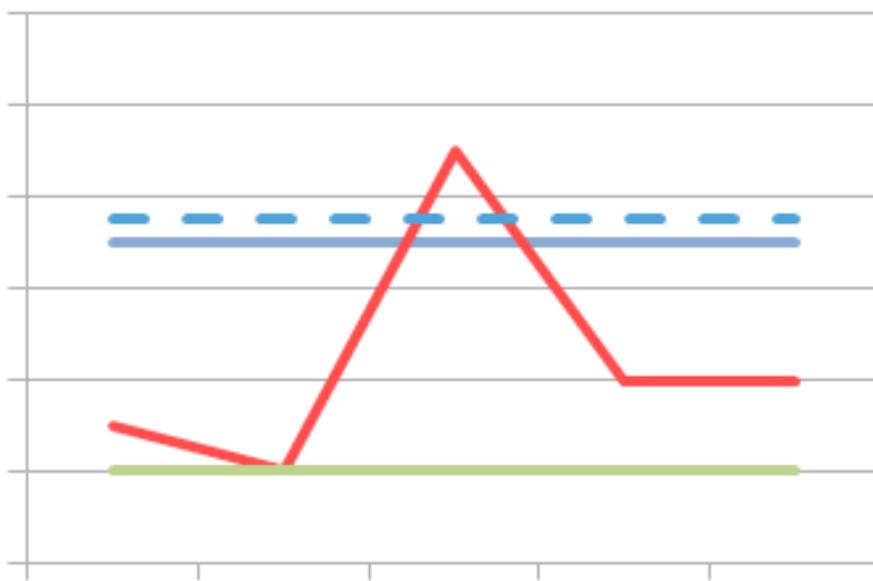


Wärmewende

Brennstoffeffizienz im Strom- und Wärmemarkt



Dr. Rolf-Michael Lüking

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary: 10 Eckpunkte für eine erfolgreiche Energiewende

1. Einleitung
 2. Effiziente Brennstoffnutzung als zentrale Herausforderung der Energiewende
 - 2.1 Die Schlüsselrolle der gasförmigen Brennstoffe
 - 2.2 Flächeneffizienz der regenerativen Energiegewinnung
 - 2.3 Ausgleichsbedarf fluktuierender Energiedarangebote
 3. Die Effizienz von Wärmeversorgungsstrategien auf der Basis des Energieträgers Gas
 - 3.1. Situationen ohne aktuellen Wärmebedarf
 - 3.2. Das Primärstromangebot überschreitet den Strombedarf bei gleichzeitig vorliegendem Wärmebedarf
 - 3.3. Das Primärstromangebot unterschreitet den Strombedarf bei gleichzeitig vorliegendem Wärmebedarf
 4. Ressourcenschonung und CO₂-Minderungspotential durch optimierte Nutzung von Naturgasen zur Wärmeversorgung
 5. Fazit
- Quellen

Executive Summary:

10 Eckpunkte für eine erfolgreiche Energiewende

1. Die Ziele für den Ausbau Erneuerbarer Energien und für die Steigerung der Energieeffizienz sind durch internationale und nationale Gesetze geregelt (EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien, EEWärmeG, EnEV, etc.). Es fehlt aber an sektorenübergreifenden Einsatzstrategien für Energieträger.
2. Die Ausgestaltung des zukünftigen Energiemixes muss sich an folgenden Kriterien orientieren: Realisierbarkeit, Bezahlbarkeit und Umweltnutzen.
3. Die zahlreichen Interdependenzen zwischen Strom-, Wärme- und Mobilitätsmarkt verlangen eine sektorenübergreifende Betrachtung.
4. Gas ist und bleibt der universellste Energieträger in allen Sektoren.
5. Große Gas-GuD-Kraftwerke haben den besten elektrischen Wirkungsgrad und sind sowohl grundlastfähig als auch kurzfristig regelbar. KWK-Anlagen in allen Größenordnungen haben einen schlechteren elektrischen Wirkungsgrad und können nur unter erheblichen Effizienzeinbußen auf kurzfristige Schwankungen des Stromangebotes reagieren.
6. Zur Erzeugung regenerativer Energie sind PV- und Windkraftanlagen aufgrund ihrer Flächeneffizienz Biogasanlagen vorzuziehen: Mit Biogas brauchte man gegenüber PV und Wind mehr als die 50-fache Fläche.
7. Aus These 6 folgt: Strom muss sektorenübergreifend zur Leitenergie werden.
8. Wärmepumpen können zum Lastmanagement in volatilen Stromnetzen beitragen. Bei einer Stromerzeugung mittels PV und Wind sowie effizienten GuD-Kraftwerken sind sie das effizienteste Heizungssystem.
9. Durch den Einsatz von Gas zur Strom- statt zur direkten Wärmeerzeugung bleibt die benötigte Gesamtmenge konstant. Gleichzeitig sinkt der Bedarf an anderen fossilen Brennstoffen.
10. Fossiles Gas kann gleitend durch regenerative Gase ersetzt werden. Dazu ist kein Umbau der Infrastruktur erforderlich.

I. Einleitung

Die Bundesregierung hat sich mit ihrem „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ auf einen grundlegenden Umbau der Energieversorgungsstrukturen festgelegt, mit dem Ziel, „Deutschland ... in Zukunft bei wettbewerbsfähigen Energiepreisen und hohem Wohlstandsniveau“ zu einer „der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften der Welt werden“ [1] zu lassen.

Um die im Konzept verankerten ambitionierten Klimaschutzziele erreichen zu können, müssen die erneuerbaren Energien die Hauptrolle in einem zukünftigen Energiemix übernehmen. Voraussetzung dafür ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz; d.h. eine Verringerung des Energieeinsatzes für den gleichen Nutzen.

Die notwendige Effizienzsteigerung und der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien sind inzwischen weitgehend im öffentlichen Bewusstsein verankert und anerkannte Themen- und Handlungsfelder der Politik. Dagegen spielt die Flankierung dieser Prozesse durch eine optimierte Einsatzstrategie von Energieträgern bislang noch kaum eine Rolle.

Ein Verzicht auf eine solche Strategie gefährdet, wie gezeigt werden wird, die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende, während umgekehrt eine sektorenübergreifende Einsatzstrategie unmittelbar Klimaentlastungen ermöglicht und ökonomische Vorteile verspricht.

Im Folgenden werden die Grundzüge einer solchen Strategie bezogen auf die Interdependenz von Strom- und Wärmemarkt entwickelt.

2. Effiziente Brennstoffnutzung als zentrale Herausforderung der Energiewende

2.1. Die Schlüsselrolle der gasförmigen Brennstoffe

Die Identifizierung der günstigsten Nutzungspfade gasförmiger Brennstoffe entscheidet maßgeblich über den Umweltnutzen des Gesamtenergiemixes:

1. Von allen fossilen Energieträgern kann Gas (im Wesentlichen Erdgas, aber auch Propan und Butan) in allen Bedarfssektoren am flexibelsten eingesetzt werden. Gas ist geeignet, im Mobilitätsbereich Erdöl als wichtigsten Energieträger zu verdrängen, es dominiert mit einem Anteil von fast 50 % den Wärmemarkt, in dem es auf vielfältige Weise zum Einsatz kommt. Auch für den Strombereich gewinnt Gas zunehmend an Attraktivität, da Gas mit einem erheblich besseren Wirkungsgrad (58,5 % bezogen auf Hi sind Stand der Technik, auch Werte über 60 % werden schon erreicht) verstromt werden kann als andere fossile Energieträger, insbesondere Stein- und Braunkohlen. Die hohe Lastflexibilität, die Gaskraftwerke gegenüber Kohle- und Atomkraftwerken auszeichnet, prädestiniert sie, die nicht regelbaren Stromangebote aus Wind- und Solarkraftanlagen auszugleichen.
2. Die statische Reichweite der sicher erschließbaren fossilen Gasvorräte bleibt hinter der von Kohle zurück, übertrifft die des Energieträgers Erdöl aber deutlich. Daher ist hier schon kurzfristig mit Substitutionskonkurrenzen zu rechnen. Das gilt selbst für den Fall, dass in Zukunft so genannte „unkonventionelle Gasvorkommen“ in größeren Mengen erschlossen werden.

Die hohe technische Attraktivität des Energieträgers Gas geht mit einer geringen Klimabelastung einher, denn die spezifischen CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Nutzenergie unterschreiten die der anderen fossilen Energieträger in allen vergleichbaren Anwendungen erheblich. Mit Blick auf die Herausforderung des Klimaschutzes gilt es also, die fossilen Gase so in die Energieversorgung einzubinden, dass sie möglichst effektiv Energieträger mit schlechterer Klimabilanz verdrängen und insgesamt den Brennstoffbedarf reduzieren.

Brennstoffeffiziente Nutzungspfade für fossile Gase zu identifizieren, ist nicht nur kurz- und mittelfristig, sondern gerade angesichts des anstehenden Transformationsprozesses zu einer überwiegend bis vollständig erneuerbaren Energieversorgung von entscheidender Bedeutung. Schließlich weisen die regenerativen Brennstoffe zum weit überwiegenden Teil die gleiche chemische Grundstruktur auf wie die fossilen Gase. Es handelt sich im Wesentlichen um Biogase aus der Abfallwirtschaft und aus landwirtschaftlicher Produktion sowie um sekundäres Methan, das aus nicht verwertbarem Überschussstrom aus Solar- und Windkraftanlagen gewonnen werden kann. Ein für fossile Gase günstiges Energieversorgungssystem bietet somit auch für die effiziente Nutzung regenerativer Brennstoffe die beste Grundlage. Die Transformation kann entsprechend gleitend erfolgen, indem die regenerativen Gase die fossilen je nach Verfügbarkeit substituieren. Die benötigte technische Infrastruktur ist für beide Energieträgergruppen identisch. Auch ein gemischter Betrieb ist problemlos möglich. Investitionen, die für die Realisierung einer solchen Infrastruktur aufgewendet werden, sind daher langfristig gut angelegt – ein wichtiger Aspekt zur Kostendämpfung des Umstellungsprozesses.

2.2 Flächeneffizienz der regenerativen Energiegewinnung

Wird die Energieversorgung wie angestrebt weitgehend auf erneuerbare Energien umgestellt, muss gleichzeitig der Verbrauch von Brennstoffen, also chemisch gebundener Energie, so weit wie möglich reduziert werden. Sie müssen mit höchster Effizienz eingesetzt werden, denn die Produktion von biogenen Brennstoffen ist aufgrund des schlechten Wirkungsgrades der Photosynthese (ca. 0,5 % [2]) außerordentlich flächenintensiv (Tabelle 1).

Tabelle 1: flächenspezifische Nutzungsgrade unterschiedlicher Bioenergieprodukte [3]

| | flächenspezifischer Nutzungsgrad | flächenspezifischer Nutzungsgrad elektrisch | Herstellungs-/Produktionsaufwand pro kWh Energieertrag |
|-----------------------|----------------------------------|---|--|
| Rapsöl/Biodiesel | 0,11 % | | > 50 % |
| Biogas | 0,46 % | 0,17 % | 25-50 % ¹⁾ |
| Bioethanol | 0,18 % | | 80-90 % |
| Btl-Diesel, Ft-Diesel | 0,23 % | | > 50 % |

1) Der Herstellungs-/Produktionsaufwand hängt wesentlich vom Grad der Wärmenutzung ab.

Zur Deckung des aktuellen Primärenergiebedarfs in Deutschland in Höhe von ca. 47 MWh pro Person würde selbst unter Nutzung des aktuell effektivsten Verfahrens zur Bioenergieproduktion, der Gewinnung von Biogas aus Mais, eine Fläche von ca. 10.000 m² pro Person benötigt. Damit wäre die für die Energiepflanzenproduktion verfügbare Fläche etwa um den Faktor 20 überschritten.

Dabei ist noch nicht einmal der Energiebedarf berücksichtigt, der für Anbau und Ernte der biogenen Energie aufgewendet werden muss und der im Falle der Biogasproduktion aus Mais bis zu 50 % des Energieertrages ausmachen kann. Ebenfalls vernachlässigt diese Betrachtung die in Zukunft zu erwartenden zusätzlichen Flächenkonkurrenzen, die sich durch eine verstärkte Nachfrage nach stofflich genutzten regenerativen Rohstoffen ergeben. Das Missverhältnis zwischen Flächenbedarf und verfügbarer landwirtschaftlicher Fläche für einen Vollversorgungsansatz auf der Basis von Biogas verdeutlicht Bild 1.

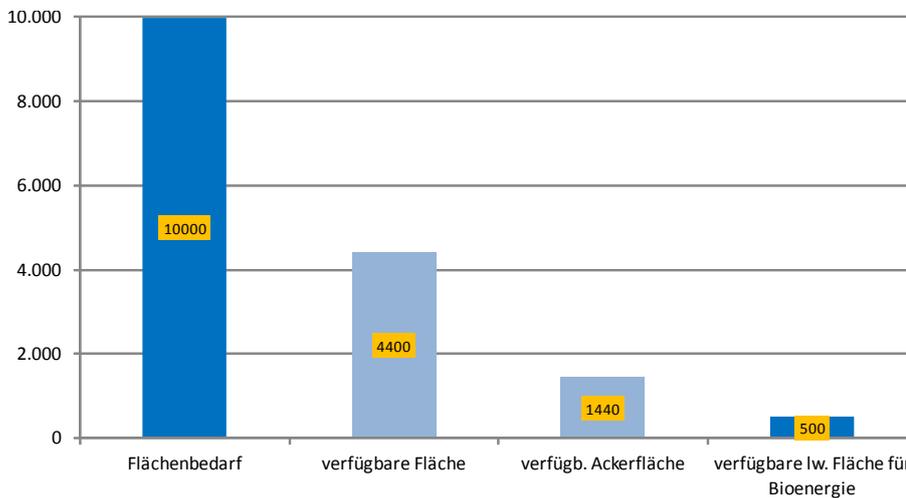


Bild 1: Flächenbedarf und -verfügbarkeit einer Vollversorgung auf der Basis von Biogas in Deutschland (2010)

Die schon heute spürbare Flächenknappheit lässt sich nicht durch den Import von Bioenergie kompensieren. Global fällt das pro-Kopf-Verhältnis zur landwirtschaftlichen Nutzfläche schlechter aus als in Deutschland: Etwa 1,4 Mrd. ha. Ackerfläche steht eine Weltbevölkerung von 7 Mrd. Menschen gegenüber, die bis zum Jahre 2050 voraussichtlich auf 10 Mrd. ansteigen wird) [4]. **Die weit verbreitete Auffassung von der Unerschöpflichkeit erneuerbarer Energiequellen lässt sich mit Blick auf biogene Brennstoffe nicht aufrechterhalten.**

Stellt man diesem ernüchternden Befund die Flächeneffizienz von Wind- und Solarstromanlagen gegenüber, für die hier vereinfacht und sehr vorsichtig gerechnet ein jährlicher Ertrag von 100

kWh/m² angesetzt wird (bei Windkraftanlagen unter Berücksichtigung durchschnittlicher Abstandsflächen), zeigt sich eine deutlich günstigere Proportion. Bezogen auf den aktuellen Energieverbrauch werden 300 m² Fläche pro Person benötigt. Dabei wird eingerechnet, dass die Ernte unmittelbar als universell einsetzbare elektrische Endenergie zur Verfügung steht und insofern am Endenergiebedarf in Höhe von ca. 30 MWh pro Person und Jahr zu messen ist (Bild2).

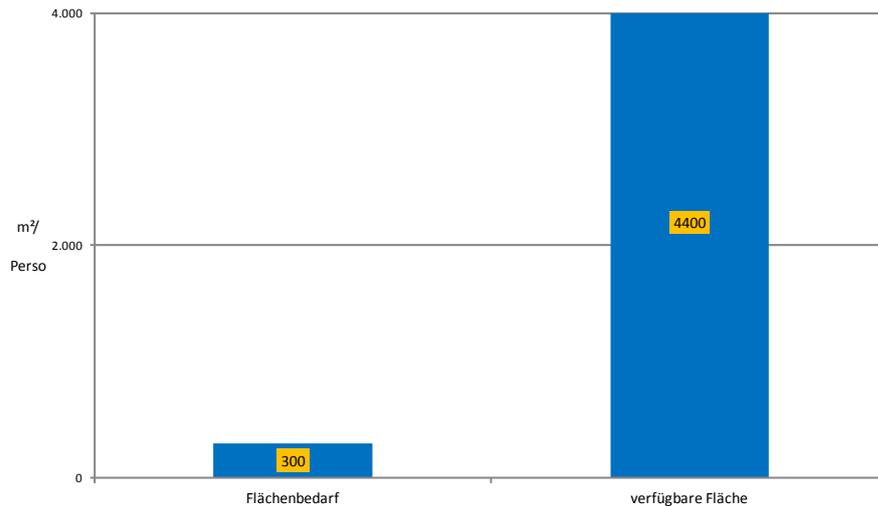


Bild 2: Flächenbedarf und -verfügbarkeit einer Vollversorgung auf Basis von Solar- und Windstrom (2010)

Tatsächlich ist das Potential von Wind- und Solarstromanlagen noch weitaus größer. Während Strom aus Biomasse erst durch Verbrennung unter Wärmeverlust gewonnen werden muss, stellen Wind- und Solarkraftanlagen unmittelbar elektrische Energie zur Verfügung, die (nahezu) verlustfrei in alle benötigten Nutzenergieformen überführt und zu einer Absenkung des Endenergiebedarfs eingesetzt werden kann. Elektrische Wärmepumpen benötigen z.B. bei einer Jahresarbeitszahl von 4 für die gleiche thermische Dienstleistung nur ein Viertel der Endenergie eines Brennwärtekessels. In ähnlicher Größenordnung kann auch im Mobilitätsbereich durch direkte Nutzung von Strom in Elektromotoren der Endenergiebedarf gemindert werden. Der Flächenbedarf für die Energiegewinnung reduziert sich auf diese Weise erheblich. Die so oft als „ineffizient“ gescholtene Photovoltaik bietet darüber hinaus den großen Vorzug, dass sie auf überbauten Flächen, insbesondere auf Gebäuden, installiert werden kann. Das verringert den Druck auf die Nutzung unversiegelter, insbesondere landwirtschaftlicher Nutzflächen. Eine Flächenentlastung ergibt auch die Erschließung küstennaher Bereiche von Nord- und Ostsee als offshore-Standorte für Windkraftanlagen.

Betrachtet man die derzeit und absehbar zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten zur regenerativen Energiegewinnung, kann die geplante Transformation des Energieversorgungssystems somit nur erfolgreich sein, wenn man den Einsatz von Brennstoffen auf ein Minimum beschränkt und möglichst weitgehend auf die Nutzung elektrischer Energie setzt, mit Solarstrom- und Windkraftanlagen als den tragenden Säulen.

Die verschiedenen Formen der Bioenergie können demgegenüber nur eine flankierende Bedeutung haben. „Flankierend“ ist angesichts des geringen Potentials der Bioenergieträger streng so zu interpretieren, dass sie ausschließlich Verbrauchsegmenten vorbehalten bleiben, in denen Brennstoffe nicht – unter Absenkung des Endenergiebedarfs – durch Strom substituiert werden können (z.B. Flugverkehr, Schiffsverkehr o.ä.). Vor allem müssen sie aber die technischen Defizite kompensieren, die eine von Solarstrom- und Windkraftanlagen dominierte Versorgung zur Folge hat.

2.3 Ausgleichsbedarf fluktuierender Energiedarbote

Die Umstellung des Energieversorgungssystems muss vor allem den Umstand berücksichtigen, dass das Stromdarbot aus Solar- und Windkraftanlagen nicht kontinuierlich, sondern fluktuierend, also mit erheblichen Leistungsschwankungen, zur Verfügung steht. Es ist daher eine entscheidende Herausforderung des Transformationsprozesses, die notwendige Synchronität von Stromnachfrage und -angebot sicherzustellen. Solarstrom- und Windkraftwerke sind, ebenso wie Laufwasserkraftwerke, nur in geringem AusmaÙe regelbar bzw. nur abregelbar. Daher kommt chemisch gebundener Energie aus fossilen wie aus regenerativen Quellen in Zukunft eine herausragende Bedeutung in Situationen zu, in denen das fluktuierende Energieangebot den Leistungsbedarf unterschreitet. Jede anderweitige Verwendung konterkariert die beschlossene Energiewende. Tatsächlich dürften die Ressourcen zur Produktion biogener Brennstoffe – selbst wenn man die energetische Verwertung von Abfällen mit einbezieht – sogar bei ausschließlich subsidiärer Nutzung nicht annähernd ausreichen, so dass zusätzlich oder sogar vorrangig auf sekundäre Brennstoffe zurückgegriffen werden muss, z.B. auf erneuerbares Methan, das – allerdings unter hohen energetischen Verlusten – aus Überschussstrom gewonnen werden kann [5].

Steigen die Beiträge aus Wind- und Solarstromanlagen, tritt neben das Problem der temporären Unterdeckung der Last zunehmend die Notwendigkeit, zeitweilige Überangebote zu integrieren. Trotz des derzeit noch geringen Deckungsbeitrags aus diesen Quellen sind bereits Situationen eingetreten, in denen überschüssiger Windstrom über das europäische Verbundnetz abgefördert und/oder über die Strombörse kostenfrei angeboten werden musste. Bei dem forcierten Ausbau erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen ist es unvermeidbar, dass elektrische Überangebote deutlich an Häufigkeit und Stärke zunehmen werden. Zudem ist schon aus technischen und ökonomischen Gründen eine Ausbauleistung elektrischer Ausgleichsspeicher in gleicher Größenordnung nicht zu erwarten.

3. Die Effizienz von Wärmeversorgungsstrategien auf der Basis des Energieträgers Gas

Da Strom zunehmend als Leitenergie fungieren muss, ist eine isolierte Betrachtung der verschiedenen Energieverbrauchssektoren, z.B. des Wärme- und Strommarktes, nicht mehr zeitgemäß. Die nicht regelbaren elektrischen Energiedarangebote, im Folgenden als „Primärstromangebot“ zusammengefasst, müssen vielmehr als ein dominierendes Element des Versorgungssystems auch in der Abwägung zukunftsfähiger Wärmeversorgungsstrategien berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Interdependenz von Strom- und Wärmemarkt, die mit Gasen als Brennstoff bedient werden müssen, sind konkret vier Situationen zu betrachten. Diese unterscheiden sich durch das Verhältnis von Primärstromangebot und Strombedarf sowie dadurch, ob ein akuter Wärmebedarf vorliegt. Tabelle 2 verdeutlicht die Fallunterscheidung:

Tabelle 2: Interdependenz von Strombedarf und Primärstromangebot mit der Wärmeversorgung von Gebäude

| | A kein Wärmebedarf | B Wärmebedarf |
|---|---|---|
| a | Der Strombedarf übersteigt das Primärstromangebot | Der Strombedarf übersteigt das Primärstromangebot |
| b | Der Strombedarf unterschreitet das Primärstromangebot | Der Strombedarf unterschreitet das Primärstromangebot |

Eine Skizze der möglichen Situationen zeigt Bild 3:

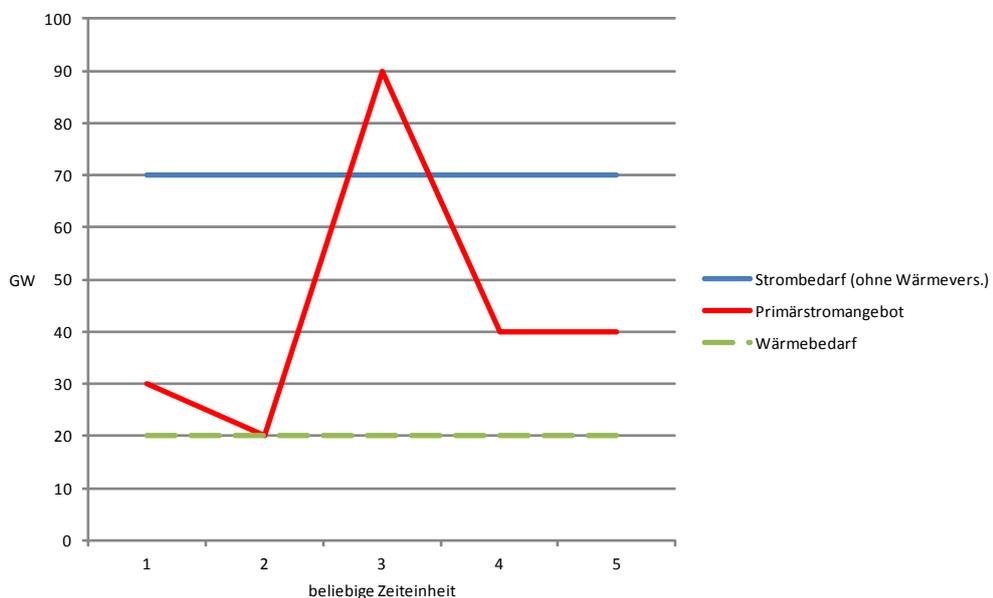


Bild 3: Interdependenz von Strombedarf und Primärstromangebot mit der Wärmeversorgung von Gebäude

Obwohl über die Primärstromangebote insgesamt nur ein Teil des Strombedarfs gedeckt wird, treten zeitweise Überangebote auf. Dabei können sich die Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage nicht nur in ihrer Höhe, sondern auch in der zeitlichen Dauer erheblich unterscheiden. Sowohl relativ einheitliche Phasen von mehreren Tagen als auch grundlegende Änderungen innerhalb weniger Minuten sind möglich. Diesen fluktuierenden Stromangebots- und Nachfragerelationen steht je nach Jahreszeit und Witterungsbedingungen ein Wärmebedarf in unterschiedlicher Höhe gegenüber.

3.1 Situationen ohne aktuellen Wärmebedarf (Fälle der Spalte A, Tabelle 2)

Für die Suche nach einer geeigneten Wärmeversorgungsstrategie ist lediglich der Fall ohne Relevanz, in dem die Stromangebote aus nicht regelbaren Erzeugern die Stromnachfrage übersteigen, gleichzeitig aber keine Wärme nachgefragt wird.

Der Fall, dass der Strombedarf nicht aus dem Primärstromangebot gedeckt werden kann, ist für die Identifizierung von Wärmeversorgungsstrategien mit hoher Brennstoffeffizienz durchaus von Bedeutung, obwohl hier ebenfalls kein akuter Wärmebedarf vorliegt. In diesem Fall sind thermische Kraftwerke mit einem möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad erforderlich, um die Angebots-/Nachfragedivergenz mit möglichst geringen Brennstoffressourcen zu überbrücken.

Dieser Herausforderung werden am besten große Gas- und Dampf-Kombinationskraftwerke (GuD) gerecht, die die Vorzüge der Grundlastfähigkeit bei gleichzeitig großer Lastflexibilität mit hohen elektrischen Wirkungsgraden verbinden.

Anlagen, die für die gleichzeitige Produktion von Kraft und Wärme konzipiert sind, genügen dagegen dem Anspruch hoher Brennstoffeffizienz in dieser Situation nicht. Wird nämlich die Abwärme aus der Stromproduktion thermischer Kraftwerke genutzt, verschlechtert sich der elektrische Wirkungsgrad. Der elektrische Wirkungsgrad gegenüber dem oben beschriebenen GuD-Kraftwerk verringert sich auf unterschiedliche Weise,

1. technisch durch Verringerung der nutzbaren Temperaturdifferenz im Kraftwerk durch Wärmeauskopplung sowie aufgrund der für die Wärmeauskopplung und den Wärmetransport benötigten Hilfsenergie,
2. qualitativ, da in Abhängigkeit von der Größe der KWK, Technologiekomponenten nicht eingesetzt werden können, die eine Anhebung des Nutzungsgrades bei der Stromerzeugung ermöglichen (Turbinengrößen, Temperaturkaskaden etc.).

Insbesondere die aktuell mit Macht in den Markt drängenden Klein-KWK-Anlagen, die z.T. direkt im Gebäude eingesetzt werden, erkaufen den Vorzug der Verbrauchernähe und Abwärme-Abnahme mit einem erheblich reduziertem elektrischen Wirkungsgrad, der z.T. weniger als halb so hoch ist wie der des GuD-Kraftwerkes.

Diese dezentralen BHKW-Anlagen sind daher für den Fall, dass kein aktueller Wärmebedarf vorliegt und das Primärstromangebot die Stromnachfrage nicht abdecken kann wenig geeignet - sie können die elektrische Angebots-/Nachfragedivergenz nicht mit der notwendigen Brennstoffeffizienz ausgleichen.

3.2 Das Primärstromangebot überschreitet den Strombedarf bei gleichzeitig vorliegendem Wärmebedarf (Fall B/a, Tabelle 2)

Nur elektrische Systeme zur Wärmeversorgung können davon profitieren, wenn das Primärstromangebot die wärmeunabhängige elektrische Energienachfrage übersteigt. Indem der Wärmebedarf über elektrische Wärmepumpen bedient wird, steigt die Nachfrage im elektrischen Netz und die ansonsten nicht nutzbaren Primärstromangebote können sinnvoll verwertet werden. Durch die Erschließung der thermischen Speichermassen der Gebäude oder separate Wärmespeicher sind sogar Überschüsse integrierbar, die über die wärmeinduzierte zusätzliche Netzlast hinausgehen.

Neben den daraus resultierenden Brennstoffeinsparungen bietet der elektrische Wärmever-

sorgungsansatz eine Dienstleistung für das elektrische Netz, die immer wichtiger wird. Denn er erschließt den Wärme- und Kühlbedarf von Gebäuden für den elektrischen Lastausgleich, indem kurzfristige elektrische Überangebote für Wärmediensleistungen „abgeladen“ werden können, die Wärmepumpen aber auch bei akutem Strommangel kurzfristig vom Netz genommen werden können.

Dieses Angebot positiver und negativer Regelleistung ist nicht nur aufgrund des quantitativ großen Potentials hoch attraktiv. Darüber hinaus ist der technische und wirtschaftliche Aufwand zur thermischen Energiespeicherung außerordentlich gering, verglichen mit der Zwischenspeicherung von Strom in Akkumulatoren oder dem Betrieb von thermischen Ausgleichskraftwerken zur Stabilisierung der Stromnetze.

Bei Anlagen, die in Kraft-Wärme-Kopplung gleichzeitig Strom und Wärme produzieren und als besonders effiziente Brennstoffnutzer gelten, ergibt sich in diesen Situationen der genau umgekehrte Effekt. Denn die angestrebte hohe Effizienz von KWK setzt eine möglichst strenge Wärmeführung voraus, d.h. dass die Stromproduktion in Abhängigkeit von der Wärmenachfrage erfolgt. Die Stromproduktion ist in diesem Falle ebenso wenig flexibel regelbar wie die fluktuierenden Primärstromangebote. Das Problem der nicht integrierbaren Überschüsse verschärft sich auf diese Weise in zweierlei Hinsicht:

1. Die Leistungshöhe der Überschüsse wird angehoben.
2. Die Häufigkeit der Überschusssituationen nimmt zu.

Natürlich stehen auch bei KWK-Anlagen technische Ausgleichsmöglichkeiten zur Verfügung, sei es durch Kaskadenschaltungen oder modulierenden Betrieb, durch die Inanspruchnahme eines Spitzenlastkessels oder durch eine zeitliche Entkopplung von Strom- und Wärmenachfrage durch thermische Speicher.

Die möglichen Maßnahmen reduzieren allerdings die Effizienz des gesamten KWK-Prozesses, so dass die Integrationsschwäche von nicht regelbarem Überschussstrom als Grundproblem von KWK-Strategien bestehen bleibt.

Die gegenläufigen Auswirkungen von Wärmeversorgungsstrategien auf der Basis von Elektrowärmepumpen (links) und wärmegeführter Kraft-Wärme-Kopplung (rechts) auf die Integrationsmöglichkeiten fluktuierender Stromüberschüsse verdeutlicht Bild 4.

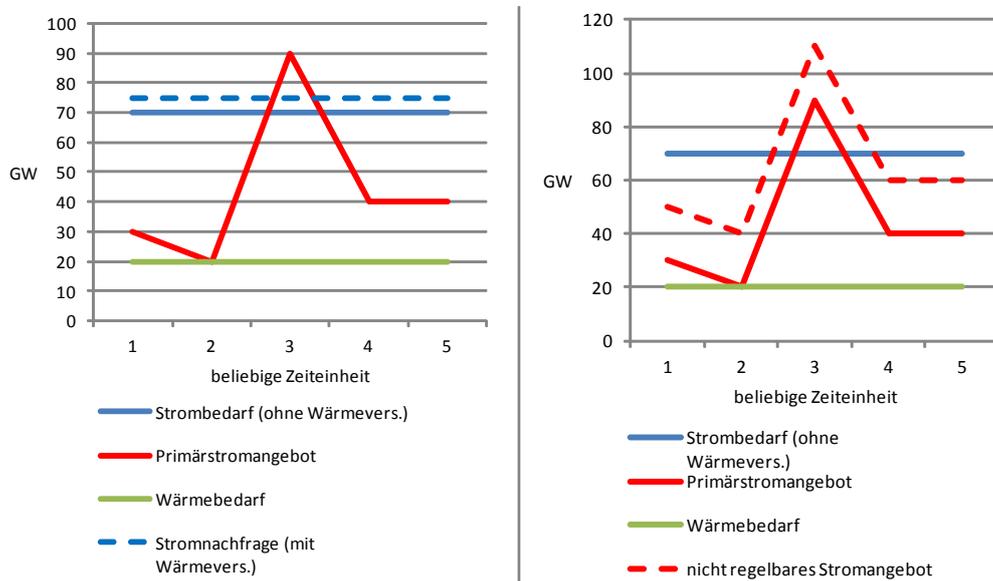


Bild 4: Auswirkungen der Wärmeversorgung auf Basis von Elektrowärmepumpen (links) und wärmegeführter Kraft-Wärme-Kopplung (rechts) auf die Integrationsmöglichkeiten fluktuierender Stromüberschüsse.

3.3 Das Primärstromangebot unterschreitet den Strombedarf bei gleichzeitig vorliegendem Wärmebedarf (Fall B/b, Tabelle 2)

Der kurz- und mittelfristig am häufigsten zu erwartende und somit für die Bewertung der Brennstoffeffizienz von Wärmeversorgungsstrategien wichtigste Fall ist gekennzeichnet durch eine Unterdeckung des elektrischen Bedarfs durch das Primärstromangebot bei gleichzeitigem Wärmebedarf. Hier müssen Brennstoffe zum Ausgleich der Angebots-/Nachfragedivergenz eingesetzt werden. Betrachtet man allein die elektrische Seite, ist in diesem Fall wiederum die Technologie mit dem höchsten elektrischen Wirkungsgrad heranzuziehen, um die notwendige hohe Brennstoffeffizienz zu gewährleisten. Hier kommt das oben beschriebene GuD-Kraftwerk ins Spiel. Der anstehende Wärmebedarf muss aber nun ebenfalls bedient werden, so dass Wärme- und Stromnachfrage um den benötigten Brennstoff konkurrieren. Es muss daher die Wärmeversorgungsstrategie identifiziert werden, die im Zusammenspiel mit den GuD-Kraftwerken die geringsten Brennstoffmengen bezogen auf beide Anforderungsbereiche benötigt.

Im Folgenden werden sieben Nutzungspfade von Gasen zur Wärmeversorgung, die die am Markt verfügbaren Möglichkeiten repräsentieren, hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht.

1. Brennwärtekessel als die den Markt beherrschende Nutzungsstrategie (BW).
2. Brennwärtekessel kombiniert mit einer thermischen Solaranlage mit einem Deckungsanteil von 5 % bis 25 % bezogen auf den Wärmebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser (BW-Solar), wobei für eine Standardsolaranlage in neuen Gebäuden (Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser) ein Deckungsanteil von 10 bis 15 % typisch ist. Der Deckungsanteil kann im Neubaubereich durch eine 10-prozentige Heizungsunterstützung auf etwa 25 % angehoben werden, bei bestehenden, energetisch nicht modernisierten Gebäuden ist bezogen auf den Gesamtwärmebedarf eher ein Deckungsanteil von 5 bis 10 % realistisch.
3. Gas betriebene Wärmepumpen (GWP), die am Markt vor allem als Kompressions- oder Sorptions- Wärmepumpen vertreten sind, mit unterschiedlichen Heizzahlen.

4. Mini-Blockheizkraftwerke, die direkt in größeren Gebäuden oder gewerblichen Einheiten eingesetzt werden können mit einer Leistung < 10 kW_{el}. Als Beispiel wird ein Aggregat mit einem elektrischen Nutzungsgrad von 27 % und einem thermischen Nutzungsgrad von 61 % (orientiert an den Leistungsdaten des Marktführers) mit wärmegeführter Betriebsweise herangezogen (BHKW1).
5. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage zur Versorgung von Siedlungen im Leistungsbereich < 1 MW_{el}, für die ein elektrischer Wirkungsgrad von 38 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 55 % angesetzt wird. Die Betriebsweise ist ebenfalls wärmegeführt (BHKW2).
6. GuD-Kraftwerk mit maximaler Wärmeauskopplung und einem Gesamtwirkungsgrad von 92 % (51,5 % elektrisch, 40,5 % thermisch) (GuD-FW).
7. Elektrisch betriebene Wärmepumpen (EWP) mit unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen, die ihren Strom aus GuD-Kraftwerken beziehen (elektr. Nettowirkungsgrad 58,5 %)

In einigen der Varianten müssen die Nutzungsgrade für die Übertragung der elektrischen Energie sowie im Falle der Wärmeauskopplung für den Transport der Wärme berücksichtigt werden. Mit Blick auf das verbraucherferne GuD-Kraftwerk werden Leitungsverluste in Höhe von 6 % für elektrische [6] und 10 % für thermische Energieübertragung angenommen. Beim BHKW2, das in größerer Nähe der Energieverbraucher installiert sein kann, werden 6 % Verluste im Nahwärmenetz angenommen sowie 3 % elektrische Übertragungsverluste im Niederspannungsnetz. Bei den übrigen Varianten werden Wärme und ggfs. Strom dezentral, also verbrauchernah, bereitgestellt, so dass außerhalb des Gebäudes keine Verteilungsverluste berücksichtigt werden müssen. Der Pumpenstrombedarf für den Betrieb der Wärmenetze beim GuD-Kraftwerk sowie beim BHKW2 fließt vereinfacht in Form einer Erhöhung der elektrischen Leitungsverluste um 0,5 Prozentpunkte ein.

Eine Zusammenstellung der untersuchten Nutzungspfade des Energieträgers Gas für die Wärmeversorgung von Gebäuden zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Kenngrößen der Nutzungspfade gasförmiger Brennstoffe für die Wärmeversorgung von Gebäuden

| | | Nutzungsgrad elektrisch η_{el} | Nutzungsgrad thermisch η_{th} | Netzverluste elektrisch I- ζ_{el} | Netzverluste thermisch I- ζ_{th} | Nutzungsgrad Spitzenlaskessel η_{th} |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| 1 | Brennwertkessel | 0 % | 100 % | 0 % | 0 % | |
| 2 | Brennwertkessel mit Solarthermie | 0 % | 100 % / (100 % - α) mit α 5 % bis 25 % | 0 % | 0 % | |
| 3 | Gas-Wärmepumpe | 0 % | JAZ 1 bis 2 | 0 % | 0 % | |
| 4 | BHKW1 < 10 kW _{el} | 27 % | 61 % | 0 % | 0 % | 100 % |
| 5 | BHKW2 < 1 MW _{el} | 38 % | 55 % | 3,5 % | 6 % | 90 % |
| 6 | GuD-Kraftwerk mit FW | 51,5 % | 40,5 | 6,5 % (einschließlich Pumpenstrom) | 10 % | 90 % |
| 7 | GuD-Kraftwerk mit WP | 58,5 % | 58,5 % * JAZ mit JAZ 2,5-5 | 6 % | 0 % | |

Die Effizienz der Versorgungsalternativen ergibt sich als Quotient aus der erbrachten thermischen Dienstleistung und dem dafür erforderlichen Brennstoffaufwand.

Dieser Quotient, im Folgenden als „äquivalente Heizzahl“ (HZe_q) bezeichnet, lässt sich für alle Varianten mithilfe folgender Gleichung ermitteln:

$$HZe_q = (\eta_{th} * \zeta_{th} * \eta_{el,GuD} * \zeta_{el,GuD}) / (\eta_{el,GuD} * \zeta_{el,GuD} - \eta_{el} * \zeta_{el})$$

(Die methodische Herleitung dieser Gleichung findet sich ebenso wie die Erläuterung der getroffenen Annahmen in [7])

Die isolierte Betrachtung der reinen KWK-Prozesse (Nummern 4-6) auf der Basis der Herstellerangaben bietet für einen praxisgerechten Vergleich keine ausreichende Grundlage. Dafür müssen der jeweils für den KWK-Betrieb relevante Gesamtprozess berücksichtigt werden sowie der Arbeitsanteil der in der Regel erforderlichen ungekoppelten Spitzenlastabdeckung. Für die Abdeckung der Spitzenlast wird für die zentrale wie für die semizentrale Wärmeversorgung ein Gaskessel mit einem Nutzungsgrad von 0,9 angenommen. Beim BHKW I wird eine Nutzung des Brennwerteffektes unterstellt, so dass für den Spitzenlastkessel ein Nutzungsgrad von 1,0 angesetzt wird.

Der Arbeitsanteil des Spitzenlastkessels zur Wärmeversorgung hat erheblichen Einfluss auf die Effizienz des gesamten KWK-Prozesses. Dieser Einfluss ist umso größer, je besser die Stromkennzahl des eigentlichen KWK-Prozesses ist. Eine Bewertung der Effizienz von KWK unabhängig von den ungekoppelten Spitzenlastanteilen ist also irreführend. In der Praxis dominieren Auslegungen mit Arbeitsanteilen ungekoppelter Spitzenlastabdeckung zwischen 20 % und 50 % bei wärmegeführter Betriebsweise. Je höher die aus wirtschaftlicher Sicht sinnvolle Auslastung der KWK in Form hoher jährlicher Volllaststunden ist, umso höher ist der notwendige Deckungsanteil durch ungekoppelte Wärmeerzeugung. Insbesondere bei dezentral eingesetzten BHKWs mit mehr als 5500 Volllaststunden im Jahr ist daher von einem Mindestarbeitsanteil des Spitzenlastkessels in Höhe von 30 % auszugehen, während Fernwärmeversorgungen aus GuD-Großkraftwerken mit weniger als 4500 Volllaststunden im Jahr einen geringeren Bedarf für die Spitzenlastabdeckung aufweisen können.

Ungekoppelte Spitzenlastanteile < 20 % stellen aber nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen Ausnahmen dar. Auch technisch ist eine Vermeidung ungekoppelter Arbeitsanteile oft nicht realisierbar oder bleibt ohne Effizienzvorteil, da sie mit Verlusten wegen der erforderlichen Wärmepufferung in Speichern bzw. mit einer Reduktion der Stromkennzahl im Modulationsbetrieb einhergeht. Eine stromgeführte Betriebsweise kann ggfs. ökonomisch sinnvoll sein, verschlechtert aber die Ressourceneffizienz, da die Notwendigkeit der Wärmepufferung ansteigt, mit der Folge zusätzlicher thermischer Verluste. Ohne hier auf die vielfältigen Betriebsmöglichkeiten von BHKWs näher eingehen zu können, ist davon auszugehen, dass sich selbst ohne Inanspruchnahme eines Spitzenlastkessels unter optimalen Bedingungen Effizienzverluste einstellen, die einem Betrieb mit mindestens 10-prozentigem Arbeitsanteil eines Spitzenlastkessels entsprechen.

Wie bei den KWK-Lösungen kann auch bei den Alternativen der Wärmeversorgung von Gebäuden nicht allein auf die Herstellerangaben zur Leistungsfähigkeit der Geräte abgehoben werden. Auf der Basis einer Abwägung von Herstellerangaben und Werten, die in praktischen Untersuchungen ermittelt wurden [8; 9; 10], werden praktisch erreichbare Werte in Form durchgezogener Linien repräsentiert, während die Werte, die nur theoretisch oder möglicherweise in Zukunft relevant sind, durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet sind. Die Effizienz der untersuchten Nutzungspfade von Gasen zur Wärmeversorgung von Gebäuden zeigt Bild 5.

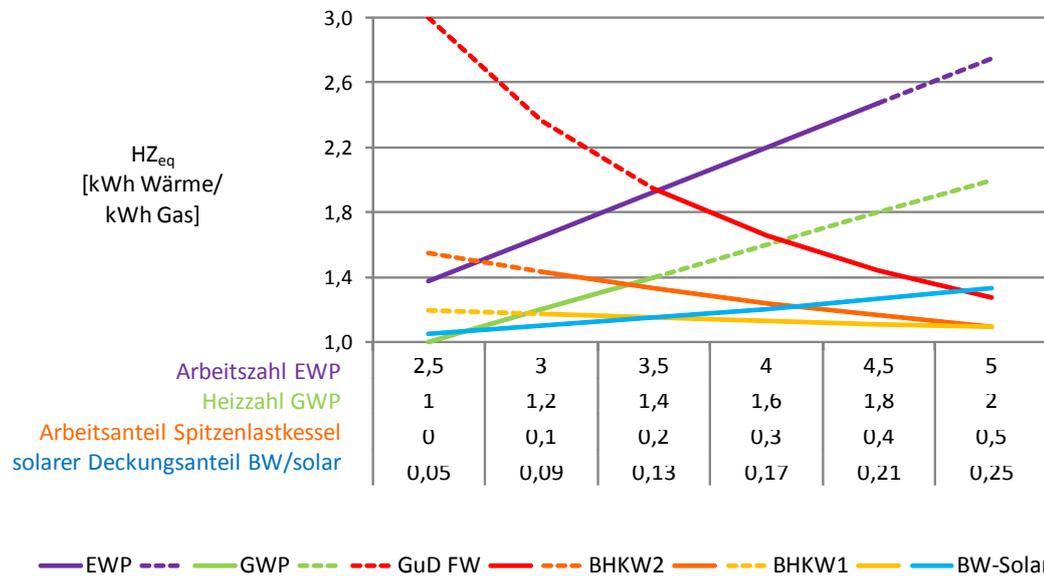


Bild 5: Die Brennstoffeffizienz von KWK- Prozessen, Gaswärmepumpen, solar unterstützter Brennwerttechnik und Elektrowärmepumpen im Vergleich.

Gemessen an einer Gas-Brennwertheizung lassen sich mit allen Vergleichsanlagen signifikante Brennstoffeinsparungen erreichen. Dabei hat das kleinste Blockheizkraftwerk mit einer Wärmeausbeute von bis zu 120 % annähernd gleiches Potential wie die Kombination einer Brennwerttechnik mit einer solarthermischen Anlage (solarer Deckungsgrad 25). Gas-Wärmepumpen ermöglichen ebenso wie das mittlere BHKW (ohne Spitzenlastanteile) eine um bis zu 40 % bessere Brennstoffausnutzung als der Gas-Brennwertkessel, wobei der Gas-Wärmepumpe für die Zukunft noch größeres technisches Potential zuzutrauen ist.

Die Grafik lässt aber ebenfalls erkennen, dass weder durch dezentrale Blockheizkraftwerke noch durch Gas-Wärmepumpen vergleichbare Effizienzpotentiale erschlossen werden können, wie über die Veredelung von Gas in elektrisch optimierten Großkraftwerken und einer Wärmeversorgung durch Wärmeauskopplung oder über elektrische Wärmepumpen. Die Wärmeausbeute pro kWh Brennstoff übersteigt bei diesen Nutzungsalternativen bereits in den schlechtesten Fällen die realistischen Bestwerte der alternativen Nutzungspfade. In günstigen Fällen übersteigt die Kombination von Gas-GuD-Kraftwerken mit Elektrowärmepumpen die Wärmeausbeute eines Gas-Brennwertkessels um das Zwei- bis Zweieinhalbfache.

Eine Fernwärmeversorgung mit einem Gas-GuD-Kraftwerk in der hier dargestellten Qualität ist allerdings nur im Falle günstiger Randbedingungen möglich. U.a. kann das Kraftwerk allein aufgrund seiner Größe in der Regel nicht so verbrauchernah betrieben werden wie es in energetischer Hinsicht wünschenswert wäre. Die Ansprüche an die Qualität des Wärmenetzes sind daher besonders hoch. Eine besondere Herausforderung besteht darin, hohe thermische Netzverluste, u.a. aufgrund des geringen sommerlichen Wärmebedarfs, zu vermeiden.

Elektrische Wärmepumpen verbinden große Einsatzflexibilität mit hoher Brennstoffeffizienz. Speziell im Neubaubereich, wo Jahresarbeitszahlen von mindestens 3,5 auch mit Luft-Wasser-Wärmepumpen erreicht werden können, sind sie hinsichtlich der Brennstoffausnutzung konkurrenzlos. Aber auch bezogen auf den Gebäudebestand, in dem aufgrund höherer Systemtemperaturen oft nur geringere Jahresar-

beitzahlen erzielt werden können, zeigt sich: Die Nutzungsstrategie von Gas über den Pfad GuD-Kraftwerk in Verbindung mit Elektrowärmepumpen ist unter dem Gesichtspunkt einer möglichst hohen Ressourceneffizienz nicht nur tragfähig, sondern sogar den anderen dezentralen Nutzungsoptionen vorzuziehen.

Die Nutzbarkeit von Primärstrom-Überangeboten verringert den Brennstoffbedarf zusätzlich. Die Potentiale sind groß. Schon jetzt können im Sommer schwer zu integrierende Solarstromangebote für die Trinkwassererwärmung herangezogen werden; in windstarken Nachfragetälern des allgemeinen Strombedarfs können Stromüberschüsse Wärmepumpen für die Beheizung antreiben. Diese exklusiven Möglichkeiten eines elektrischen Versorgungsansatzes werden durch den vorgesehenen Umbau des Energieversorgungssystems eine immer größere Rolle spielen.

4. Ressourcenschonung und CO₂-Minderungspotential durch optimierte Nutzung von Naturgasen zur Wärmeversorgung

Die vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Strategien zur Versorgung von Gebäuden mit Niedertemperaturwärme unter den Aspekten der technischen Effizienz und der Integration fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energiequellen führt zu folgendem Ergebnis:

Von den aktuell und mittelfristig verfügbaren Nutzungspfaden führt die Strategie einer exklusiven Veredelung des Brennstoffs Gas zu elektrischem Strom in Gas-GuD-Großkraftwerken in Kombination mit dezentral eingesetzten elektrischen Wärmepumpen zu den besten Ergebnissen. Zum Zweck der Ressourceneffizienz sowie des Klimaschutzes ist insofern eine Umstellung der Wärmeversorgung von Gebäuden im Sinne dieser Strategie möglichst kurzfristig anzustreben.

Die Potentiale zur Einsparung des Brennstoffs Gas aus einer solchen Strategie ergeben sich aus der JAZ der elektrischen Wärmepumpe sowie dem angenommenen durchschnittlichen Nutzungsgrad bestehender Gasheizungen. Bei einem für die Heizkessel angenommenen Nutzungsgrad von 90 % sparen Wärmepumpen mit JAZ zwischen 2,5 und 5 35 bis 67 % der zur Raumwärmebereitstellung eingesetzten Gase ein.

Bezogen auf die Herausforderungen des Klimawandels ist dies allerdings erst ein Zwischenergebnis. Denn im Sinne der anzustrebenden Nutzungskaskade der verbleibenden fossilen Energieträger ergibt sich aus dem Einsparpotential zugleich ein Verdrängungspotential von Energieträgern geringerer Klimaeffizienz. So könnten die nicht mehr für die Versorgung mit Raumwärme gebrauchten Gase im Strombereich klimaschädlichere Brennstoffe wie Steinkohle und insbesondere Braunkohle verdrängen, aber auch den beschlossenen Atomausstieg vorantreiben. Das Substitutionspotential beträgt, wiederum in Abhängigkeit von der angenommenen Jahresarbeitszahl der elektrischen Wärmepumpe und bezogen auf die Verbrauchsdaten von 2010, zwischen 70 und 140 TWh. Damit hätte die Kombination von GuD-Kraftwerken mit elektrischen Wärmepumpen schon bei Annahme einer JAZ von 3,5 ein höheres CO₂-Minderungspotential im Strombereich als derzeit alle erneuerbaren Energieträger gemeinsam, die im Jahre 2010 mit 103 TWh 17 % des Stromverbrauchs abdeckten [11].

Mit den frei werdenden Gasressourcen kann natürlich nicht nur die Klimabilanz im Stromsektor verbessert werden. Auch im Gebäudebereich können sie die Energieträger Öl und Kohle, die zusammen immerhin noch fast 28 % des Raumwärmebedarfs decken, sowie elektrische Speicherheizsysteme vollständig verdrängen. Dabei ist ein mittelfristiger Ersatz von Öl- und Kohleheizungen sowie von elektrischen Speicherheizsystemen durch Wärmepumpen nicht nur klimapolitisch besonderes effektiv, sondern auch technisch nahe liegend, da der Wechsel keine zusätzlichen Infrastrukturkosten (Gasleitungen oder -tanks, Fernwärmeleitungen) erfordert. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Nutzungsgrad der bestehenden Heizungsanlagen von 90 % (Gas) bzw. von 85 % (Öl- und Kohle) können diese Anlagen durch die kombinierte Ausbaustrategie von GAS-GuD-Kraftwerken und Elektrowärmepumpen schon ab einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 2,6 vollständig ersetzt werden. Das entspricht (auf der Basis der Daten des Jahres 2010) unter Berücksichtigung der Vorketten einem CO₂-Minderungspotential von über 60 Millionen Tonnen, was die CO₂-Vermeidung durch Einsatz erneuerbarer Energien im Wärmemarkt in Höhe von derzeit von knapp 40 Millionen Tonnen [12] signifikant übertrifft. Der elektrische Energiebedarf der bestehenden Speicherheizsysteme würde sich durch einen Ersatz durch WP-Systeme zusätzlich um bis zu 75 % (bei JAZ der elektrischen Wärmepumpe von 4) reduzieren.

Stellt man komplett auf die vorgeschlagene Wärmeversorgungsstrategie um, könnte man aus den Gasressourcen, die derzeit (Basis Verbrauchsdaten 2010) in Gebäuden genutzt werden, zusätzlich zu den Substitutionseffekten im Gebäudebereich einen Bruttostromertrag von bis zu 102 TWh erzielen (in Abhängigkeit von der angenommenen Effizienz der elektrischen Wärmepumpe). Im

besten Fall (JAZ = 5) entspricht dies annähernd dem Beitrag, den derzeit sämtliche erneuerbare Energieträger im Strombereich gemeinsam erbringen (2010: 103 TWh) und reicht nahezu an den Bruttostrombeitrag aus Steinkohlekraftwerken heran (Bruttostromerzeugung in Steinkohlekraftwerken 2010: 117 TWh) (siehe Bild 6).

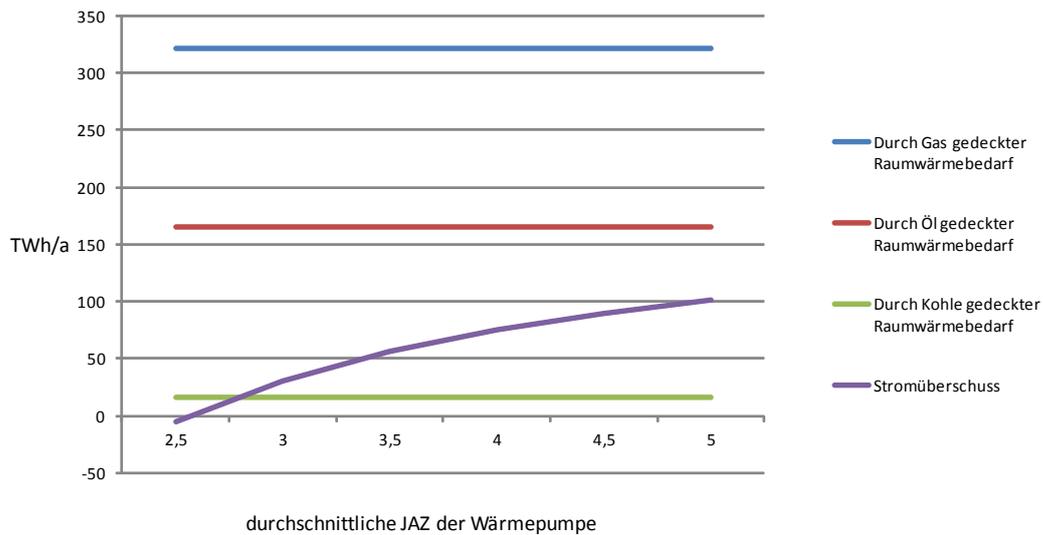


Bild 6: Stromaufwand und -überschuss aus der Substitution der Energieträger Erdöl, Gas und Kohle durch elektrische Wärmepumpen zur Raumwärmeversorgung bei Verstromung des bisher zur Wärmeversorgung genutzten Gases in GuD-Kraftwerken (Verbrauchsdaten 2010).

Nutzt man diesen Stromüberschuss, um Strom aus Steinkohlekraftwerken zu verdrängen, ergeben sich unter Einbeziehung der CO₂-Minderungseffekte im Raumwärmebereich jährliche Vermeidungspotentiale in Höhe von 60 bis 160 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid. Dabei ist die Möglichkeit, überschüssige Einspeisungen aus Windkraft- und Solarstromanlagen abzuschöpfen, sowie der Ersatz von elektrischen Speicherheizsystemen durch Elektrowärmepumpen noch nicht berücksichtigt.

5. Fazit

Eine den Strom- und Wärmemarkt übergreifende Strategie für einen optimierten Einsatz von Brennstoffen im Energieversorgungssystem offeriert schon mit Blick auf Gase aus fossilen Quellen immense Klimaentlastungspotentiale, die bereits ohne Absenkung des Nutzenergieverbrauchs erschlossen werden können. Verstärkte Gasimporte sind nicht erforderlich, denn die Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf die Gasmengen, die ohnehin schon in Gebäuden zur Wärmeversorgung genutzt werden. Hinsichtlich der Gasimporte ist diese Betrachtung also neutral, mit Blick auf die substituierbaren Öl- und Kohleressourcen führt sie zu einer erheblichen Reduktion der Importabhängigkeit. **Zugleich bietet die Strategie, Gase der hocheffizienten Stromerzeugung vorzubehalten und die Wärmeversorgung über Elektrowärmepumpen vorzunehmen, die beste Grundlage für einen gleitenden Übergang in ein Energieversorgungssystem auf Basis erneuerbarer Energieträger.** Denn diese Strategie wird sowohl der zukünftig unvermeidbaren Dominanz fluktuierender Primärstromangebote gerecht als auch der zentralen Herausforderung, den Verbrauch an fossilen wie regenerativen Brennstoffen auf ein Minimum zu reduzieren. Sie kann einen kaum verzichtbaren Beitrag leisten, Deutschland „in Zukunft bei wettbewerbsfähigen Energiepreisen und hohem Wohlstandsniveau“ zu einer „der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften der Welt werden“ zu lassen.

Quellen

- [1] Energiekonzept der Bundesregierung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung vom 28. September. Berlin 2010.
- [2] Michel, Hartmut: Die natürliche Photosynthese: Ihre Effizienz und Konsequenzen. In: Peter Gruss/Ferdi Schüth (Hrsg.): Die Zukunft der Energie. München 2008.
- [3] Lüking, Rolf-Michael und Gerd Hauser: Nachhaltige Energieversorgung von Gebäuden. In: Technik am Bau, 10/2009, S. 62-66.
- [4] FAOSTAT – FAO Statistics Division: Data Archives. Internet: www.faostat.fao.org. Rom: food and Agriculture Organization of the United Nations. 2008.
- [5] Sterner, Michael: Erneuerbares Methan. In: Solarzeitalter 1/2010, S. 51-58.
- [6] Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung des Statistischen Bundesamts, Stand I. Quartal 2010. Wiesbaden.
- [7] Lüking, Rolf-Michael und Gerd Hauser: Die thermische Konditionierung im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Stuttgart: IRB-Verlag, 2011.
- [8] Miara, Marek: Wärmepumpen-Effizienz. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Stuttgart 2010.
- [9] Agendagruppe Lahr: Schlussbericht, Zweijähriger Feldtest Elektro – Wärmepumpen am Oberrhein. 2009
- [10] Schüwer, Dietmar et al.: MINI- Technologiefolgenabschätzung Gas-Wärmepumpe. Heidelberg/Wuppertal 2008.
- [11] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: BRD-Stromerzeugung 1990 – 2011 nach Energieträgern. Stand 14.12.2011.
- [12] Bundesministerium für Umwelt: Erneuerbaren Energien in Zahlen. Stand: Dezember 2011.

