



---

*Bodo M. Wolf<sup>1</sup> und Claudia Hain<sup>1</sup>*

## **Wärmeversorgung und Energiewende**

**Vortrag auf dem Kolloquium „Energiewende 2.0: Die ambivalente ‚Wärme‘ im Fokus der Wissenschaft und Wirtschaft, der Technik und Technologie“ am 19. Mai 2017 in Berlin**

*Veröffentlicht: 26. 08. 2017*

---

Die Temperaturen in den erdnahen Luftschichten und den Ozeanen steigen und Eis- und Schneebe-  
stände schrumpfen regional unterschiedlich mit negativen Folgen auf das Klima. Ursachen dafür sind  
störende, meist zyklisch auftretende Ereignisse im Weltraum und im Erdinneren, aber auch Verhal-  
tensweisen des Menschen, die er ändern kann und muss, wenn er nicht seine eigenen Lebensgrund-  
lagen in der Biosphäre zerstören will.

Die Frage ist: Was muss der Mensch ändern? Eine Antwort ist: Er muss aufhören, die potenzielle  
Energie der fossilen und atomaren Brennstoffe freizusetzen, also Kohle, Öl, Gas zu verbrennen, Kern-  
spaltung und -fusion zu betreiben, und durch Bebauung intensive thermische Absorptionsflächen zu  
schaffen, und stattdessen dazu übergehen, seinen Energiebedarf mit solar-regenerativer Energie zu  
decken. Das ist der Auftrag der Energiewende.

Der Begriff Energiewende wurde im Zusammenhang mit der Entwicklung der Stromerzeugung  
über Photovoltaik- und Windkraftanlagen geboren. Der Zusammenhang ist einfach. Verfügbar wur-  
den Technologien, die Strom ohne Verbrennung fossiler oder Spaltung atomarer Brennstoffe ermög-  
lichen und damit die Chance auf eine umweltfreundlichere Erzeugung von Strom eröffneten. Deshalb  
wird in der Allgemeinheit Energiewende mit Stromwende gleichgestellt. Praktisch heißt das, Wind-  
und Photovoltaikanlagen drängen konventionelle Dampf- und Gaskraftwerke, die aber beim derzeiti-  
gen Stand der Technik erhalten bleiben müssen, weil Sonnen- und Windenergie nicht bedarfsgerecht  
zur Verfügung stehen, vom Markt und verschlechtern deren Ökonomie. Die Stromspeicherung wurde  
und wird dabei ungenügend entwickelt und ihre Bedeutung bewusst ausgeblendet.

Die Folge sind ständig steigende Umlagen und Subventionen, die über steigende Strompreise und  
Steuern refinanziert werden müssen. Das und die nach wie vor strittige Frage, ob die Erde sich tat-  
sächlich wegen eines CO<sub>2</sub>-bedingten Treibhauseffektes oder aus anderen Gründen erwärmt, lassen  
befürchten, dass die Energiewende mit großen ökonomischen Verlusten politisch scheitert. Zu klären  
ist uneindeutig, ob das Kohlendioxid in der Atmosphäre Ursache oder Folge der Erderwärmung ist.  
Bild 1 lässt vermuten, dass die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre primär eine Funk-  
tion der mittleren Temperatur der Biosphäre, insbesondere der Ozeane ist.

---

<sup>1</sup> **bw-energiesysteme GmbH** Bad Saarow; <http://www.bw-energiesysteme.de/>

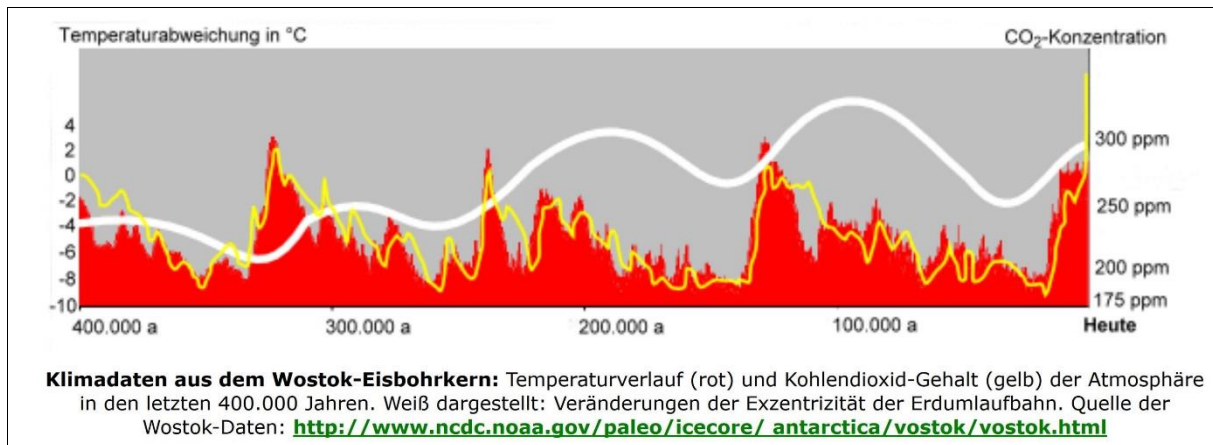


Bild 1: Korrelation von Umgebungstemperatur und Kohlendioxidkonzentration<sup>2</sup>

Soll der menschliche Einfluss auf die Erwärmung der Biosphäre reduziert werden, muss die Energiewende rein ökonomisch begründet werden, wobei die Kosten des Umweltschutzes und die Subventionen für die konventionelle Energiewirtschaft einzupreisen sind. Besonderen Einfluss nimmt der Mensch auf den Zustand der Biosphäre über die Freisetzung von potenzieller Energie der fossilen und atomaren Brennstoffe und seine Bodennutzung.

Zur Ermittlung des praktischen Handlungsbedarfs der Energiewende müssen allen Sektoren der Energieversorgung mit dem Ziel analysiert werden, Synergieeffekte zu erkennen und zu erschließen. Es zeigt sich, dass der effektivste Weg der Energiewende nicht der Stromsektor, sondern die „Wärmewende“ ist.

### Strategie für die Fortsetzung der Energiewende

Entsprechend den Lehren der Technischen Thermodynamik ist Energie ein Mix aus Exergie (arbeitsfähiger Energie) und Anergie (nicht arbeitsfähiger Energie). Die Grenze zwischen beiden ist die Umgebungstemperatur und das Maß der Arbeitsfähigkeit der Energie ist ihre mittlere Temperaturdifferenz über der jeweiligen Umgebungstemperatur. Potentielle, chemische und atomare Energie, aber auch elektrische Energie und solare Strahlung gelten als Exergie. Die Umwandlung der Exergie über thermische Prozesse ist zwangsläufig verbunden mit einer exergetischen Abwertung, d. h. mit der Umwandlung von Exergie in fühlbare und latente Wärme, entsteht einen Mix aus Exergie und Anergie. Für die Nutzung der fossilen Brennstoffe bei der thermischen Umwandlung hat das zur Folge, dass selbst die kombinierten Gas- und Dampfkraftprozesse von der als Exergie eingesetzten Brennstoffwärme nur ca. 60 % erhalten. 40 % der Brennstoffwärme werden im Zuge ihrer Umwandlung selbst im Hocheffizienzkraftwerken in Anergie umgewandelt. Im Durchschnitt der konventionellen Stromerzeugung sind das mehr als 60 % und bei der Umwandlung von Brennstoffwärme in Heizwärme mehr als 80 %, d. h. der Exergieanteil der Heizwärme beträgt in der Regel weniger als 20 % und 80 % der Heizwärme sind Anergie mit Umgebungswärmeniveau.

Daraus ergibt sich der scheinbare Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung, nämlich der Verkauf von Heizwärme mit einem Anergieanteil von 80 %, die im Kraftwerk nicht an die Umgebung abgegeben werden muss, sondern erst beim Endkunden der Wärmeversorgung.

<sup>2</sup> Vgl. <http://www.oekosystem-erde.de/html/klimageschichte.html>, abgerufen am 23.06.2017

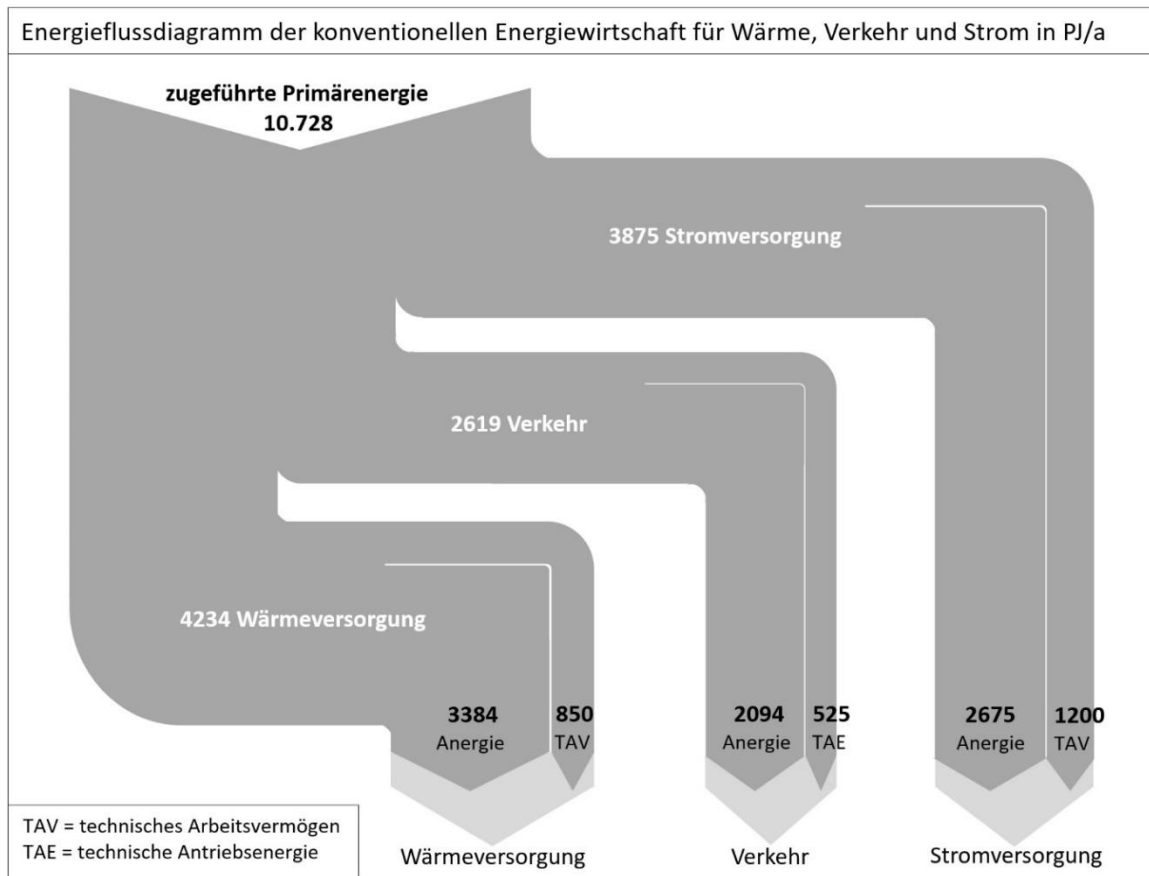


Bild 2: Sankey-Diagramm der konventionellen Energieumwandlung (Deutschland). Abgeleitet aus den Daten der AG Energiebilanzen für das Jahr 2015, veröffentlicht beim Umweltbundesamt. Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland ohne erneuerbare Energien, sonstige Energieträger und nichtenergetischen Verbrauch; Endenergieverbrauch für Wärmeversorgung und Verkehr.

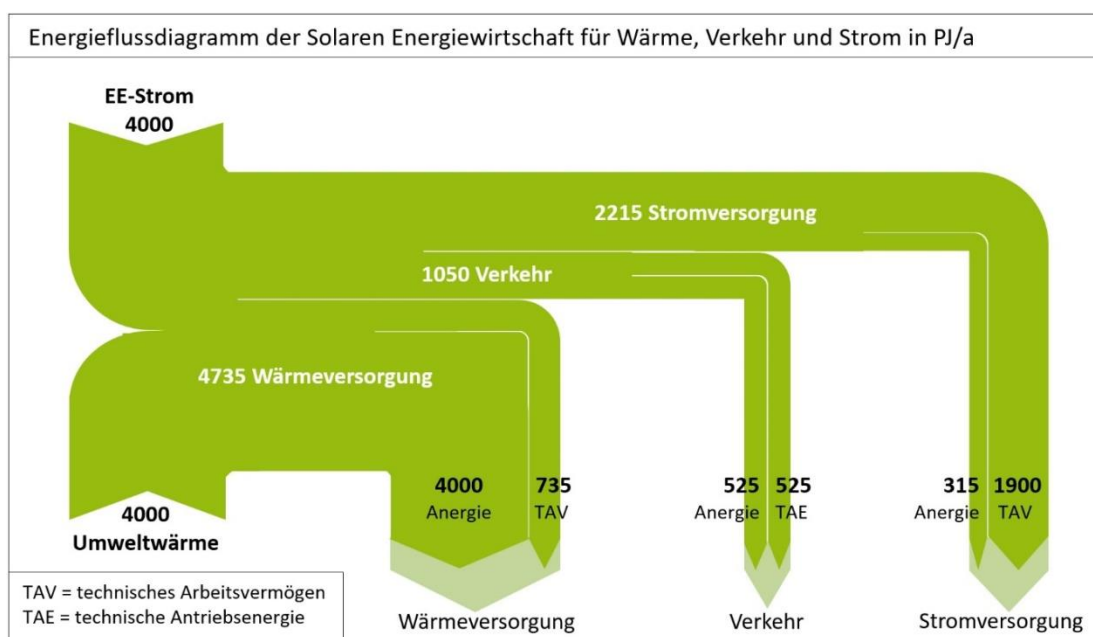


Bild 3: Sankey-Diagramm der solaren Stoff- und Energiewirtschaft (Deutschland). Abgeleitet aus den Daten der AG Energiebilanzen für das Jahr 2015, veröffentlicht beim Umweltbundesamt. Vollständiger Ersatz der fossilen und atomaren Brennstoffe für den Endenergiebedarf des Jahres 2015 für Wärmeversorgung, Verkehr und Stromversorgung durch Umweltwärme und regenerativ erzeugten Strom.

Der Energiefluss der Anwendung von fossilen und atomaren Brennstoffen über die Sektoren Wärme, Strom und Mobilität und der anteilige Exergie-Output lassen sich über Sankey-Diagramme gut darstellen.

Der Exergieanteil ist ein Qualitätsmerkmal der Nutzenergie, aus dem sich die Ansätze für eine zweckmäßige Sektorenkopplung ableiten lassen. Die entscheidende Aufgabe besteht deshalb darin, den von den Wind- und Photovoltaikanlagen gelieferten Strom bei der Speicherung in den Sektoren Strom und Mobilität so zu speichern, dass wenig in Anergie umgewandelt wird, und im Sektor Wärme so viel wie möglich Umgebungswärme aufzunehmen, mit so wenig wie möglich Exergie zu beladen und so zu Nutzenergie umzuwandeln.

### **Wärmewende**

Die Sankey-Diagramme lassen erkennen, dass die wirkungsvollste Maßnahme für die Energiewende die Wärmewende ist, also die Umstellung der Heizwärme- und Brauchwasserversorgung auf regenerative Energie mit Hilfe von Wärmepumpen. In diesem Sektor kann mehr als das Doppelte an fossiler Energie als im Sektor Strom durch die gleiche elektrische Arbeit aus Wind- und PV-Anlagen substituiert werden. Der Exergiebedarf dafür wird zwischen 250 und 300 TWh/a betragen, was eine installierte Leistung bei Photovoltaik- und Windkraftanlagen von 125 bis 150 GW für die Wärmewende erfordert.

Solare Strahlungsenergie kann beim Stand der Technik über Solarmodule direkt in Heizwärme oder durch Photovoltaikanlagen direkt in Strom umgewandelt werden. Bei der Direktumwandlung in Heizwärme sinkt die Leistung der Solarmodule mit steigender Vorlauftemperatur, die üblicherweise in der Hauswärmeversorgung 70 °C, in der Fernwärmeversorgung zwischen 90 und 120 °C erfordert. Damit fällt für die Fernwärmeversorgung der Einsatz von Solarmodulen praktisch aus und der Lösungsansatz ist die Kombination Photovoltaik mit Wärmepumpe. Die Aufgabe der Wärmeversorgung kann erprobterweise mit Hochtemperatur-Wärmepumpen gut realisiert werden. Gegenüber Power-to-Heat-Technologien, die reine Exergie in Form von Strom 1:1 in fühlbare Wärme des Heizwassers mit einem Exergieanteil unter 15 % umwandeln, d. h. eine sehr schlechte Energieeffizienz haben, ist der Einsatz von Wärmepumpen deshalb energetisch vorteilhaft. Mit weiterentwickelten Wärmepumpen könne aus 1 kWh Strom durchaus 5 kWh Heizwärme mit einer Vorlauftemperatur von 90 °C hergestellt werden.

Das Wiederbeleben von ineffizienten Power-to-Heat-Lösungen, wie sie vor 100 Jahren unter dem Begriff „Nachtspeicheröfen“ üblich waren, hat das Ziel, überschüssigen Strom teilweise zu nutzen und damit das kostenpflichtige Abschalten von Photovoltaik- und Windkraftanlagen zu reduzieren. Die entsprechende Wirksamkeit der Power-to-Heat-Anlagen wird erreicht durch die Speicherung von Heizwasser unter 100 °C in großen Warmwassertanks, was teure Druckwasserspeicher vermeidet und die Wärmeversorgung ein wenig unabhängig von der Verfügbarkeit regenerativer Energie macht. Allerdings reduziert der Einsatz von Wärmepumpen mit hoher Vorlauftemperatur und großer Leistung, z. B. 120 °C und 5 MW, gegenüber ineffizienten Power-to-Heat-Anlagen den Strombedarf auf bis zu 25 %. Erst diese Effizienz bringt die erforderliche Ökonomie für eine dauerhafte Umstellung des gesamten Wärmesektors auf Strom, der entgegen der Formulierung „Überschussstrom“ stets als knappes Gut zu begreifen ist.

Allerdings erfordern Wärmepumpen die Bereitstellung der restlichen 80 % der Heizenergie in Form von Umgebungswärme. Primäre Schwerpunkte der Energiewende in der Heizwärmeversorgung sind damit die Erschließung von Umgebungswärme und die Wärmespeicherung, aber auch die Integration der Wärmepumpen in die Wasserheizkreisläufe, was eine Absenkung der Rücklauftemperatur im Wärmeversorgungssystem erfordert.

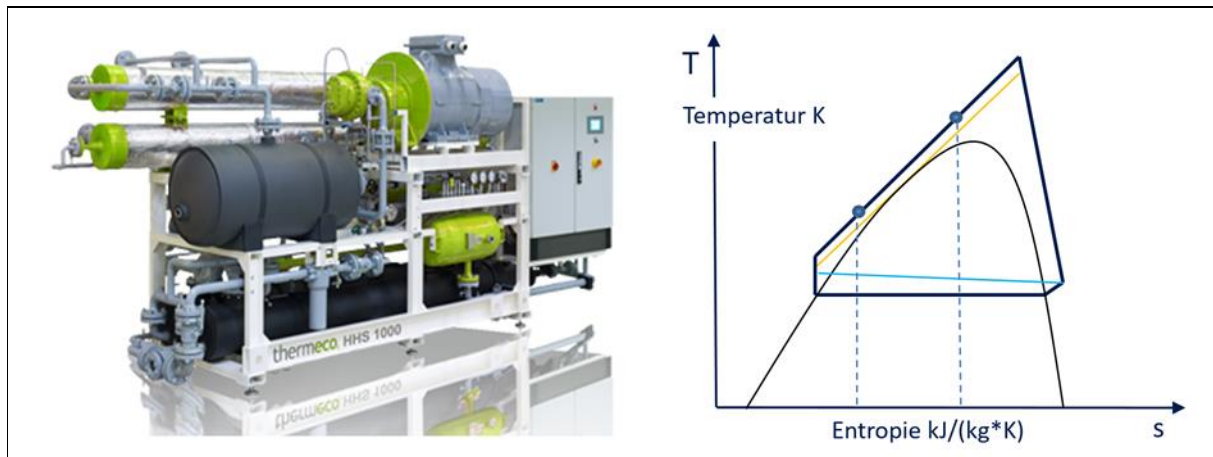


Bild 4: CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe der Dürr thermeco GmbH und Rücklaufauskühlung

Die Absenkung der Rücklauftemperatur kann die Effektivität der Wärmepumpen zwar verdoppeln, erfordert aber, z. B. in der Raumwärmeversorgung, meist eine Vergrößerung der Heizkörper. Bei Neubauten ist das weniger problematisch, kann aber bei der Umstellung von Bestandsanlagen durchaus kritisch sein.

Damit besteht die technische Aufgabe darin, die Heizkörper im Rücklauf mit Thermostaten auszustatten und zwischen Wärmenetz und Wärmepumpe eine Rücklaufauskühlung zu installieren.

Eine solche Rücklaufauskühlung kann mit einem Druckgaskreislauf erfolgen. Die Kombination Kompression/Expansion im Druckgaskreislauf ähnelt einem Turbolader aus der Fahrzeugindustrie, allerdings mit Zusatzantrieb. Der Vorteil dieser Kombination von Wärmepumpe und Rücklaufauskühlung besteht darin, dass das Wärmepumpenarbeitsmittel besser ausgekühlt wird, sodass seine Verdampfungsleistung im Wärmepumpenverdampfer und damit die Wärmepumpenkennzahl deutlich steigen.

Diese Maßnahmen zur Effizienzsteigerung helfen nicht darüber hinweg, dass sie nur wirksam werden, wenn gerade regenerative Energie zur Verfügung steht. Der zeitlich versetzte Wärmebedarf muss daher über Speicherung gedeckt werden. Die im Zusammenhang mit Power-to-Heat entstehenden Warmwasserspeicher können für den Lastausgleich in der Wärmeversorgung immer einen Beitrag leisten, d. h. sie können zeitweise die Wärmeversorgung übernehmen, auch wenn keine regenerative Antriebsleistung für Wärmepumpen zur Verfügung steht.

Das wiederum provoziert die Frage, ob es bessere Wärmespeichermethoden gibt als die Warmwasserspeicherung, deren spezifische Wärmekapazität lediglich an die Temperaturdifferenz der fühlbaren Wärme des Wassers gebunden ist. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Heizwasservor- und -rücklauf von 30 Kelvin sind das lediglich ca. 120 kJ/kg Wasser.

Absorptionsprozesse, z. B. auf Basis des Stoffpaares Natronlauge/Wasser, erreichen eine bis zu zwanzigmal höhere spezifische Wärmespeicherkapazität.

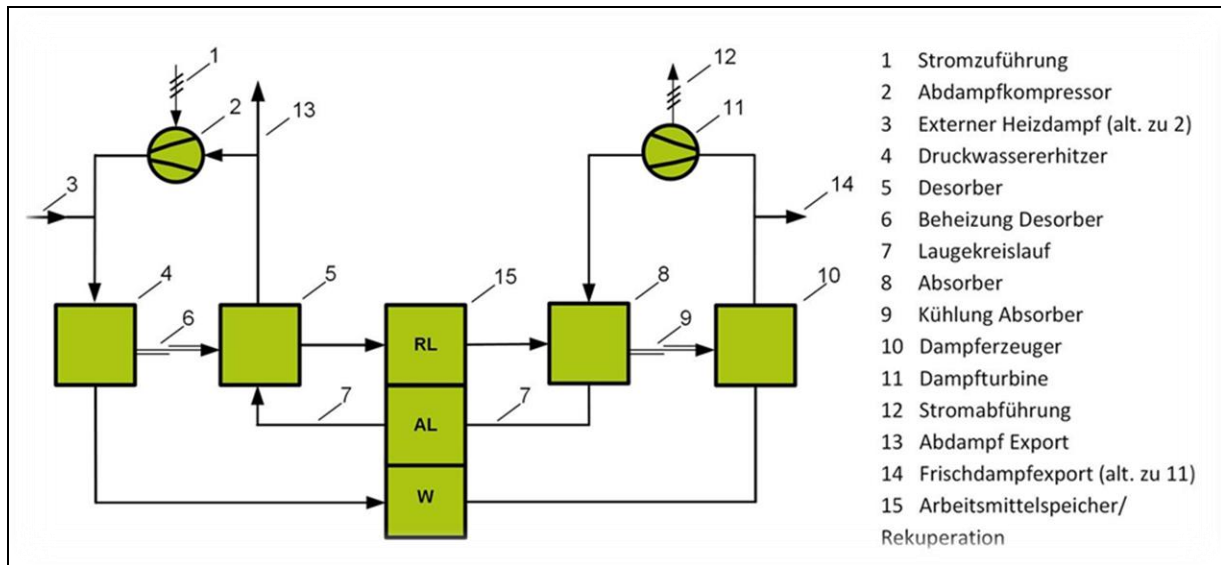


Bild 5: Das NaCompEx-Verfahren, der modifizierte Honigmann-Prozess

Das NaCompEx-Verfahren ermöglicht eine Vielzahl von speziellen Anwendungen. Ein solcher Absorptionsprozess für ein durch Abwärme angetriebenes Speicher-Kraftwerk mit dem Stoffpaar Wasser/Natronlauge ist wie folgt gekennzeichnet:

1. Lauge mit einem hohen Wassergehalt wird durch Abwärme oder eine Wärmepumpe beheizt und eingedampft auf einen niedrigeren Wassergehalt (Reiche Lauge).
2. Die Reiche Lauge wird unter Umgebungsdruck und -temperatur gespeichert.
3. Bei Nichtverfügbarkeit von regenerativer Energie wird die Reiche Lauge wieder unter Abgabe von Absorptionswärme, die im Wesentlichen der Kondensationswärme des Wassers entspricht, mit Wasserdampf beladen. Die Absorptionswärme dient dann der Wärmeversorgung und zum Teil der Stromerzeugung, mindestens in der Größenordnung des Eigenbedarfs der Wärmeversorgung.

Die Wärmeauskopplung kann bis zu  $7.500 \text{ kJ/m}^3$  Natronlauge erreichen. Das NaCompEx-Verfahren erfordert so ein Speichervolumen von weniger als 15 % im Vergleich zur Warmwasserspeicherung und ist damit durchaus eine Alternative auch zur Warmwasserspeicherung.

Die Nutzung von Industrieabwärme für die Heizwärmeversorgung ist seit Beginn der Industrialisierung ein Thema. Ein Hindernis für die Nutzung von Industrieabwärme war immer die meist nicht gegebene Synchronisation zwischen Anfall der Abwärme und bedarfsgerechter Wärmeversorgung, die nur über Wärmespeicher gesichert werden kann, aber zusätzliche Kosten verursacht.

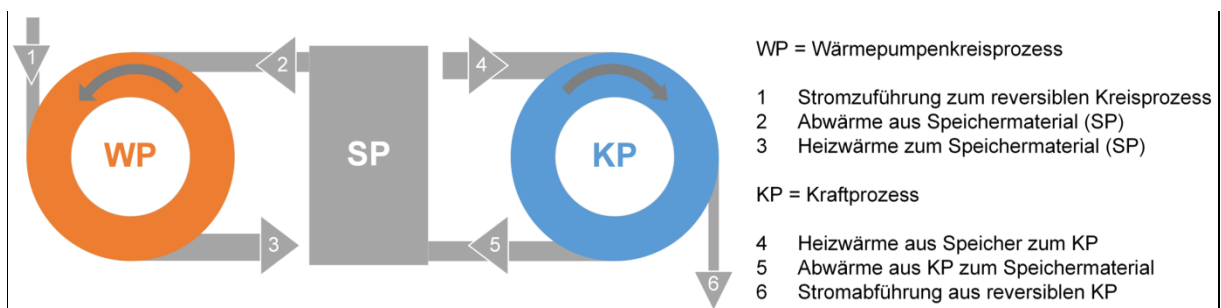


Bild 5: Reversibler Kreisprozesse als thermodynamische Aufgabenstellung für Energiespeicher

Bild 5 zeigt, dass es für die Erfüllung der Aufgabe der Energiespeicherung, bei der Kopplung der Sektoren Strom und Wärme wie beschrieben, grundsätzlich energetisch vorteilhaft ist, das Speichermedium über Wärmepumpen aufzuladen und über Kraftprozesse zu entladen. Diese Kombination ermöglicht die Bereitstellung der zu speichernden Wärme als optimalen Energiemix.



## Kopplung der Sektoren Strom und Mobilität

Die Stromspeicherung im Sektor Strom selbst und in der Kopplung der Sektoren Strom und Mobilität ist eine besondere Aufgabe. Hier kommt es nicht darauf an, günstig einen exergiearmen Energiemix in Form von Heizwärme herzustellen, sondern die Exergie so gut wie möglich zu erhalten. Deshalb ist es zweckmäßig, chemische Energie in Form von Wasserstoff zu speichern. Die bekannteste Methode zur Umwandlung von Strom in chemische Energie ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse.

Die Speicherung von Wasserstoff ist aufwendig. Alternativen dafür sind die Produktion erneuerbarer synthetischer Brennstoffe durch chemische Bindung des Wasserstoffs an Kohlenstoff oder sein Einsatz als Reduktionsmittel, z. B. zur Reduktion von Eisenoxiden.

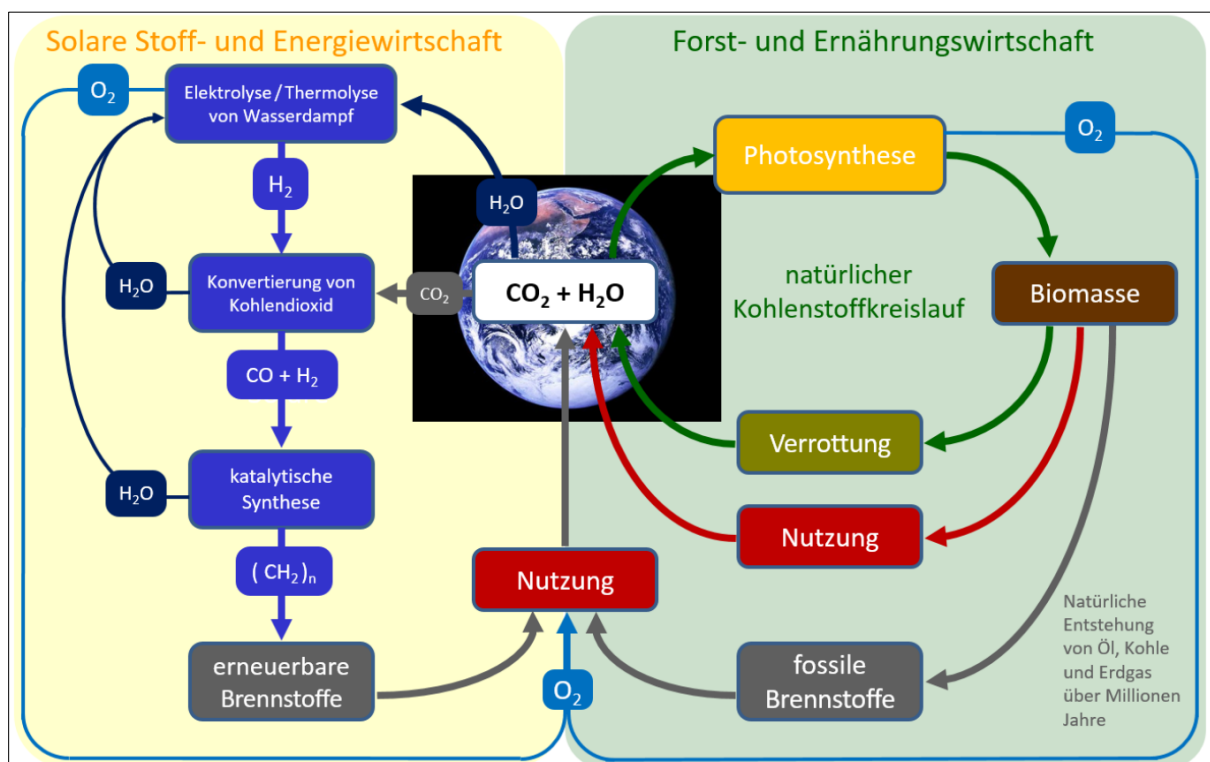


Bild 6: Die Erweiterung des natürlichen um einen energetischen Kohlenstoffkreisprozess

In einer Tonne synthetischem Dieselöl, das bei Umgebungstemperatur und -druck praktisch in jeder Größenordnung gespeichert und über große Entfernungen transportiert werden kann, sind ca. 1.685 m<sup>3</sup> Wasserstoff gebunden. Alle anderen Methoden der Wasserstoffspeicherung erreichen diesen Kennwert nicht.

Soll der für die Synthese erforderliche Kohlenstoff über die homogene Wassergasreaktion aus Kohlendioxid gewonnen werden, dann gehen von der Exergie des eingesetzten Stroms in den Prozessstufen Elektrolyse, CO<sub>2</sub>-Konversion und Synthese bereits mehr als 50 % in Form von Anergie verloren, d. h. nur höchstens 50 % der mit dem Strom eingebrachten Exergie können als chemische Energie in Form von synthetischen Kohlenwasserstoff ausgebracht und gespeichert werden. Bei dessen Nutzung durch Verbrennung wird auch die Materie gestreut an die Umwelt abgeführt. Zweckmäßig ist deshalb die Bereitstellung des Rohstoffs Kohlenstoff aus organischen Reststoffen der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaften über das industriell verfügbare Carbo-V-Verfahren oder die Hydrothermale Karbonisierung.

Werden die chemischen Energieträger dann in thermodynamisch offenen Verbrennungskraftmaschinen des Standes der Technik als Brennstoffe für den Lastausgleich im Sektor Strom oder zur

Umwandlung in technische Arbeit im Sektor Mobilität verwendet, dann stehen als Nutzenergie auf diesem Wege nur noch ca. 20 % der eingebrachten Exergie zur Verfügung. Im Klartext für 1 kWh Strom oder 1 kWh technische Arbeit aus solchen Speichersystemen müssen 5 kWh Solarstrom bereitgestellt werden.

Wenn die Umstellung des Sektors Mobilität in Deutschland mit ca. 2.600 PJ/a auf solar-regenerative Energie unter Beachtung der spezifischen Exergieverluste 1.050 PJ/a erfordert, dann heißt das, die installierte Leistung der Photovoltaik- und Windkraftanlagen müsste 150 GW, also allein für die Mobilität mehr als die derzeitige installierte Leistung, betragen.

Gute Chancen für die Substitution der fossilen Brennstoffe im Sektor Mobilität bietet die Verwendung von Wasserstoff zur Produktion regenerativer metallischer Brennstoffe durch Reduktion von Metalloxiden, vorzugsweise von Eisenoxiden. Bei Oxidation von Eisen mit Wasserdampf entsteht ein Wasserstoff/Wasserdampf-Gemisch, das mit Sauerstoff in bekannten Verbrennungskraftmaschinen ohne Abgas und emissionsfrei zum Zwecke der Produktion von technischer Arbeit zu Wasserdampf, der als Oxidationsmittel im Prozess verbleibt, verbrannt werden kann. Der Umwandlungswirkungsgrad der Prozesskombination Elektrolyse, Eisen-Wasserdampf-Prozess, emissionsfreie Verbrennungskraftmaschine wird zwar nicht wie bei Batterien bei 80 %, sondern bei 65 % liegen, aber diese Kombination ist für große Speicherkapazitäten, wie sie für die Energiewende in den Sektoren die Sektoren Mobilität und Strom erforderlich sind, wirtschaftlich besser geeignet und vor allem langlebiger.

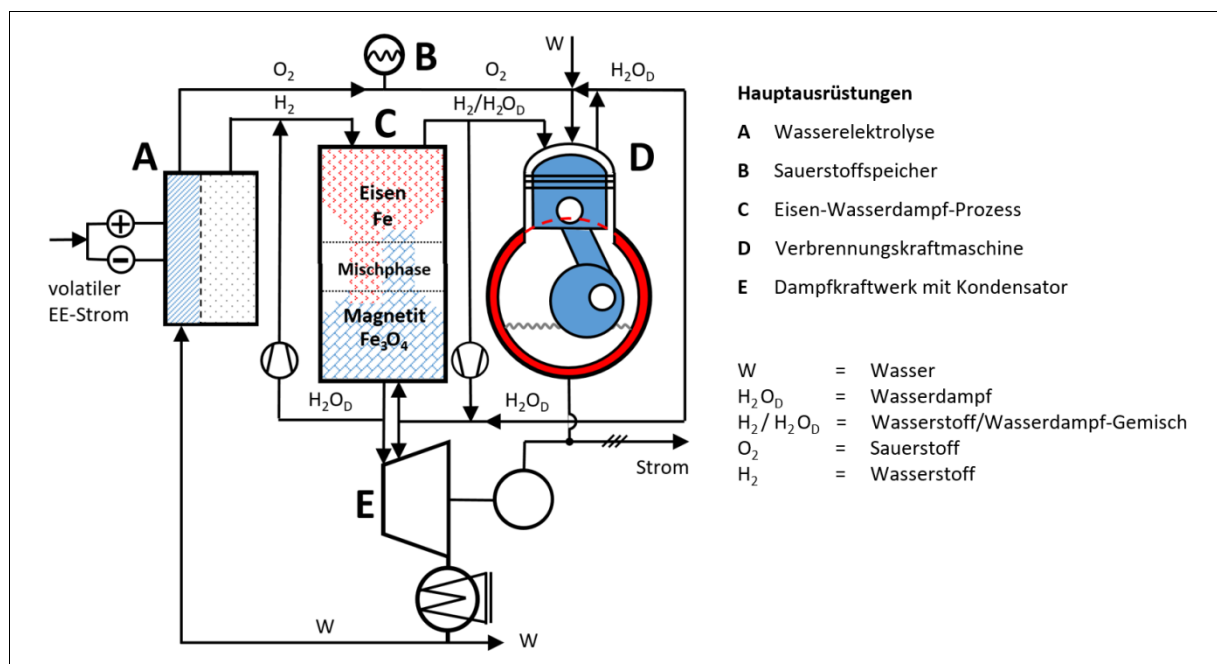


Bild 7: Eisen-Wasserdampf-Speicherkraftwerk

### Schlussfolgerungen

Die Chancen aus der Kopplung der Sektoren Wärme, Strom und Verkehr zur Optimierung der Energiewende und das Denkmodell „Exergie“ lassen sich mit der nachfolgenden Tabelle 1 beziffern und erläutern.



	Energiesystem gesamt	Wärme	Verkehr	Strom
Brennstoffwärme (BSW) (PJ/a)	10.728	4.234	2.619	3.875
Exergie-Output theoretisch (PJ/a)	3.160	725	525	1.900
Exergie-Input praktisch (PJ/a)	4.000	735	1.050	2.215
Erforderliche installierte el. Leistung Wind+PV bei 2.000 Volllaststunden (GW)	560	100	150	310
Brennstofffaktor (BSW : Exergie-Input) (MWh/MWh)	2,7	5,7	2,5	1,8

Tabelle 1: Sektoren der Energiewende in Zahlen

Exergie ist der Kern der jeweiligen Nutzenergie in den Sektoren Wärme, Strom und Verkehr. Im Sektor Wärmeversorgung einer solaren Stoff- und Energiewirtschaft heißt das, dass die Qualität der Nutzwärme gesichert werden kann durch einen Mix aus Exergie und Umgebungswärme. Der Sektor Wärme kann damit den bedeutendsten Beitrag zur Reduzierung des Bedarfs an fossilen Brennstoffen leisten. Die technischen Geräte dafür sind Wärmepumpen. Durch die direkte Kopplung der Wärmepumpen mit dem elektrischen Netz können die Umwandlungsverluste bei der Stromzuführung minimiert werden.

Wärmeversorgung und Abschöpfung von solarer Energie durch Windkraft- und PV-Anlagen sind dezentrale Aufgaben, d. h. der Strom für die Wärmeversorgung kann vor Ort gewonnen und genutzt werden, sodass er keinen Ausbau der elektrischen Fortleitungsnetze fordert. Wärmeversorgungsnetze sind gekennzeichnet durch eine Volllaststunden-Nutzung von 2.200 Stunden/a bei praktisch 8.760 Betriebsstunden pro Jahr. Bei einem Exergiebedarf des Sektors Wärme von 735 PJ/a errechnet sich eine elektrische Antriebsleistung bei Volllast von ca. 100 GW. Durch die gegebenen Möglichkeiten der Heizwasserspeicherung lässt sich die erforderliche Arbeit sicherlich auf 5.000 Stunden/a verteilen, sodass sich die Antriebsleistung auf maximal 50 GW begrenzen und im Leistungsbereich zwischen 100 und 0 % regeln lässt. Das heißt, eine installierte Leistung von 50 GW an Windkraft- und PV-Anlagen kann der Sektor Wärme als Lastregelung aus dem Sektor Strom übernehmen und dementsprechend den Ausbaubedarf der Netze reduzieren. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Sektor Strom zu stabilisieren.

In der konventionellen Stromversorgung waren die Stromerzeugung, -fortleitung und -verteilung synchronisiert. Ausgehend von den Kraftwerksstandorten wurden die elektrischen Netze so ausgelegt, dass sie sicher Strom mit einer Leistung von mehr als 100.000 MW fortleiten und verteilen konnten. Aus Tabelle 1 kann abgeleitet werden, dass dieser Zustand mit dem Ziel der höchsten Wirksamkeit und der besten Ökonomie der Energiewende wieder hergestellt werden muss und kann. Die Dampf- und GuD-Kraftwerke haben für die nächsten Jahrzehnte die Aufgabe, die Energiewende zu stabilisieren. Die aktuelle Energiepolitik ist dafür nicht geeignet.