluten Statuswert ausgegangen werden.

SW 135 Da das 100-Prozent-Ziel in der Regel neben dem Ausbau der Erneuerbaren Energien auch eine Verminderung des Verbrauchs erfordern wird, kann man annehmen, dass etwa im selben Maß wie der gesamte Stromverbrauch auch der Verbrauch an Niedertemperatur-Wärme vermindert wird.

SW 136 Der nach der erforderlichen Verbrauchsminderung verbleibende Wärmebedarf, der bisher mit Strom gedeckt wurde, lässt sich dann ganz oder teilweise durch Niedertemperaturwärme aus Solarthermie oder Umgebungswärme substituieren [197].

SW 137 Die Substitution schlägt sich in einer Verringerung des Deckungsgrad-Maßstabes für Strom und in einer Erhöhung des Maßstabes für Niedertemperatur-Wärme nieder [199], die Bilanzwerte bleiben dagegen unverändert.

SW 139 **4.1. Nutzungs-Umfang EN**

SW 140 **Status**

SW 141 Als Statuswert für den Nutzanteil Niedertemperaturwärme am gesamten Stromverbrauch wird mit 10,5 Prozent der deutsche Durchschnitt 2010 vorgelegt [129]. Werden nicht alle 4 Verbrauchssektoren in die Betrachtung einbezogen, gelten entsprechend veränderte Werte.

SW 143 **Ziel-Ansatz**

SW 144 Ohne Substitutions-Maßnahmen kann davon ausgegangen werden, dass der relative Anteil Niedertemperaturwärme am gesamten konventionellen Stromverbrauch konstant bei 10,5 Prozent bleiben würde.

SW 145 Um aber die hochwertige Energieform Strom für anspruchsvollere Anwendungen frei zu bekommen, kann der Zielwert reduziert werden, für eine optimale Entlastung bis auf 0 Prozent.

SW 147 **4.2. Technologische Aspekte (EN)**

SW 148 Technologisch ist die Umstellung kein Problem.

SW 149 Die praktische Umsetzung stellt allerdings höhere Anforderungen, da beispielsweise die Zapfstellen der heute häufig dezentral angeordneten Warmwasserbereiter durch Rohrleitungen mit dem zentralen Wärmespeicher im Gebäude bzw. im Wohnbezirk verbunden werden müssen.

SW 151 **5. Anhang**

SW 152 [Anhang A: Wertetabelle](#)

SW 153 [Anhang B: Verkehr](#)

SW 154 [Anhang C: Elektrofahrzeuge](#)

SW 155 [Anhang D: Energieverbrauch](#)

SW 157 **6. Endnoten**

SW 159 Wikipedia; "Elektroauto"; Stand 06.07.2010 - als Orientierungswerte verwendet (siehe Anhang C: Elektrofahrzeuge).

<http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto>

Mittlere Wirkungsgrade von PKW-Verbrennungsmotoren, zusammen mit Getriebe: 23,5 % bei Dieselmot., 14 % bei Benzinmot., bei etwa gleichen Anteilen am Verbrauch (siehe [153]) liegt der Durchschnitt bei etwa 18,75 %.

Elektromotoren liegen im Wirkungsgrad dagegen bei 95 %, wobei aufgrund des nicht erforderlichen Schaltgetriebes weitere Verluste entfallen und die Verluste des elektronischen Fahrreglers durch Gewinne aus der Nutzbremmung mehr als aufgewogen werden; somit würde eine 5,1-fache Effizienz erreicht.

Selbst, wenn man konservativ nur von einer 4-fachen Effizienz gegenüber den heutigen Verbrennungsmotoren ausgeht, würden die Elektromotoren für die Erzielung der heutigen Verkehrsleistung nur 25 % der Energie benötigen.

SW 165 Martin Pehnt, Ulrich Höpfner; "Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive"; Kurzgutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); ifeu-Institut; Mai 2009 - Seite 21:

Wirkungsgrade nach dem Technologiestand 2010+.

http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu_kurzstudie_elektromobilitaet_wasserstoff.pdf

Fortgeschrittene alkalische Hochdruck-Elektrolyse: 57 bis 64 % (inklusive Speicherung 92% und Transport 95 %), Fahrzeug-Brennstoffzelle inklusive E-Motor und Rekuperator: 38 bis 41 %.

Aus den Angaben von [165] errechneter Wirkungsgrad über die gesamte Kette: 21,66 bis 26,24 %.

Bei verbrauchernaher Erzeugung entfallen die Transportverluste, daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad für Elektrolyse und Speicherung von 60 bis 67,4 %.

Bei einem angenommenen Wirkungsgrad für E-Motor und Rekuperator von 90 % ergibt sich für die Brennstoffzelle allein ein Wirkungsgrad von 42,2 bis 45,6 %, für die gesamte Kette Strom - Wasserstoff - Strom 25,3 bis 30,7 %.

SW 172 Dr. Ulf Bossel; "Wasserstoff löst keine Energieprobleme"; erschienen in "Technologiefolgenabschätzung - Theorie und Praxis" No. 1, 15. Jahrgang ; April 2006 - Seite 30.

<http://www.efcf.com/reports/D06.pdf>

56 % Verlust für Wasserstoffelektrolyse an Tankstellen einschließlich Wasseraufbereitung, Kompression, Gebäudeenergiebedarf usw. bezogen auf die Energie des erzeugten Wasserstoffs, dazu kommt ein Wirkungsgrad von 50 % für die Rückverstromung in Brennstoffzellen, zusammen ergibt das für die gesamte Kette Strom - Wasserstoff - Strom einen Wirkungsgrad von 32,1 %.

SW 176 J. Schindler u. a. ; "Wasserstoff und Brennstoffzellen - starke Partner erneuerbarer Energiesysteme"; 2. überarbeitete Auflage 2008; Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband / LBS Ludwig Bölkow Stiftung GmbH - Seite 22.

<http://www.dww-info.de/publikationen/2008/partner2.pdf>

Künftig erwartete Wirkungsgrade von 35 bis 40 % für Hochdruckelektrolyse und Fahrzeug-Brennstoffzellen über die Wandlungskette Strom - Wasser - Strom.

SW 180 Quelle [165]:

Lade-/Entlade-Wirkungsgrade stationär (die Angaben speziell für Verkehr sind unvollständig, dürften aber auf vergleichbarem Niveau liegen): Bleiakku von 65% bis 79%, Lithium-Ionen-Akku von 90% bis 95%.

SW 183 T. Klaus/C. Vollmer/K. Werner/H. Lehmann/K. Müschen, Umweltbundesamt; "Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen"; Vorabdruck für die Bundespressekonferenz am 7. Juli 2010. [42] - Seite 47 ff:

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf>

eE-Methan-Speichersystem - Wirkungsgrad für die Methanisierung liegt bei 75 bis 85%, durch Rückgewinnung eines Teils der Abwärme ist bereits ein Wirkungsgrad von 82% erreicht worden, mit Upscaling sind voraussichtlich 85% möglich.

- SW 187 BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.; "Endenergieverbrauch in Deutschland 2007"; 12.2008 im Stand vom 28.07.2009.
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65>
 Endenergie in Mio. t SKE gemäß Tafel 1.2 (siehe Anhang D: Energieverbrauch): Raumwärme 82, Warmwasser 14,5, zusammen 96,5 Niedertemperaturwärme < 100°C; Prozesswärme > 100°C 67,7, insgesamt 164,2 Wärme; davon 58,8 Prozent Niedertemperaturwärme < 100°C und 41,2 Prozent Prozesswärme > 100°C.
 Bereits elektrisch erzeugte Prozesswärme ist hier nicht berücksichtigt, da für den Teil keine Substitution erforderlich ist.
- SW 191 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.; "Anwendungsbilanzen für die Energiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010"; 16.11.2011, Stand der Zusammenfassung 10.1.2012.
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=255>
- SW 194 Quelle [191]: 1858,7 Petajoule Stromverbrauch Deutschland 2010 (siehe Anhang D: Energieverbrauch, Tabelle 15), 109,2 Petajoule davon für Raumwärme und 86,5 Petajoule für Warmwasser, ergibt zusammen 195,7 Petajoule für mit Strom erzeugte Niedertemperaturwärme < 100°C, das sind 10,5 % vom gesamten Stromverbrauch.
 Ist die Betrachtung auf den Haushaltssektor beschränkt, wurden 27,3 % vom gesamten Stromverbrauch für Niedertemperaturwärme aufgewendet, im Haushalts- und Gewerbesektor zusammen 18,5 %, im Haushalts-, Gewerbe- und Industriesektor zusammen 10,7 %.
- SW 197 Berechnungsansatz in 100prosim: Zur Zielzeit substituierte Energiemenge = Stromverbrauch zur Zielzeit * (Nutzanteil elektr.NT-Wärme Status - Nutzanteil elektr.NT-Wärme Ziel).
- SW 199 Darstellung in 100prosim: In Tabelle EN im untersten Block rechts, Zeile "*%vom heutigen Gesamtbedarf*" sind die als Maßstab dienenden grünen Werte bei Strom, Wärme und NT-Wärme entsprechend der substituierten Energiemenge angepasst, Erläuterung dazu in Fußnote ²⁾. Im Diagramm EV ist die substituierte Energiemenge in den Zielsäulen von Strom und NT-Wärme hellgrau dargestellt.

Anhang A: Wertetabelle

Bedeutung	räumlich	zeitlich	Textbezug	Einheit	Basis/Status	Ziel
Strom-Wandlung - Basisdaten für 100%-Szenarien			SW5	Version:	120802	
1. Langzeit-Stromspeicher (LS)						
Umfang:						
Anteil Ladestrom für Langzeit-Stromspeicher (bezogen auf regenerativ erzeugte Strommenge).	Refreg.	2010	SW52	Prozent	0	
	Zielreg.	Zielzeit	SW60	Prozent		50
Wirkungsgrad						
Wirkungsgrad für Langzeit-Stromspeicherung im Mittel	Refreg.	2010	SW66	MWh/ha/a	22	
	Refreg.	Zielzeit	SW66	MWh/ha/a		30
Nutzungsgrad Abwärme bei Langzeit-Stromspeicherung im Mittel	Refreg.	2010	SW75	MWh/ha/a	0	
	Refreg.	Zielzeit	SW75	MWh/ha/a		20
2. Elektrofahrzeuge (EF)						
Umfang:						
Anteil Ladestrom für Akku-betriebene Fahrzeuge (bezogen auf regenerativ erzeugte Strommenge).	Zielreg.	2007	SW85	Prozent	0	
	Zielreg.	Zielzeit	SW88	Prozent		-
Wirkungsgrad						
Wirkungsgrad Ladung und Entladung von Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen.	Refreg.	2007	SW93	MWh/ha/a	65	
	Refreg.	Zielzeit	SW93	MWh/ha/a		90
3. Prozesswärme aus Strom (PS)						
Umfang:						
Anteil Strom zur Substitution bisher eingesetzter Brennstoffe (bezogen auf regenerativ erzeugte Strommenge).	Refreg.	2007	SW115	Prozent	0	
	Zielreg.	Zielzeit	SW120	Prozent		-
Wirkungsgrad						
Wirkungsgrad der Wandlung von Strom in Prozesswärme.	Refreg.	2007	SW111	MWh/ha/a	100	
	Refreg.	Zielzeit	SW111	MWh/ha/a		100
4. Elektrische Niedertemperaturwärme (EN)						
Umfang:						
Anteil Strom für Niedertemperatur-Wärme (bezogen auf konvent. Stromverbrauch).	Refreg.	2007	SW141	Prozent	10,5	
	Zielreg.	Zielzeit	SW145	Prozent		-
Wirkungsgrad						
Wirkungsgrad der solarthermischen Bereitstellung relativ zur elektrischen Erzeugung.	Refreg.	2007	SW132	MWh/ha/a	100	
	Refreg.	Zielzeit	SW132	MWh/ha/a		100

Anhang B: Verkehr

prognos, öko-Institut; "Endbericht Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken"; im Auftrag des WWF, Langfassung, 15.10.2009

<http://www.slideshare.net/wwfdeutschland/modell-deutschland-endbericht>

Tabelle 4.3-31: Energieverbrauch von PKW und Kombi nach Antriebsarten 2005 in PJ

Tabelle 4.3-33: Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs nach Antriebsarten 2005 in PJ

Tabelle 4.3-34: Energieverbrauch des Straßenverkehrs 2005 in PJ

Tabelle 4.3-36: Bestimmungsgründe und Energieverbrauch für den Eiseisenbahnpersonenverkehr 2005 in PJ

Tabelle 4.3-37: Bestimmungsgründe und Energieverbrauch für den Schienengüterverkehr 2005 in PJ

Tabelle 4.3-38: Energieverbrauch im Schienenverkehr insgesamt 2005 in PJ

Tabelle 4.3-41: Energieverbrauch im Verkehr insgesamt 2005 in PJ

Tabelle Nr.:	4.3-31	4.3-33	(<i>errech.</i>)	4.3-34	4.3-36	4.3-37			4.3-38		4.3-41		(<i>errechn.</i>)	(<i>errechn.</i>)	
	PKW, Kombi	Güterverkehr	<i>sonstige</i>	Straßenverkehr	Nahverkehr	Fernverkehr	Personenverkehr	Güter- transp.	örtliche Leistung.	Güter- verkehr	Schienen- verkehr	Binnen- schiff.	Luft- verk.	Verkehr gesamt**	Anteile von
Benzin, ohne Hybrid	1062	13,8	-50,8*	1025										1025	39,1
Benzin, Hybrid	0		0											0	0,0
Dieselantrieb	457	660,6	6,4	1124	12,1	0,6	12,7	4,7	1,5	6,2	18,9	13		1168,6	44,6
Erdgasantrieb	1	0,5	0,5	2										2	0,1
Flüssiggasantrieb	1	0,1	0,9	2										2	0,1
Elektroantrieb	0	0	0	0										0	0,0
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	0										0	0,0
Netzstrom					15,3	8,6	23,9	11,8	16,1	27,9	51,8			75,7	2,9
Flugtreibstoffe													345	345	13,2
Gesamt Energieverbrauch	1521	675	7,8	2153	27,4	9,2	36,6	16,5	17,6	34,1	70,7	13	345	2618,3	100,0
Anteile in % von Gesamt:	58,1	25,8	0,3	82,2	1,0	0,4	1,4	0,6	0,7	1,3	2,7	0,5	13,2	100,0	

*Eine der Zahlen PKW/Kombi oder Straßenverkehr muss falsch sein.

**Die Summenwerte in Tabelle 4.3-41 weichen teilweise von den rechnerischen Werten ab, wegen Konsistenz werden letztere angesetzt.

Anhang C: Elektrofahrzeuge

Wikipedia; "Elektroauto"; Recherche am 06.07.2010

<http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto>

Treibstoff	Energiedichte [kWh/kg]	Antriebskomponente	mittlerer Wirkungsgrad	Gesamtmasse des Energiespeichers in kg für 100 kWh nutzbare Energie
Strom aus Bleiakкумуляtor	0,03	Elektromotor	95 %	2700
		mit Nutzbremse	bis zu 97 %	
Strom aus Lithium-Ionen-Akkumulator	0,13	Elektromotor	95 %	623
		mit Nutzbremse	bis zu 97 %	
Dieselkraftstoff	11,8	Dieselmotor	25 %	36 (+50 Tankbehälter)
		mit Getriebe	23,5 %	
Superbenzin	12	Ottomotor	15 %	59 (+50 Tankbehälter)
		mit Getriebe	14 %	
Flüssiger Wasserstoff	33,3	Wasserstoffspeicherung		8,3 (+600 Tanksystem (schwerer „Tank“))
		Brennstoffzelle PAFC	38 %	
		Elektromotor	95 %	

Anhang D: Energieverbrauch

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.; "Anwendungsbilanzen für die Energiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010"; 16.11.2011, Stand der Zusammenfassung 10.1.2012.
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=255>

Tabelle 13
Struktur des gesamten Endenergieverbrauchs 2010

	Wärmeanwendungen				Kälteanwendungen			MECHAN. ENERGIE	IKT	BELEUCHTUNG	Summe EEV
	Raumwärme	Warmwasser	sonst. Prozess-W.	WÄRME gesamt	Klima-kälte	sonst. Prozess-K.	KÄLTE gesamt				
	Peta Joule										
Haushalte	1897,5	314,4	136,2	2348,2	0	97	97	11,7	83,9	42,4	2583,2
GHD	676,2	57,1	105,8	839,1	10	32,8	42,8	215,7	76,2	204,7	1378,5
Industrie	195,7	22,6	1666,7	1885	16,7	17,7	34,4	552,7	31,8	37,5	2541,5
Verkehr	13	0	0	13	2,6	0	2,6	2518,1	10,5	12,8	2556,9
GESAMT	2782,5	394,1	1908,7	5085,3	29,3	147,5	176,8	3298,3	202,4	297,4	9060,2

Tabelle 15
Struktur des gesamten Stromverbrauchs 2010

	Wärmeanwendungen				Kälteanwendungen			MECHAN. ENERGIE	IKT	BELEUCHTUNG	Summe EEV
	Raumwärme	Warmwasser	sonst. Prozess-W.	WÄRME gesamt	Klima-kälte	sonst. Prozess-K.	KÄLTE gesamt				
	Peta Joule										
Haushalte	67,2	71,5	133,8	272,5	0	97	97	11,7	83,9	42,4	507,6
GHD	35,9	12,3	25,1	73,3	8	32,3	40,3	109,9	76,2	204,7	504,4
Industrie	3,1	2,7	135	140,8	16,7	17,7	34,4	542,6	31,8	37,5	787,3
Verkehr	3	0	0	3	0,1	0	0,1	50,3	3	3	59,4
GESAMT	109,2	86,5	294	489,7	24,7	147,1	171,8	714,6	194,9	287,7	1858,7
	6,16	% Anteil Strom an NT-Wärme				97,2 % Anteil Strom an Kälte					

Berechnung auf Grundlage von Tabelle 13
Anteile Niedertemperatur- und Prozesswärme an Wärme gesamt 2010

	Raumwärme	Warmwasser	sonst. Pr.wärme	WÄRME gesamt	Klima-kälte	sonst. Prozess-K.	KÄLTE gesamt	*
von Tabelle 13:	1897,5	314,4	136,2	2348,2	0	97	97	
" + G H D	2573,7	371,5	242	3187,3	10	129,8	139,8	
" + Industrie	2769,4	394,1	1908,7	5072,3	26,7	147,5	174,2	
Gesamt	2782,5	394,1	1908,7	5085,3	29,3	147,5	176,8	Petajoule (von Tabelle 13 Summe EEV)
	Niedertemp.-Wärme		Prozess-Wärme		Wärme			
Haushalte	2211,9		136,2		2348,1			Petajoule (Raumw.+Warmw.=NT-Wärme)
	94,2	5,8			100,0			Prozent von Wärme gesamt
" + G H D	2945,2		242		3187,2			Petajoule (Raumw.+Warmw.=NT-Wärme)
	92,4	7,6			100,0			Prozent von Wärme gesamt
" + Industrie	3163,5		1908,7		5072,2			Petajoule (Raumw.+Warmw.=NT-Wärme)
	62,4	37,6			100,0			Prozent von Wärme gesamt
Gesamt	3176,6		1908,7		5085,3			Petajoule (Raumw.+Warmw.=NT-Wärme)
	62,5	37,5			100,0			Prozent von Wärme gesamt

* Kälte wird zum größten Teil mit Strom erzeugt und ist daher bereits im Strom enthalten.

Berechnung auf Grundlage von Tabellen 13 und 14
Stromanteil an Niedertemperatur- und Prozesswärme 2010

	Niedertemp.-Wärme		Prozess-Wärme		Wärme		Verkehr	
	Gesamt	Strom	Gesamt	Strom	Gesamt	Strom	Gesamt	Strom
Haushalte	2211,9	138,7	136,2	133,8	2348,1	272,5		
	6,3		98,2		11,6			Petajoule Gesamt und Strom
								Prozent Anteil Strom
" + G H D	2945,2	186,9	242	158,9	3187,2	345,8		
	6,3		65,7		10,8			Petajoule Gesamt und Strom
								Prozent Anteil Strom
" + Industrie	3163,5	192,7	1908,7	293,9	5072,2	486,6		
	6,1		15,4		9,6			Petajoule Gesamt und Strom
								Prozent Anteil Strom
Gesamt	3176,6	195,7	1908,7	294	5085,3	489,7	2556,9	59,4
	6,2		15,4		9,6		2,3	Petajoule Gesamt und Strom
								Prozent Anteil Strom

Berechnung auf Grundlage von Tabelle 14
Anteil elektrisch erzeugter Niedertemperaturwärme am Stromverbrauch 2010

	Stromverbrauch		Petajoule
	Gesamt	NT-Wärme	
Haushalte	507,6	138,7	
	27,3		Prozent
" + G H D	1012	186,9	
	18,5		Prozent
" + Industrie	1799,3	192,7	
	10,7		Prozent
Gesamt	1858,7	195,7	
	10,5		Prozent