CARNOT-COURNOT NETZWERK
für Politikberatung in Technik und Wirtschaft

Betrachtungen zum Energiesystem der USA

Mario A. Corti[1]

Essay, Juni 2019

"Erstens kommt es anders, und zweitens als man denkt": manche Dinge entwickeln sich nicht so, wie man es einmal erwartete. Das gilt auch für den Wandel in Energiesystemen. Diese werden durch sich laufend verändernde, "externe" Bestimmungsfaktoren beeinflusst – und unterliegen gleichzeitig "internen" Anpassungsprozessen verschiedenster Art. Das Zusammenspiel all dieser Faktoren ist so komplex, dass sich selbst auf den ersten Blick einleuchtende Prognosen im Nachhinein als komplett falsch entpuppen können. Die empirische Evidenz hierfür ist erdrückend. Vorhersagen für den Zustand eines nationalen Energiesystems – selbst kurzfristige – müssen deshalb immer kritisch hinterfragt werden. Das braucht manchmal Mut: gegen eine einmal vorherrschende, öffentliche Meinung anzuschwimmen ist selten populär oder – neudeutsch – "politically correct". Galileo Galileo würde dem nicht widersprechen.

In den Energiesystemen der Welt wurden – seit ungefähr der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts – technologische Durchbrüche erzielt, die man sich vorher gar nie vorstellen konnte. Lange war der Mensch ausschliesslich auf seine eigene Muskelkraft – ergänzt durch jene von Nutztieren – angewiesen. Zwar entdeckte man früh den Wert des Feuers sowie die Kraft des Windes und des Wassers: Windmühlen, Segelschiffe und Wasserräder zeugen davon. Dann aber änderte sich über viele Jahrhunderte nicht allzu viel.

Der entscheidende Durchbruch, um den Menschen von seinen anatomisch bedingten Fesseln zu befreien, erfolgte erst mit bahnbrechenden Erfindungen wie der Dampfmaschine, dem Verbrennungsmotor oder der Turbine. Dank diesen Erfindungen gelang es im Laufe der Zeit immer besser, in der Natur gespeicherte chemische Energie in nützliche mechanische Energie zu verwandeln. Das "fossile Zeitalter" hatte begonnen. Im ausgehenden 19. Jahrhundert entdeckte man ausserdem, dass mit einem Generator Gleichstrom und mit einem Alternator Wechselstrom erzeugt werden kann: mit der Glühbirne und dem Elektromotor begann auch das «elektrische Zeitalter».

Zum Betrieb der neuartigen «Wärmekraftmaschinen» («heat engines») mussten – in rasch zunehmendem Ausmass – auf und im Boden vorhandene Energievorräte abgebaut werden. Im Verbrennungsprozess wird in der Natur gespeicherte Energie verwandelt – in mechanische, aber auch – überwiegend – in thermische Energie: "verlorene" Wärme. Der junge Nicolas Léonard

[1] Der Autor dankt seinen CCN-Kollegen für wertvolle Anregungen und Verbesserungsvorschläge. Ein spezieller Dank gebührt Markus Saurer zudem für die Übertragung des Textes in druck- und internetfähige Formate.

Sadi Carnot (1796 – 1821) verstand das als einer der Allerersten. Seine profunden Einsichten über die Gesetze der Thermodynamik gelten bis heute.

Die im Verbrennungsprozess erzeugten Substanzen werden in die "Umwelt" entlassen – ins Wasser, in die Luft oder in den Boden. Entsprechend erkannte man schon relativ früh das Problem einer "rein von Menschen" verursachten Umweltbelastung. Diesbezüglich wurden seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs Fortschritte erzielt. In meiner Kindheit war noch regelmässig vom berüchtigten "London Smog" die Rede – davon sind wir heute zum Glück ziemlich weit entfernt. China und Indien – ganz zu schweigen von vielen anderen Ländern – befinden sich aber zumindest teilweise noch exakt in diesem Stadium: in jenem, das der "Westen" auch einmal durchlief. Das dürfte sich allmählich verbessern.

Die Frage hingegen, ob – zusätzlich zu dem in der Atmosphäre immer ungleich verteilten Wasserdampf – der durch Verbrennungsvorgänge verursachte Ausstoss von sogenannten "Treibhausgasen" – darunter an prominenter Stelle Kohlendioxid – auch Änderungen klimatischer Natur bewirken könnte, wurde lange nur von vereinzelten Zeitgenossen gestellt.

1972, als ich mein Berufsleben begann, war weder eine "Energiekrise" (der erste "Ölschock" erfolgte im Herbst 1973) noch eine "Klimakrise" (der Club of Rome" publizierte seinen ersten Bericht "The Limits of Growth" im gleichen Jahr) ein in der breiten Öffentlichkeit diskutiertes Thema. Das hat sich inzwischen geändert. Zwanzig Jahre später fand in Rio de Janeiro die «United Nations Conference on Environment and Development» statt, und William Cline publizierte sein Buch «The Economics of Global Warming» (Juni 1992). Seither ist die Literatur zum ganzen Spannungsfeld zwischen Energie, Umwelt und Klima derart angeschwollen, dass sie kaum mehr zu überblicken ist.

Für viele Geologen, Ozeanographen und Klimatologen ist kontinuierlicher Wandel in, auf und über dem Erdball – mit seinen immensen Ozeanen und seiner dünnen Atmosphäre – eine wissenschaftliche Selbstverständlichkeit. Diese Wissenschafter denken in langen Zeiträumen: so gesehen ist das "fossile Zeitalter" vielleicht in der Tat dereinst – im Rückblick gesehen – nicht viel mehr als ein kurzer «Ausreisser» in der Geschichte unserer Erde.

Der Durchmarsch über viele Stufen hinweg vom Brennholz über Torf, Holzkohle, Koks und Kohle zu Öl und Gas – bis hin zur Kernenergie und den "neuen" erneuerbaren Energien wie Solar und Wind – erfolgte, gemessen an der Lebenszeit unseres Planeten, ausserordentlich rasch. Seit dem Beginn der industriellen Revolution verwandelte sich die Welt tiefgreifend: viele Erdbewohner konnten ihren Lebensstandard deutlich steigern.

Der persönliche Energieverbrauch korreliert für die meisten Menschen recht eng mit ihrem Lebensstandard. Eine missionarische «Dämonisierung» des Energieverbrauchs an sich greift deshalb zu kurz – wer möchte wohl freiwillig mit der Lebensqualität im 18. Jahrhundert tauschen?

Könnte Energie kostenlos – und ohne Nebenwirkungen – erzeugt, gelagert, transportiert und verbraucht werden, würde heute anders diskutiert. Die Menschheit steht indessen – wie es der in Kiel lehrende, 1970 verstorbene Ökonomieprofessor Ernst Schneider einmal prägnant formulierte – unter dem «kalten Stern der Knappheit». Nichts ist kostenlos, selbst nicht Wasser und Luft – Ressourcen, welche im klassischen universitären Unterricht lange als (angeblich) «freie Güter» galten. Zudem hat sich die Weltbevölkerung im Lauf jeweils etwa einer Generation wiederholt verdoppelt – was den globalen Energiebedarf geradezu explodieren liess. Dieser Bedarf

wird weltweit gesehen insgesamt weiterhin ansteigen, wenn auch mit vermutlich allmählich abflachender Tendenz.

Die unveränderte Kernfrage bleibt: wie kann Energie nicht nur kostengünstig, sondern auch – bezüglich Umwelt und Klima – möglichst schonend erzeugt, gelagert, transportiert und verbraucht werden?

Schlittert die Welt ohne ein ganzes Bündel von staatlich neu zu dekretierenden Massnahmen vielfältigster Art zur Stabilisierung und anschliessenden Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen unaufhaltsam und unweigerlich in eine Grosskatastrophe? Oder kann es – vor allem dank technologischen Durchbrüchen – innovativen Marktkräften gelingen, neue Antworten zur Entschärfung der ganzen Problematik zu finden? Hat die Natur selbst vielleicht Pfeile im Köcher, über die man heute noch zu wenig weiss – zum Beispiel in Form von komplexen Rückkoppelungseffekten oder, was bedenklicher wäre, gar nichts wissen will? An diesen anspruchsvollen Fragen scheiden und erhitzen sich die Geister und Gemüter enorm, wie man täglich feststellen kann.

Wie dem auch sei, eine Tatsache bleibt unbestreitbar: technologischer Wandel verbreitet sich nie über Nacht. Einmal gebaute Energiesysteme haben ein grosses Beharrungsvermögen. Physiker sprechen von der Trägheit der Masse. Auf der Erzeugungsseite wie auch auf der Verbrauchsseite ist – in massivem Umfang – Kapital in vielfältigen, technisch genau spezifizierten Ausgestaltungen gebunden.

Angebotsseitig erfolgten über viele Jahrzehnte hinweg riesige Investitionen in den Abbau und Transport von fossilen Energieträgern – und in den Bau teurer Kraftwerkanlagen mit ausgeklügelten Übertragungssystemen für die damit erzeugte elektrische Energie. Auf der Nachfrageseite wurde in unzählige Gebäude und in eine gewaltige Verkehrs- und Transportinfrastruktur investiert – inbegriffen kostspielige "mobile" Sachanlagen wie Fahrzeuge, Lokomotiven, Schiffe, Flugzeuge etc.

Die Trägheit der "hardware" Seite von Energiesystemen – auf der Angebots- wie auf der Nachfrageseite – kann nicht durch Wunschdenken beseitigt werden. Änderungen und Übergänge ("transitions") brauchen deshalb immer Zeit. Eine Erneuerung in der technischen Zusammensetzung des investierten Kapitals muss graduell über die Bühne gehen: weder kann ein Kraftwerkpark über Nacht umgekrempelt werden, noch kaufen Autobesitzer jedes Jahr ein neues Fahrzeug – oder Hausbesitzer ein energiesparmässig auf dem letzten Stand ausgerüstetes Zuhause.

Etwas weniger Trägheit existiert auf der – immer noch relativ neuen – "software" Seite von Energiesystemen. Vernetzte Computer, im Verbund mit immer raffinierteren Sensoren und Prozessoren aller Art, verändern unsere Welt rasant – und konsumieren, nebenbei gesagt, viel Energie. Die vielzitierte "Digitalisierung" eröffnet aber sicher neue und grosse Chancen – was Prognosen nicht leichter macht.

Ich versuche in diesem Essay, eine Art Auslegeordnung des US-amerikanischen Energiesystems vorzunehmen. Energiesysteme widerspiegeln immer eine spezifische Wirtschafts- und Gesellschaftsstruktur. Deshalb lassen sich Einsichten oder Lehren (aus Erfolgen wie Misserfolgen) nicht einfach «tel quel» von einem Land zum andern übertragen. Weder ist in den USA «alles besser», noch ist «alles schlechter»: manches ist aber – historisch bedingt – einfach «anders». Das flächen- und bevölkerungsmässig drittgrösste Land der Erde ist und bleibt in mancherlei Hinsicht «sui generis».

Die Vereinigten Staaten verfügen über enorme eigene Energieressourcen und stehen in Wissenschaft, Forschung und Technik auf hohem Niveau. In vielen Lebensbereichen herrscht starker Wettbewerb – nicht zuletzt in jenem von Ideen und Innovationen. Entsprechend intensiv wird auch hierzulande über die «richtige» Ausgestaltung der künftigen Energielandschaft diskutiert.

In Anlehnung an eine im «Kaufmann von Venedig» geäusserte Einsicht gilt eines mit Sicherheit: «Reden ist leichter als Wissen, und Wissen ist leichter als Handeln». Niemand kann aber alles wissen – und zudem ist das menschliche Wissen ständig im Fluss: "Education is the progressive discovery of our own ignorance" (Will Durant, 1885 – 1981). Etwas mehr Bescheidenheit und Besonnenheit – und etwas weniger rechthaberische Besserwisserei – wären bei der Diskussion all dieser komplexen Fragen wohltuend.

Der amerikanische Energiefluss: Ein Überblick

Die USA konsumierten im Jahr 2017 Primärenergie im Umfang von geschätzten 97.7 Quad BTU (British Thermal Units, Quad ist die Abkürzung für Quadrillionen). Zum Vergleich: im gleichen Jahr hatte die Schweiz – gemäss Gesamtenergiestatistik des Bundesamts für Energie – einen Bruttoenergieverbrauch von 1.08 Millionen Terajoules (TJ), was umgerechnet etwa 1.17 Quad BTU entspricht

Der Gesamtverbrauch an Primärenergie zwischen 2006 (dem letzten Jahr vor Ausbruch der grossen Wirtschaftskrise) und 2017 blieb in beiden Ländern annähernd stabil:

	2006	***2017***	***Veränderung (%)***
USA (in Quad BTU)	*97.1*	*97.7*	*0.6 %*
Schweiz (in Quad BTU)	*1.26*	*1.17*	*-0.7 %*

Quellen: DOE/IEA und BFE.

Diese Stabilisierung ist umso bemerkenswerter, als in dieser Zeitspanne die Wohnbevölkerung in beiden Ländern zugenommen hat: in den USA um schätzungsweise fast 9 %, in der Schweiz sogar um mehr als 13 %.

In den USA wird – nicht nur absolut, sondern auch relativ betrachtet – bedeutend mehr Energie verbraucht als in der Schweiz. Das Verhältnis der Wohnbevölkerung liegt bei etwa 38:1 (325 Millionen geteilt durch 8.5 Millionen); beim Primärenergieverbrauch beträgt das Verhältnis aber 84:1 (97.7 geteilt durch 1.17). Pro Kopf wird in den USA demnach mehr als das Doppelte an Primärenergie verbraucht.

Diese Diskrepanz erklärt sich aus einer ganzen Reihe von historischen, geographischen und kulturellen Gründen. Energie war in Nordamerika seit dem Beginn der Industrialisierung immer reichlich vorhanden und blieb entsprechend billig. Das ganze hiesige «Energiesystem» wurde auf dieser Grundlage aufgebaut. Darauf wird zurückzukommen sein: eine «geheime» Energiereserve der Vereinigten Staaten ist nämlich das immer noch bedeutende Einsparungspotenzial in vielen Bereichen des Verbrauchs.

In der obigen Tabelle nicht berücksichtigt ist der (in beiden Ländern) im Zuge der schleichenden Desindustrialisierung immer bedeutender gewordene Import «grauer» Energie in Form von Halb- und Fertigprodukten. Versucht man, dem Rechnung zu tragen, relativiert sich das verbreitete Bild vom Gegensatz zwischen «Sünder» und «Musterknabe».

Stellvertretend für den Energiegehalt von Importen und Exporten dienen die mit den Produktionsprozessen verbundenen Emissionen von Kohlendioxid. Die letzten Schätzungen der OECD, welche diesbezüglich zur Verfügung stehen beziehen sich auf das Jahr 2015.

Sie zeigen folgendes Bild (in Millionen Tonnen Kohlendioxid):

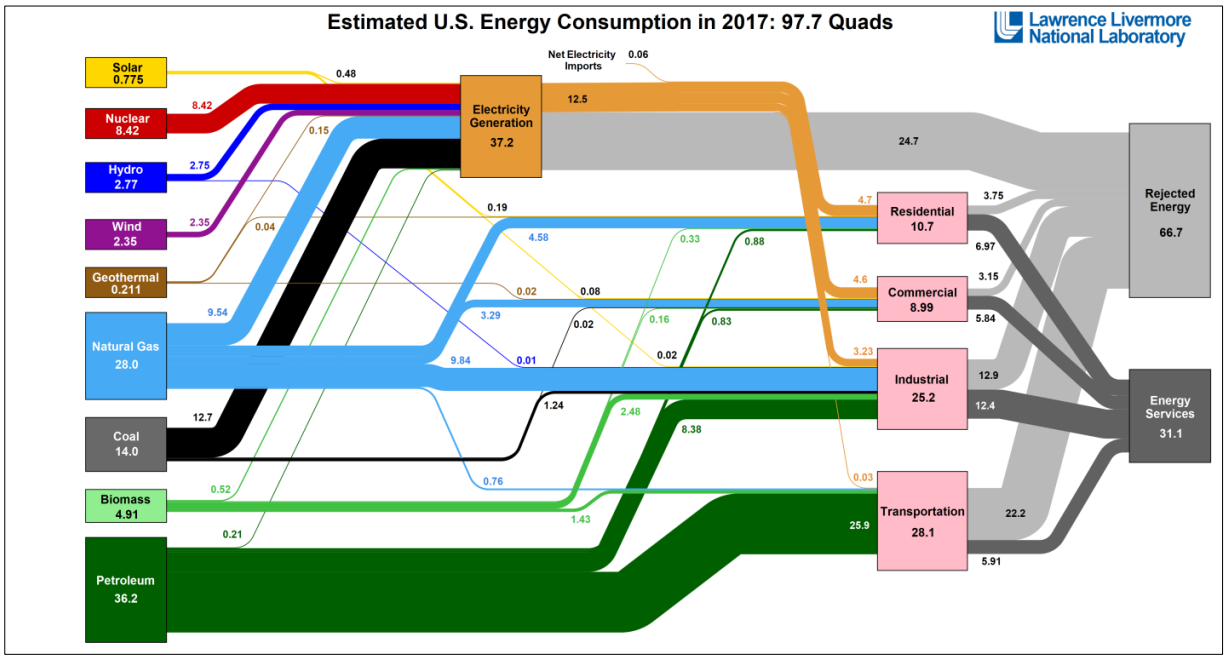
	USA	Schweiz
A. Im Inland produzierte Emissionen	*5020.0*	*44.9*
B. In der Endnachfrage enthaltene Emissionen	*5794.5*	*94.2*
C. Im Nettoimport enthaltene Emissionen	*774.5*	*49.3*
Verhältnis von B. zu A.	*1.15*	*2.10*
Verhältnis von C. zu B. (in %)	*13.3%*	*52.3%*

Quelle: OECD, Datenreihe «Carbon Dioxide Emissions embodied in International Trade, April 2019.

Bereinigt man also die konventionelle, produktionsbasierte Rechnung um den Beitrag der importierten grauen Energie, wird klar, weshalb gängige Vorstellungen manchmal etwas hinterfragt werden sollten.

Das nachfolgende Diagramm, welches jedes Jahr vom Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) unter der Schirmherrschaft des DOE (Department of Energy) und ihrer EIA (Energy Information Agency) erstellt wird, gibt einen guten Überblick über den amerikanischen Energiefluss.

Grafik 1: Estimated US Energy Consumption in 2017: 97.7 Quads



Originalgrafik
(Klick auf den Vermerk «Originalgrafik führ jeweils zur Internetseite des Originals.)

Erdöl, Erdgas und Kohle liefern zusammen rund 80 % der amerikanischen Primärenergie; weitere 9 % stammen aus Nuklearenergie. Die restlichen 11 % kommen aus «erneuerbaren» Energien, innerhalb deren hydroelektrische Energie vorläufig noch dominiert.
In der Mitte des Diagramms erkennt man oben (orange) die grosse Bedeutung der Erzeugung von Elektrizität, d.h. von «Sekundärenergie»: dieser Sektor absorbiert bereits mehr als 38 % der gesamten Primärenergie – mit leicht steigender Tendenz.

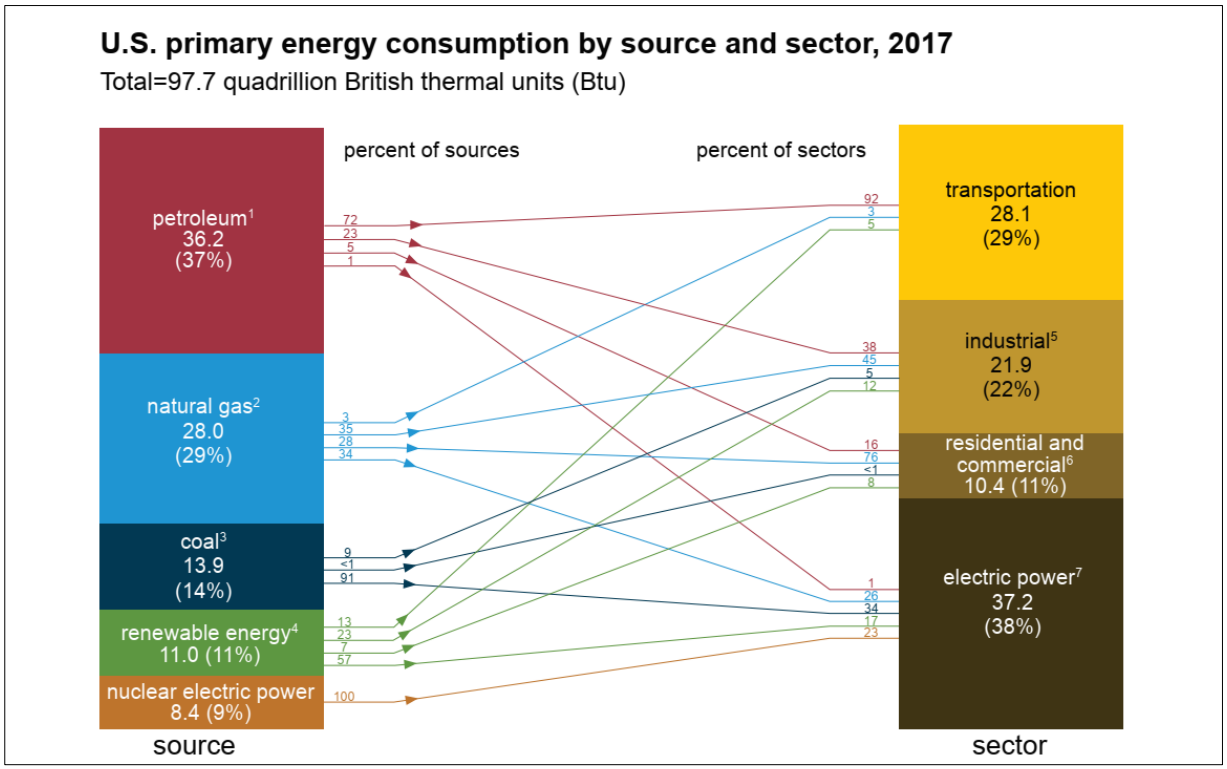
Weiter rechts erkennt man (rosa) die vier eigentlichen Verbrauchssektoren «Residential», «Commercial», «Industrial» und «Transportation».

Ganz rechts unten folgt dann (dunkelgrau) die effektiv konsumierte Endenergie in Form von «Energy Services» – sowie ganz rechts oben (hellgrau) der gesamte Systemverlust an Energie, zumeist in Form von nicht genutzter Wärme. Mehr als zwei Drittel des Primärenergieverbrauchs (66.7 Quad BTU) fliessen somit gar nie bis zum Endenergiekonsumenten. Diese Verluste fallen vor allem an (I) bei der Umwandlung von thermischer Energie in Elektrizität (37 % des Gesamtverlusts), (II) im Transportsektor (33 %) und (III) in der Industrie (19 %). Die übrigen Verlustquellen («Residential» und «Commercial») machen 11 % des Gesamtverlusts aus. Das zeigt auf, wo – soweit thermodynamisch möglich – die grössten Einsparungen erzielt werden könnten.

Analysiert man (I) etwas detaillierter, so fällt auf, dass insbesondere der Anteil der konventionellen thermischen Anlagen (Gas und Kohle) einen schlechten Wirkungsgrad von knapp 30% ausweist. Bei den meisten gasgefeuerten Kraftwerksanlagen in den USA handelt es sich aber um relativ moderne CCGT- Anlagen (Combined Cycle Gas Turbines) sowie um Hybridanlagen im Zusammenhang mit Windparks (Gasmotoren), welche alle einen relativ hohen Wirkungsgrad über einen weiten Betriebsbereich haben. Der schlechte Gesamtwirkungsgrad in der Mischrechnung beruht deshalb wohl vor allem auf alten kohlegefeuerten Anlagen, welche nie nachgerüstet wurden: Kohle war einfach zu billig.

Betrachten wir nun den Fluss der Primärenergie zu den Verbrauchssektoren etwas näher.

Grafik 2: US primary energy consumption by source and sector, 2017



Originalgrafik (mit Legende)

Links sieht man die fünf Primärenergiequellen: fossile Träger dominieren. Rechts sieht man die Nutzung dieser Quellen durch die vier Verbrauchssektoren («Residential» und «Commercial» sind hier zusammengefasst). Durch Anklicken kann man links sehen, welche Quelle wohin liefert – und rechts, welcher Sektor von welcher Quelle die Primärenergie bezieht.

Links beginnend und von oben nach unten betrachtet sieht man Folgendes:

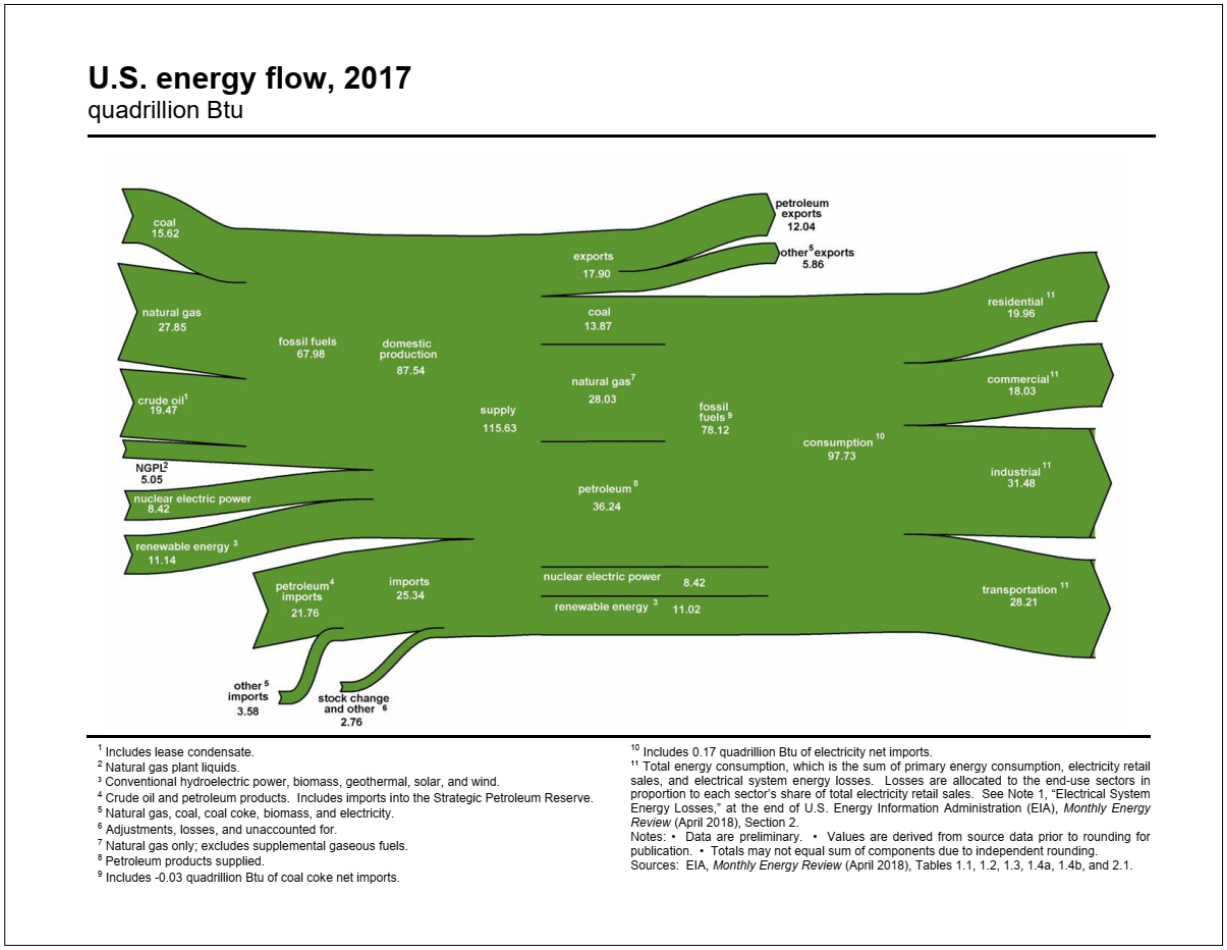
a. 95 % des Erdöls fliesst in nur zwei Sektoren, nämlich «Transportation» und «Industrial»;
b. 97 % des Erdgases strömt zu in etwa vergleichbaren Anteilen in alle Sektoren ausser «Transportation»;
c. 91 % der Kohle wird vom Elektrizitätssektor absorbiert;
d. 57 % der erneuerbaren Energien (hauptsächlich aus Wasserkraft) fliesst in den gleichen Sektor;
e. 100% der Nuklearenergie wird für die Erzeugung von Elektrizität verwendet.

Die grösste «Diversifikation» bezüglich Belieferung der Verbrauchssektoren besteht somit schon heute beim Erdgas, gefolgt von den erneuerbaren Energien. Auf der rechten Seite der Grafik erkennt man Folgendes:

f. 92 % des Verbrauchs im Transportsektor beruht auf Erdöl;
g. Die Industrie verbraucht primär Erdgas (45%) und Erdöl (38 %);
h. «Residential und Commercial» verbrauchen zusammen überwiegend Erdgas (76%) und Erdöl (16 %);
i. Der Elektrizitätssektor ist recht breit diversifiziert und benutzt praktisch kein Erdöl.

In einer nochmals etwas anderen Darstellung wird der ganze Elektrizitätssektor «herausgerechnet», um den gewissermassen «direkten» Fluss der Primärenergie in die vier Verbrauchssektoren zu illustrieren.

Grafik 3: US Energy Flow, 2017 in Quad BTU



Originalgrafik

Unter Einbezug der Importe standen den USA insgesamt 115.6 Quad BTU zur Verfügung. Nach Abzug der Exporte von 17.9 Quad BTU erhält man die bereits bekannten 97.7 Quad BTU. Die USA exportierten somit bereits 2017 Energie in einem Ausmass, das den gesamten Primärenergieverbrauch der Schweiz um das Fünfzehnfache überstieg.

Wie werden all diese Energieflussdiagramme in ein paar Jahren aussehen? Niemand weiss das. Aber in den vergangenen knapp zehn Jahren hat sich die Ausgangslage der USA – vor allem als Folge der Einführung neuer Fördertechnologien wie «hydraulic fracturing» – auch «fracking» genannt – und «directional drilling» dramatisch verändert. Von 2005 bis 2017 stieg die Erdgasproduktion um mehr als 54 % – und die Erdölproduktion sogar um rund 80 % (IER März 2019).

2017 führten die Vereinigten Staaten gemäss EIA weltweit in der Produktion von Erdöl (vor Saudi-Arabien und Russland) und von Erdgas (vor Russland und Iran). Bei der Produktion von Elektrizität liegen die USA auf dem zweiten Platz (hinter China), in der Produktion von Kohle liegt das über nach wie vor sehr grosse Reserven verfügende Land (man nannte es einmal «das Saudi-Arabien der Kohle») immer noch an dritter Stelle, hinter China und Indien.

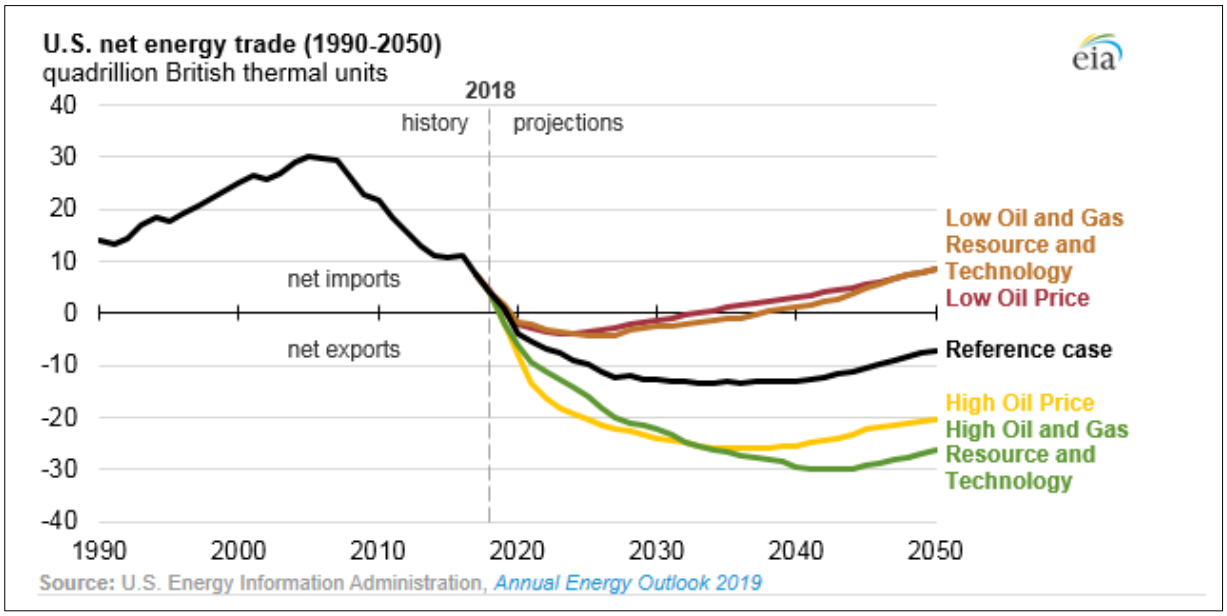
Da Erdgas bereits heute die breiteste Verwendung findet – und vorderhand noch keine Rede von «peak gas» sein kann – dürfte der Vormarsch von Erdgas weiterhin rasch fortschreiten. Dies auch

deshalb, weil Elektrizitätswerke durch die Umstellung von Kohle auf Gas wesentliche Reduktionen beim Ausstoss von Kohlendioxid erzielen. Dies ist mit ein Grund – neben den Importen von «grauer» Energie – weshalb die Vereinigten Staaten in den letzten gut zehn Jahren (2005 – 2017) gemäss EPA (IER 6. März 2019) ihren Gesamtausstoss von Kohlendioxid um 776 Mio Tonnen (14 %) senken konnten. Die USA besetzten damit – gemäss BP Statistical Review of World Energy 2018 – erstaunlicherweise den ersten Platz in der weltweiten «Rangliste» bei der Reduktion im Ausstoss von Kohlendioxid: mit grossem Abstand folgen das Vereinigte Königreich (177 Mio Tonnen) sowie die Ukraine, Italien und Japan mit je 134, 128 und 100 Mio Tonnen.

Der starke Anstieg der Produktion von Erdöl und Erdgas hat den amerikanischen Aussenhandel mit Energie grundlegend verändert. Gemäss Projektionen der EIA (Annual Energy Outlook 2019) werden die Vereinigten Staaten im Jahr 2020 – zum ersten Mal seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts – wieder zu einem Nettoenergieexporteur. Natürlich ist das alles stark abhängig von der künftigen Entwicklung der Öl- und Gaspreise sowie von weiteren technologischen Fortschritten. Ebenfalls zu berücksichtigen sind zunehmende Engpässe im Logistikbereich – der Energieexportboom strapaziert die amerikanischen Infrastrukturen, vor allem am Golf von Mexiko.

Wie praktisch jedermann in der Energiewirtschaft arbeitet die EIA mit Szenarien. Im sogenannten «reference case» wird u.a. angenommen, dass (1) mit den heute bestehenden Gesetzen und Regulierungen weitergearbeitet wird; (2) die Rohölproduktion vorderhand weiter steigt und gleichzeitig der einheimische Verbrauch von Petroleumprodukten sinkt; (3) Erdgas zunehmend in Form von LNG exportiert werden kann und (4) die Exporte von Kohle stagnieren, weil andere Lieferanten kostengünstiger operieren. All das ist mit grosser Unsicherheit behaftet, aber das Bild ist schon interessant:

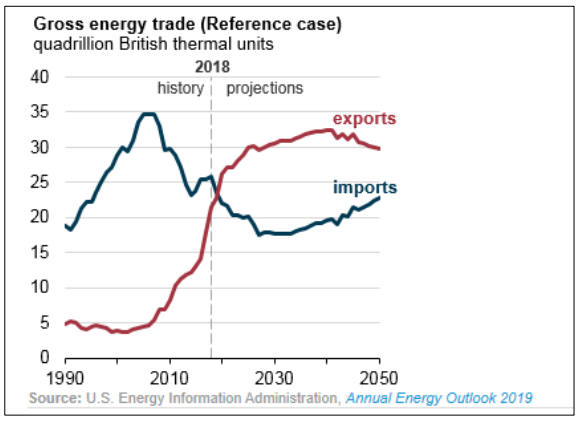
Grafik 4: The US is expected to export more energy than it imports by 2020



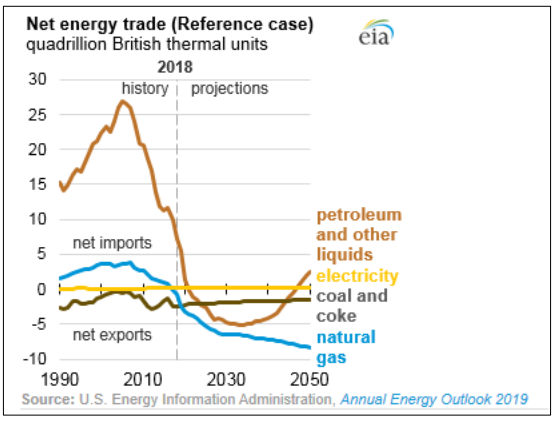
Originalgrafik

Beschränkt man sich auf das Basisszenario, erkennt man unschwer, dass sich die USA tatsächlich an einem Wendepunkt zu befinden scheinen:

Grafik 5: Gross Energy Trade (Reference case)



Grafik 6: Net energy trade (Reference case)



Originalgrafiken

Besonders eindrücklich ist Grafik 6. Man sieht deutlich den drastischen Rückgang der Nettoimporte von Erdöl und Erdölprodukten sowie (etwas weniger ausgeprägt) von Erdgas. Das alles darf man selbstverständlich nicht einfach extrapolieren: viele Beobachter gehen davon aus, dass der «fracking boom» früher oder später aus einer ganzen Reihe von Gründen wieder abflauen könnte.

Die vorstehenden Ausführungen bezweckten vor allem, eines festzuhalten: in den weltweiten Debatten um Energie, Umwelt und Klima befinden sich die USA heutzutage in einer ziemlich einzigartigen Situation. Zwar prallen die hiesigen Fronten in den hitzigen Umwelt- und Klimadebatten oft ebenso hart zusammen wie in anderen Ländern; das Problem der «Versorgungssicherheit», das besonders nach der ersten und der zweiten Erdölkrise (1973 und 1979) grosse Sorgen bereitete, ist hingegen völlig in den Hintergrund getreten. Die USA sind heute energiemässig sozusagen autark. Das hat nicht nur bedeutende geopolitische Implikationen, sondern beeinflusst selbstverständlich auch die Art und Weise, wie im ganzen Spannungsfeld zwischen Energie, Umwelt und Klima diskutiert wird.

Kurzporträt der vier Verbrauchssektoren

Es ist eine etwas heroische Aufgabe, auf wenigen Seiten ein solches Porträt zu liefern – zu diesem Thema gibt es ganze Bibliotheken. Ich will trotzdem versuchen, mit einigen Pinselstrichen ein hoffentlich einigermassen zutreffendes Bild zu vermitteln. Dies geschieht in abnehmender Reihenfolge des Konsums von Energie, wie sie der Grafik 1 entnommen werden konnte – also zuerst «Transportation», gefolgt von «Industrial», «Residential» und «Commercial».

Der Transportsektor

Mobilität – beim Transport von Personen, Waren und Informationen – ist für Amerikaner eine Selbstverständlichkeit, die man nicht gross hinterfragt – es sei denn, der Benzinpreis schnelle in ungewohnte Höhe. Fast jedermann besitzt hier ein Auto – das sozusagen als «verlängertes Körperteil» betrachtet wird. Für grössere Distanzen benutzen Amerikaner für geschäftliche und persönliche Reisen das Flugzeug. Sie empfinden es als völlig normal, dass via Internet bestellte Artikel in wenigen Tagen (falls gewünscht über Nacht) via Post, «Federal Express» oder «United Parcel Service» von einer Ecke zu einer anderen Ecke des Landes nach Hause zugestellt werden. Wie gleich gezeigt werden wird, dominiert im Warenverkehr der Transport auf der Strasse. Die Leistungsfähigkeit des ganzen Systems ist beeindruckend – hat aber seinen Preis, nämlich einen hohen Energieverbrauch.

Das war nicht immer so. Dazu eine persönliche Anekdote: vor einigen Jahren hatte ich Gelegenheit, Kansas City zu besuchen. Diese Stadt war Ende des 19. Jahrhunderts ein wichtiger «hub» zwischen dem bereits etablierten Osten und dem aufstrebenden Westen. Ein Erlebnis besonderer Art war der Besuch des riesigen Zentralbahnhofs: der “Union Station”. Dieser Bahnhof wurde 1914 eingeweiht, als es noch keine Zivilluftfahrt gab und Autos notorisch unzuverlässig waren – ganz zu schweigen von den kaum befahrbaren Strassen.

Kurz vor Ausbruch des Ersten Weltkriegs schien es, als ob das goldene Zeitalter der Eisenbahn eben erst begonnen hatte. Die Bahnfahrt von Kansas City östlich nach Saint Louis (quer durch Missouri) erforderte damals (und heute) gut fünf Stunden, was aber als bemerkenswerte Leistung angesehen wurde. Der Bahnhof selbst ist von gewaltiger Grösse – die Haupthalle misst 79,000 Quadratmeter und erhebt sich fast 30 Meter hoch. Allein der Wartsaal hatte ein Fassungsvermögen von 10’000 Personen. Am Ende des Zweiten Weltkriegs erreichte der Bahnhof mit einem Passagieraufkommen von 670’000 Personen 1945 seinen Höhepunkt.

Und nun kommt’s: der Siegeszug von Flugzeug und Auto hatte in der Nachkriegszeit für das US-Bahnsystem verheerende Folgen. Die «Union Station» wurde 1985 für den Passagierverkehr ganz geschlossen. Vor einigen Jahren erfolgten zaghafte Wiederbelebungsversuche: Amtrak betreibt heute m.W. vier pro Tag einfahrende bzw. abfahrende Passagierzüge. Wenn das jemand bei der glanzvollen Eröffnung im Jahr 1914 vorausgesagt hätte, wäre er vermutlich ins Irrenhaus eingeliefert worden. «Erstens kommt es anders, und zweitens als man denkt».

Der Frachtverkehr per Eisenbahn spielt in den USA nach wie vor eine recht bedeutende Rolle. Was man in der Prärie oft sieht sind lange Güterzugkompositionen, die pro Bahnwagen zwei Frachtcontainer (in der standardisierten Grösse) übereinandergestapelt mitschleppen. Dieses

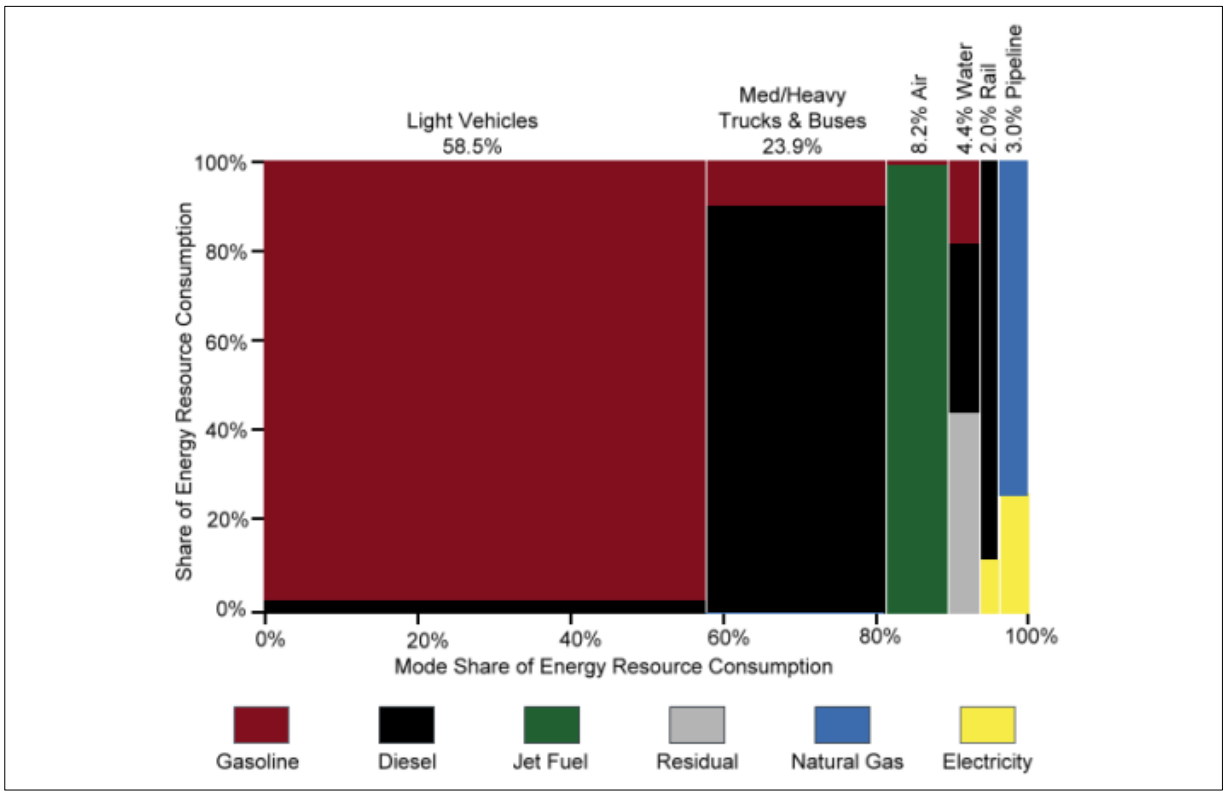
“Intermodal” System für Container hat sich gut eingespielt: die Container werden je nach Bedarf auf der Eisenbahn, im Schiff oder mit Sattelschleppern auf der Strasse transportiert.

Für den Transport von Erdöl und Erdgas dient hingegen – neben der Eisenbahn – in erster Linie ein Pipelinenetz von beachtlicher Grösse: gemäss «American Petroleum Institute» existieren etwa 2,4 Millionen Meilen Pipeline für Gas und 190’000 Meilen für flüssiges Petroleum. Rund 70% der einheimischen Produktion wird per Pipeline transportiert. Es ist der billigste Transportmodus, mit einem Nachteil: gemäss STRATA, einem Branchenverband, braucht der Transport vom Bakken Field (North Dakota) bis zur Golfküste etwa 40 Tage, während die Bahn das in 5 bis 7 Tagen schafft.

Periodisch werden Anläufe unternommen, das hiesige, meist in heruntergekommenem Zustand befindliche Bahnsystem zu modernisieren. Zumeist bleibt das aber (aus vielen Gründen) eine richtige Leidensgeschichte. In letzter Zeit häuften sich wieder einmal Berichte von fehlgeschlagenen oder stornierten Projekten – so in Hawaii, in Kalifornien und bei einem Projekt einer besseren Bahnverbindung zwischen St. Louis und Chicago. Vielleicht werden im dichtbesiedelten Nordosten noch am ehesten Fortschritte erzielt. Ich bin kein Bahnexperte, aber man gewinnt schon den Eindruck, dass – zumindest für den Passagierverkehr auf Langstrecken – der amerikanische Zug im wahrsten Sinn des Worts «abgefahren» ist. Anders sieht es natürlich bei Transitsystemen in städtischen Agglomerationen aus.

Grafik 7 illustriert eindrücklich, wie im Transportsektor der Strassenverkehr den Energieverbrauch dominiert.

Grafik 7: Domestic Consumption of Transportation Energy Use by Mode and Fuel Type, 2016



Originalgrafik

Diese Zahlen aus dem Transportation Energy Data Book, Edition 37 2018, Seite 2-12, widerspiegeln nur den zivilen, nicht aber den – bedeutenden – militärischen Verbrauch.

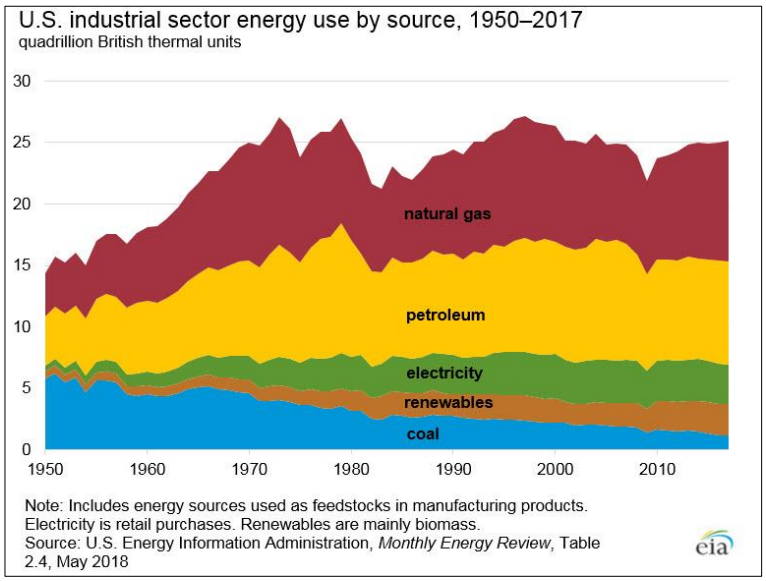
Der Strassenverkehr dominiert mit rund 83 %, gefolgt vom Luftverkehr mit 8 %, dem Wasserverkehr mit 4 % und Pipelines mit 3 %. Der Bahnverkehr absorbiert lediglich 2 %. Unter diesen Umständen dürften in den USA hochfliegende Pläne zur Umstellung der Transportinfrastruktur von «der Strasse» auf «die Schiene» illusorisch bleiben. Verbesserungen müssen primär über die bestehende Infrastruktur (Strassen, Brücken und Tunnels) sowie natürlich über die Fahrzeugflotte selbst erfolgen. Neben weiteren Senkungen des Verbrauchs von konventionellen Treibstoffen, einer intensiveren (jedoch umstrittenen) Nutzung von Ethanol und Biodiesel sowie generell der Umstellung von Erdöl auf Erdgas steht vor allem eine stärkere Elektrifizierung (und Automatisierung?) der Flotte im Vordergrund. Einzelne Experten glauben auch an die mögliche Rolle einer sogenannten Wasserstoffwirtschaft – dazu folgt ein kleiner Exkurs weiter unten.

Der Industriesektor

Die im 19. Jahrhundert beginnende Industrialisierung bewirkte in den USA eine stetige Schrumpfung des Agrarsektors bei der Erzeugung des Volkseinkommens. Gleichzeitig begann der Dienstleistungsanteil sein stetiges Wachstum. Noch vor etwa 50 Jahren hatte der Dienstleistungssektor in den USA einen Anteil von rund 60 %; dieser beträgt heute ungefähr 80 %. Nach Schätzungen des «Bureau of Labor Statistics» erreichte die Beschäftigung in der Industrie im Juni 1979 mit einem Anteil von 28 % ihren Höchststand. Dieser Anteil ist – gemäss Berechnungen der Weltbank – von 1991 bis 2018 kontinuierlich von 25 % auf 19 % zurückgefallen (Schweiz: von 29% auf 21 %). Das hat selbstverständlich einen Einfluss auf den nationalen Energieverbrauch: viel industrielle Produktion wurde ins Ausland (u.a. nach China) ausgelagert.

Es überrascht so gesehen eigentlich nicht, dass der Verbrauch des Industriesektors seit dem Beginn der ersten Erdölkrise (1973) praktisch stabil geblieben ist:

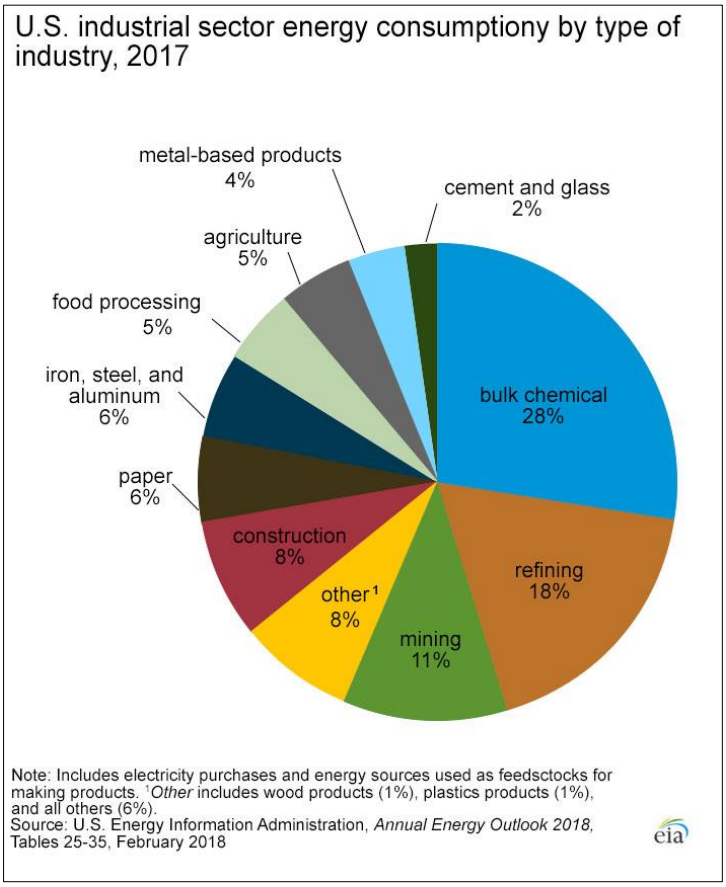
Grafik 8: US industrial sector energy use by source, 1950-2017



Eher überraschend ist vielleicht die grosse Rolle, welche in den USA ausgeprägte «Schwerindustriesektoren» wie Basischemikalien, Raffinerien und Bergbau immer noch spielen: sie absorbieren zusammen rund 57 % des Primärenergieverbrauchs der Industrie.

Originalgrafik (in Batten-Report, S. 3).
Grafik mit Daten bis 2018.

Grafik 9: US industrial energy consumption by type of industry, 2017



Bemerkenswert ist der – im Gegensatz zu immer wieder angestellten Vermutungen – verhältnismässig bescheidene Verbrauch des Agrarsektors: der Anteil liegt bei 5 % – obwohl der Agrarsektor der USA (u.a. gerade dank dem Einsatz von viel Energie) ungeheuer produktiv ist.

In industriellen Tätigkeiten wird immer betriebswirtschaftlich gerechnet: man darf davon ausgehen, dass auch in Zukunft weiterhin versucht wird, aus reinem Eigeninteresse mehr Energie einzusparen und – wo möglich – Kohle und Erdöl durch billigere (und oft zugleich umweltfreundlichere) Energiequellen zu ersetzen.

Grafik mit Daten von 2018.

Der Wohnungssektor

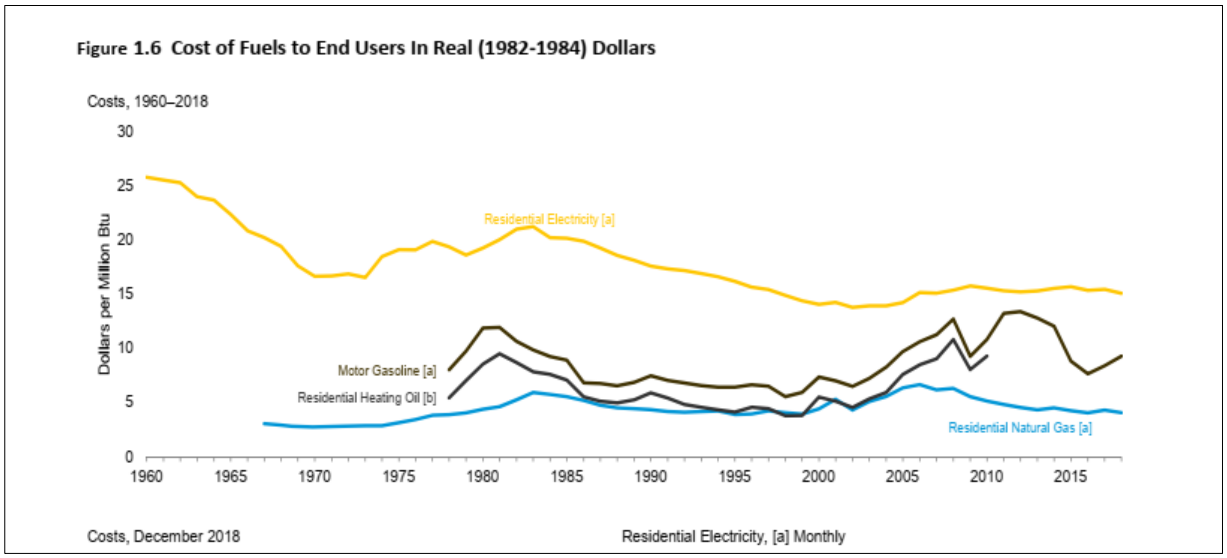
Wohnungen beanspruchten, wie schon in Grafik 1 gezeigt, im Jahr 2017 rund 11 % des amerikanischen Gesamtverbrauchs von 97.7 Quad BTU. Elektrizität und Naturgas liefern – praktisch zu gleichen Teilen – über 86 % des Bedarfs. Klimatisch bedingt gibt es enorme Unterschiede: nach Angaben der EIA verbrauchte ein amerikanischer «Durchschnittshaushalt» im gleichen Jahr 10’399 kWh. Im milden Hawaii wurde «nur» 6'074 kWh verbraucht; im feuchtheissen Louisiana dagegen mehr als das Doppelte, nämlich 14'242 kWh.

Der nach dem Zweiten Weltkrieg einsetzende ökonomische Aufstieg des Südens hängt nicht zuletzt mit der zunehmenden Verbreitung der Klimatisierung («air conditioning») zusammen; wer das bezweifelt, sollte einmal einen Sommer im Süden des Landes verbringen. Die EIA schätzt, dass heute über 86 % der amerikanischen Haushalte über Klimaanlagen verfügen. Praktisch 100 % haben einen oder oft mehrere Kühlschränke. Die Energieeffizienz der in den Haushalten verwendeten Geräte – von der Abwaschmaschine bis zum Computer – wurde in den vergangenen Jahren stetig und zum Teil markant verbessert.

Eine notorische, gewissermassen fast «genetisch» vererbte Schwachstelle ist und bleibt hingegen die zum Teil geradezu miserable Isolation vieler Gebäude, was beim Heizen wie beim Kühlen

viel Energie wegfrisst – gemäss Grafik 1 rund 35 %. Für die meisten Hausbesitzer (etwa 65% der amerikanischen Bevölkerung lebt in einem Einfamilienhaus) ist das primär eine ökonomische Frage: bessere Isolation lohnt sich dann und nur dann, wenn die dafür nötigen Investitionen auch innert «vernünftiger» Zeit genügend Energiekosten einsparen. Nun ist es aber so, dass die Energiekosten, vor allem für Elektrizität und Erdgas, für den Endverbraucher in den USA seit ca. 1972 real betrachtet keineswegs gestiegen sind, wie die nächste Grafik illustriert:

Grafik 10: Cost of Fuels to End Users in Real (1982-1984) Dollars



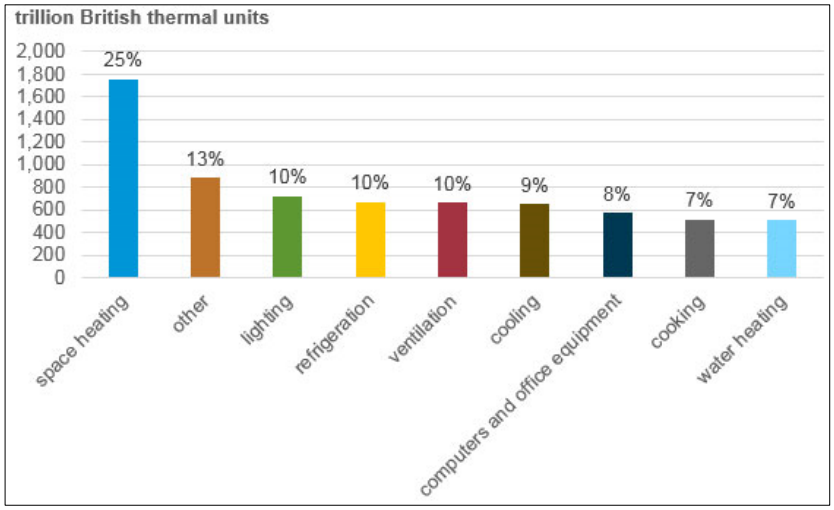
Originalgrafik (s. 14, oben).

Man erkennt unschwer, wie schwierig es in den USA sein dürfte, durch staatliche Massnahmen (Steuern und/oder «Lenkungsabgaben») diese Kosten deutlich anzuheben. Es gibt zwar keine amerikanischen «Gelbwesten», aber eine hohe Sensibilität – vor allem für Treibstoffpreiserhöhungen – ist beim Gros der Bevölkerung zweifellos vorhanden. Billige Energie gehört im hiesigen Selbstverständnis einfach zum «American Way of Life». Manche Europäer mögen das als abwegig oder sogar stossend empfinden – das ändert aber nichts an der Ausgangslage.

Der «kommerzielle» Sektor

In dieser sehr heterogenen Verbrauchskategorie wird vereinfacht gesagt alles zusammengezählt, was nicht in den drei bereits erwähnten Sektoren erfasst wurde. Die bunte Palette reicht von Einkaufszentren und Tankstellen über Bürogebäude und Lehranstalten bis hin zu Spitälern und Hotels. Raumheizung verbraucht am meisten Energie.

Grafik 11: Energy use in US commercial buildings by major end uses, 2012

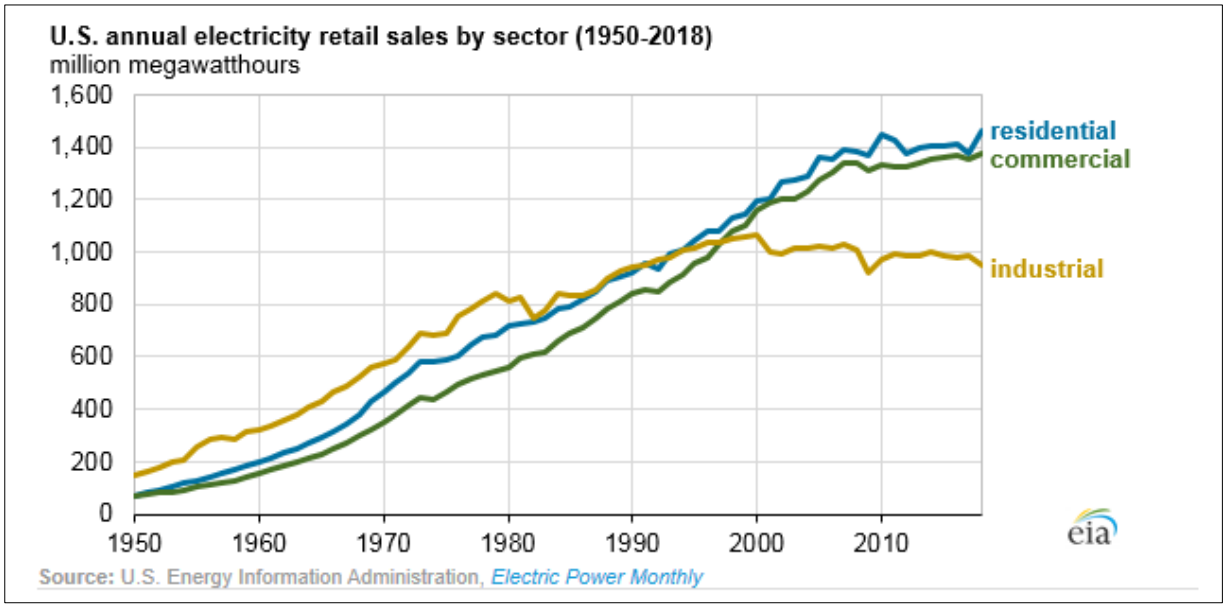


Originalgrafik

Die Trägheit des Energiesystems ist bei Gebäuden besonders ausgeprägt. Jedes Jahr werden Fortschritte bei der Effizienz erzielt, aber sie sind nicht spektakulär. Vor allem Photovoltaik (PV) Anlagen auf Dächern werden – wie im Wohnungssektor – zunehmend beliebter, nicht zuletzt auch bedingt durch verschiedene steuerliche Anreize. Da trendmässig die Bevölkerung in den USA in den wärmeren Gegenden immer noch wächst, in den kälteren Gegenden aber schrumpft, steht dem abnehmenden Heizungsbedarf im «Norden» ein zunehmender Kühlungsbedarf im «Süden» gegenüber.

Im Elektrizitätsverbrauch halten sich der «Residential» und «Commercial» Sektor heute ungefähr die Waage, wie der nächsten Grafik zu entnehmen ist.

Grafik 12: US residential and commercial electricity consumption



Originalgrafik

Der Elektrizitätssektor in der Schlüsselrolle für das gesamte Energiesystem

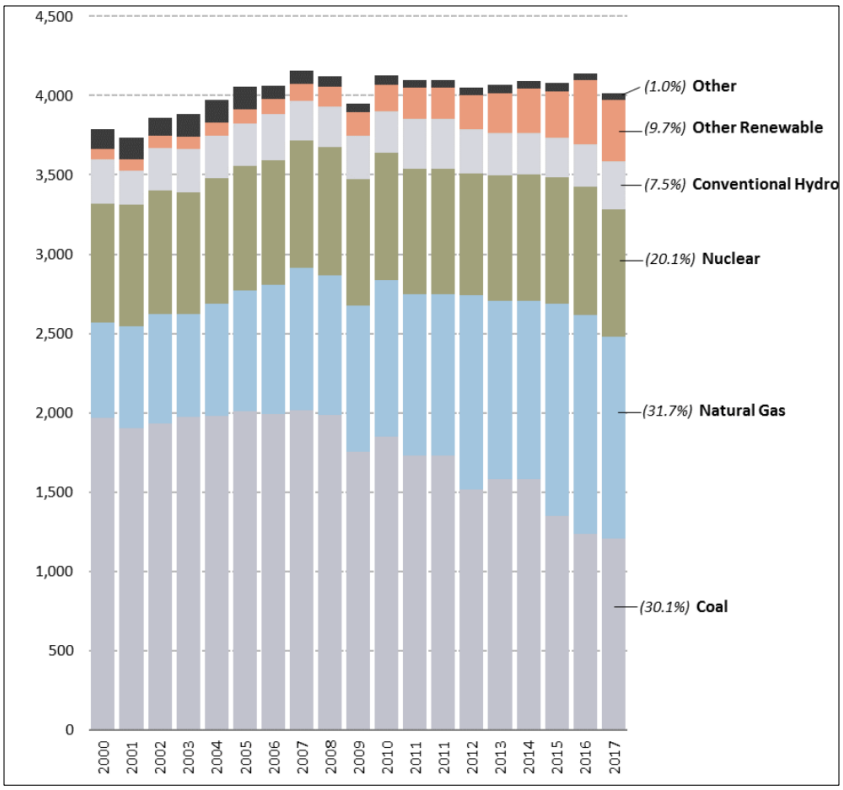
Elektrizität ist – wie übrigens Wasserstoff – eine «Sekundärenergie»: sie ist ein «energy carrier» und muss zuerst aus Primärenergie erzeugt werden. Die mannigfachen Vorteile der Elektrizität als hochwertige Energieform haben dazu geführt, dass die amerikanische Elektrizitätswirtschaft zum mit Abstand grösstem Verbraucher von Primärenergie avancierte – wie bereits in Grafik 2 gezeigt. Diese Vormachtstellung dürfte weiter zunehmen – vor allem, wenn im Transportsektor elektrisch angetriebene Fahrzeuge in Zukunft eine wesentlich grössere Rolle spielen sollten. Und noch einmal wichtiger würde die Erzeugung von Elektrizität, falls die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse eines Tages in industriellen Grössenordnungen betrieben werden sollte.

Der Vormarsch der Elektrizität ist ein faszinierendes Kapitel in der Industriegeschichte der USA. Es gibt darüber viele lesenswerte Bücher, so das von Nigel Cawthorne «Tesla versus Edison: The Life-Long Feud that Electrified the World» (Chartwell Books 2010). Für Hobbyhistoriker sehr zu empfehlen!

Das Elektrizitätssystem der USA ist seit dem Ende des 19. Jahrhunderts kontinuierlich gewachsen und hat eine beeindruckende Grösse und Komplexität erreicht – nur China produziert heute mehr elektrische Energie als die Vereinigten Staaten. Über viele Jahre hinweg korrelierte der hiesige Stromverbrauch recht eng mit dem Wachstum der Wirtschaft. Seit etwa 2008 stagniert indessen der Verbrauch bei ca. 4200 TWh, wie in Grafik 13 gezeigt.

Grafik 13 US Net Electricity Generation by Fuel, 2000 – 2017 (TWh)

Originalgrafik (S. 20; dort werden in der Legende fälschlicherweise GWh angegeben).



Man erkennt deutlich die abnehmende Bedeutung der Kohle (2017 noch 30.1 %), die inzwischen führende Rolle von Erdgas (31.7 %) und den nach wie vor grossen Beitrag der Nuklearwirtschaft (20.1 %), welche mit 98 Reaktoren an 59 Standorten in 30 Bundestaaten immer noch mehr Elektrizität als alle andern übrigen Quellen zusammen liefert. Gemäss Angaben der World Nuclear Association, welche sich auf das PRIS (Power Information System) der Internationalen Atomenergieagentur stützt, verfügen die Vereinigten Staaten auch heute noch (Stand Mai 2019) mit ihren 98 Anlagen über mehr ans Netz

angeschlossene («operable») Kernkraftwerke als jedes andere Land: es folgen Frankreich (58), China (45), Japan (37) und Russland (36).

Seit der 1954 erfolgten Inbetriebnahme der «Nautilus», dem ersten Unterseeboot mit Nuklearantrieb, hat die US-Navy rund 65 Jahre Erfahrung mit der Anwendung von Kernkraft in Marineanwendungen – so auch in Flugzeugträgern – gesammelt. Die Bedeutung dieses Erfahrungsschatzes darf man nicht unterschätzen.

Im Moment sind im Bundestaat Georgia (Vogtle plant) zwei Reaktoren im Bau; zwei geplante Projekte in South Carolina wurden nach dem Konkurs von Westinghouse Electric Company sistiert. Zehn Bewilligungen für neue Reaktoren wurden ausgestellt: ob diese auch gebaut werden, ist unsicher.

- Die wirtschaftlichen Rückschläge, welche General Electric und Westinghouse, zwei Hersteller «klassischer» Reaktoren, erlitten, implizieren keineswegs das Ende der Nuklearenergie in den Vereinigten Staaten. Es ist durchaus möglich, dass sich auch in den USA neue Reaktoren der vierten Generation (vielleicht von neuen Herstellern) durchsetzen könnten. Eine Schlüsselidee ist, Nuklearreaktoren nicht mehr wie bis dato einzeln zu «bauen», sondern sie industriell (wie Schiffe in einer Werft) in Serie «herzustellen» und erst dann am gewünschten Standort zu installieren.
- Eine modulare, standardisierte Bauweise bringt bezüglich Qualitätskontrolle und damit auch Sicherheit grosse Fortschritte. Zudem können so auch die einzelnen Bauelemente standardisiert werden: beides hätte grosse kostensenkende Auswirkungen. In China ist man diesbezüglich mit dem bereits existierenden HTR-PM Konzept (Gen IV) schon weiter: siehe dazu die «MIT Energy Initiative» Studie von David Petti und seinem Team (Verweis am Schluss). Auf jeden Fall hat Amerika nicht landesweit (d.h. auf Bundesebene) auf Nuklearenergie verzichtet; es verfügt zudem nach Australien über die zweitgrössten Reserven an Thorium, noch vor der Türkei und Indien.
- Thorium-Reaktoren sind – im Gegensatz zu den mit dem Feststoff Uran betriebenen Reaktoren – in der Regel sogenannte «Flüssigsalzreaktoren». Mit Thorium wird der Brennstoff effizienter ausgenutzt als dies mit Uran-Brennstäben der Fall ist. In heutigen Reaktoren müssen Uranbrennstäbe schon nach 2 bis 5% Spaltung als Abfall entsorgt werden. Mit Thorium wird die Entsorgungsproblematik entschärft: es fällt wesentlich weniger Abfall an, und dieser hat eine kürzere Halbwertszeit. Thorium ist zudem reichlich vorhanden und auch billiger als Uran. Die USA betrieben schon einmal (von 1965 bis 1969) eine Pilotanlage; es ist durchaus möglich, dass Thorium eine Art «Renaissance» erleben wird. Länder wie Indien arbeiten dem Vernehmen nach intensiv an der Entwicklung dieser Technologie.
- Die grossen Erdgasvorräte bewirken vorderhand, dass die Rolle von Gas bei der Stromerzeugung immer noch dominanter wird. Das senkt nicht nur die Betriebskosten, sondern auch den Ausstoss von Kohlendioxid, wenn dieser Effekt auch nur «einmalig» (d.h. jeweils beim Übergang vom Kohle- zum Erdgasbetrieb) eintritt.

Grosse und schwierige Fragen stellen sich bei der Modernisierung der inzwischen in die Jahre gekommenen Stromübertragungsnetze. Es gibt in Nordamerika (ohne Mexiko) vier integrierte Hochspannungsnetze, sogenannte «Interconnections»:

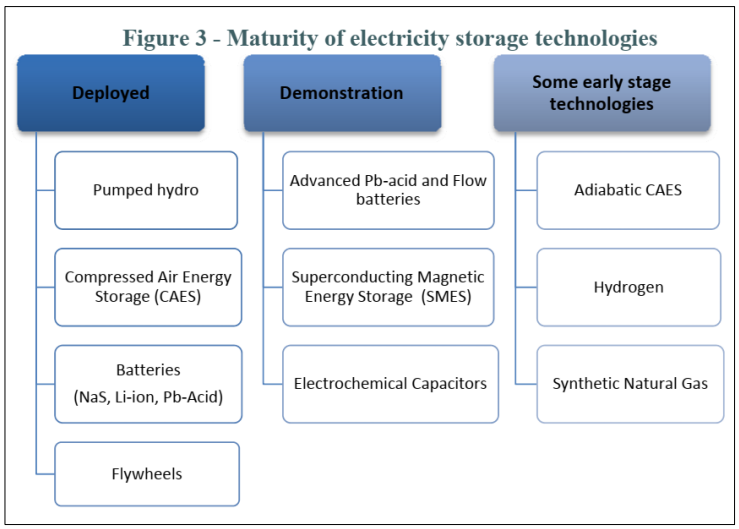
- Die «Western Interconnection» (westliches Drittel der USA plus British Kolumbien und Alberta).
- Die «Electricity Reliability Council of Texas Interconnection"
- Die "Eastern Interconnection" (östliche zwei Drittel der USA plus der Rest von Kanada ohne Québec).
- Die «Québec Interconnection».

Die Netze in Alaska und Hawaii sind in keine dieser «Interconnections» integriert. Ungewissheit gibt es sowohl in bezug auf das Ausmass des künftigen Stromverbrauchs als auch auf die Art und Weise der Erzeugung. Die EIA geht davon aus, dass der Stromkonsum bis ca. 2040 nicht wesentlich zunehmen wird. Ob das zutreffen wird, steht in den Sternen: eine rasch zunehmende «Elektrifizierung» – vor allem im Transportsystem – würde das Bild zweifellos ändern, obwohl Effizienzfortschritte (so beispielweise mit zunehmender LED Beleuchtung) gleichzeitig weitergehen dürften.

Im Südwesten der USA gibt es fast ideale Standorte für die Gewinnung von Sonnenergie – mit verschiedensten Methoden. Bezüglich Windenergie hat es nicht nur günstige Standorte an den drei Küsten, sondern auch im «heartland»: wer schon einmal in Oklahoma war hat vermutlich erlebt, wie stark (und manchmal wie lange!) die Winde in der Prärie wehen können. Aber wie die mit Wind erzeugte Energie dann transportiert und/oder gespeichert werden kann und soll, bleibt eine knifflige Angelegenheit.

Das Speicherproblem – eine Schlüsselfrage im Übergang zu einer grösseren Nutzung von «Flatterstrom» aus den «neuen» erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind – wird auch hierzulande seit langem intensiv diskutiert. Das Department of Energy hat im Dezember 2013 einen Bericht «Grid Energy Storage» publiziert, der einen guten Überblick über die Handlungsoptionen gibt. Die nachfolgende Grafik zeigt die im Bericht diskutierten technischen Alternativen:

Grafik 14: "Maturity of electric storage technologies"



Originalgrafik (S. 16)

Ganz rechts sieht man, dass «Hydrogen» ausdrücklich als «electricity storage technology» klassifiziert wird. Damit kommen wir zu einem kleinen Exkurs.

Kann Wasserstoff dereinst das «fossile Zeitalter» ablösen? (Exkurs)

In den Diskussionen rund um den Übergang vom «fossilen» zum «erneuerbaren» Energiezeitalter wird oft vergessen bzw. verdrängt, dass fossile Brenn- und Treibstoffe – vor allem Öl und Gas – nicht nur deshalb so beliebt sind, weil sie eine hohe Energiedichte aufweisen, vorläufig noch reichlich vorhanden und zudem leicht transportierbar sind.

Fossile Energieträger haben eine zusätzliche, ausserordentlich wertvolle Eigenschaft: sie sind gleichzeitig Energiespeicher. Die «neuen» erneuerbaren Energien wie Wind und Solarenergie sind das nicht. Die Speicherung von Elektrizität ist anspruchsvoll und teuer. Eine echte «Energiewende» erfordert deshalb viel mehr als «nur» eine tiefgreifende Änderung in der Zusammensetzung der Primärenergiequellen und eine tiefgreifende, teure Modernisierung der Verbrauchsstruktur: es braucht, damit ein «neues» System richtig funktionieren kann, wesentlich leistungsfähigere Infrastrukturen zur Speicherung und zum Transport von Energie.

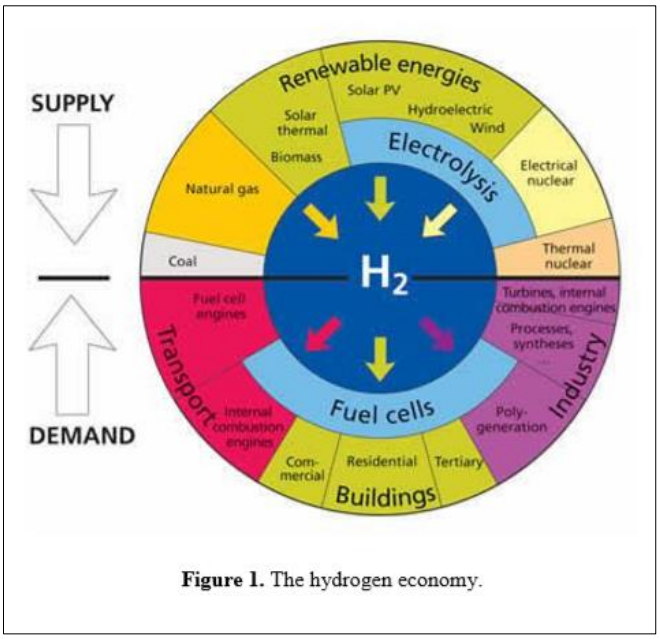
Je höher der angestrebte Anteil an «Flatterstrom» aus Wind und Sonne, desto wichtiger wird eine (technisch mögliche und ökonomisch sinnvolle) Lösung des Speicherproblems für die in Elektrizität umgewandelte Solar- oder Windenergie. Das bleibt vorderhand eine happige Herausforderung.

Wasserstoff ist wie Elektrizität eine Sekundärenergie. Aber es gibt einen entscheidenden Unterschied: im Gegensatz zur Elektrizität kann Wasserstoff (mit gewissen Einschränkungen) gelagert werden: in dieser Hinsicht ist dieser Energieträger zumindest im Grundsatz mit den fossilen Brenn- und Treibstoffen vergleichbar.

In den USA wird (wie in manchen anderen Ländern) seit vielen Jahren geforscht, ob, wie und wann eine «Wasserstoffwirtschaft» das heute zu rund 80 % auf fossilen Brennstoffen beruhende Energiesystem ablösen könnte. Es existiert darüber eine reiche und faszinierende Literatur. Es gibt flammende Befürworter (so Peter Hofmann, «Tomorrow's Energy», MIT Press 2012) und gute Übersichtsartikel – stellvertretend für viele andere Beiträge z.B. «The Hydrogen Economy» der Autoren Crabtree, Dresselhaus und Buchanan, publiziert im Dezember 2004 in «Physics Today», der Fachzeitschrift des «American Institute of Physics».

In Dublin (Irland) lehrt und forscht Professor Michael Lyons, der sich seit Jahren mit dieser Problematik beschäftigt und der sich auch auf den eben zitierten Artikel bezieht. Mit seiner freundlichen Genehmigung publiziere ich das nachstehende Schaubild, welches am 1. November 2011 im «International Journal of Electrochemical Science» publiziert wurde.

Grafik 15: The Hydrogen Economy (Professor Mike Lyons, Trinity College, Dublin)



Originalgrafik (S. 5831).

In der Vision einer «Wasserstoffwirtschaft» steht die Sekundärenergie «Wasserstoff» ins Zentrum. Man erkennt im oberen Teil des Kreises die verschiedenen Primärenergieträger, aus welchen direkt oder indirekt (so durch Elektrolyse) mit geeigneten technischen Anlagen Wasserstoff produzieren werden kann. Im unteren Teil sieht man die Verwendungsseite. Wasserstoff kann entweder (wie es heute mit fossilen Trägern geschieht) direkt «verbrannt» werden – allerdings ohne Erzeugung von Kohlendioxid – oder er kann via Brennstoffzellen für eine praktisch unbegrenzte Zahl von Anwendungsmöglichkeiten eingesetzt werden.

Die Vorteile liegen, so scheint es zumindest auf den ersten Blick, auf der Hand: Wasserstoff ist, salopp formuliert, eine noch «höhere» Energieform als Elektrizität und hat eine ganze Reihe von bestechenden Vorteilen, welche auch im bereits zitierten Artikel von «Physics Today» erwähnt werden:

a. Wasserstoff ist praktisch unbeschränkt vorhanden – rund 70% der Erdoberfläche besteht aus Ozean.

b. Wasserstoff kann aus allen bestehenden Primärenergiequellen erzeugt werden.

c. Wasserstoff kann sowohl zentral (in «Fabriken») als auch völlig dezentral erzeugt werden.

d. Strahltriebwerke (von Flugzeugen) und Verbrennungsmotoren (von Fahrzeugen) können relativ leicht modifiziert werden, um mit Wasserstoff «direkt» zu operieren – und das erst noch mit einem Wirkungsgradgewinn von etwa 25 %.

e. Koppelt man eine Brennstoffzelle mit einem Elektromotor, kann chemische in mechanische Energie verwandelt werden – mit geringen Wärmeverlusten und Wasserdampf als "Abgas".

f. Deren Wirkungsgrad liegt theoretisch – in Laborversuchen – mit 60% weit über jenem von Benzin- oder Dieselmotoren (22 bzw. 45 %). Allerdings ist der Schlüssel zur Gebrauchsreife noch nicht gefunden – die Krux liegt in der Materialtechnologie bzw. in den damit verbundenen Systemkosten.

g. Wird die für die Elektrolyse benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen (Wasser, Wind, Sonne) und/oder aus Nuklearenergie gewonnen, wäre der Weg für ein weitgehend kohlendioxidfreies Energiesystem frei.

Es gibt aber noch zahlreiche und grosse Hindernisse auf dem Weg zu einer eigentlichen Wasserstoffwirtschaft:

h. Wasserstoff ist zwar reichlich vorhanden, aber man findet in der Natur keinen reinen Wasserstoff.

i. Wasserstoff hat gewichtsmässig eine grosse Energiedichte, nicht aber volumenmässig.

j. Die Erzeugung (vor allem durch Elektrolyse von Wasser) braucht sehr viel Energie. Experten zufolge braucht es rund viermal mehr Energie, um Wasserstoff aus Wasser (anstatt aus fossilen Brennstoffen) zu gewinnen (Brandon und Kurban, 2017). Skeptiker machen deshalb geltend, der «Umweg» über Wasserstoff eigne sich höchstens für hochspezialisierte Anwendungen wie beispielsweise in der Raumfahrt oder bei Unterseebooten – ansonsten sei es wesentlich effizienter, die reine Elektromobilität zu fördern.

k. Wasserstoff kann gelagert werden, aber auf kleinem Raum braucht das mit konventioneller Technologie entweder hohe Kompression oder aber enorme (energieraubende) Abkühlung in den flüssigen Zustand. Ein völlig neuer technischer Lösungsansatz für Lagerung und Transport von Wasserstoff zeichnet sich jedoch mit «Flüssigen Organischen Wasserstoffträgern» ab: es geht um sogenannte «Liquid Organic Hydrogen Carriers», abgekürzt LOHC – siehe weiter unten.

l. Sicherheits-Risiko: Wasserstoff ist extrem entzündlich und brennt rasch – im Luftschiff «Hindenburg» (Lakehurst 1937) verbrannte der Wasserstoff (nicht der Dieselkraftstoff der Motoren) angeblich in 90 Sekunden.

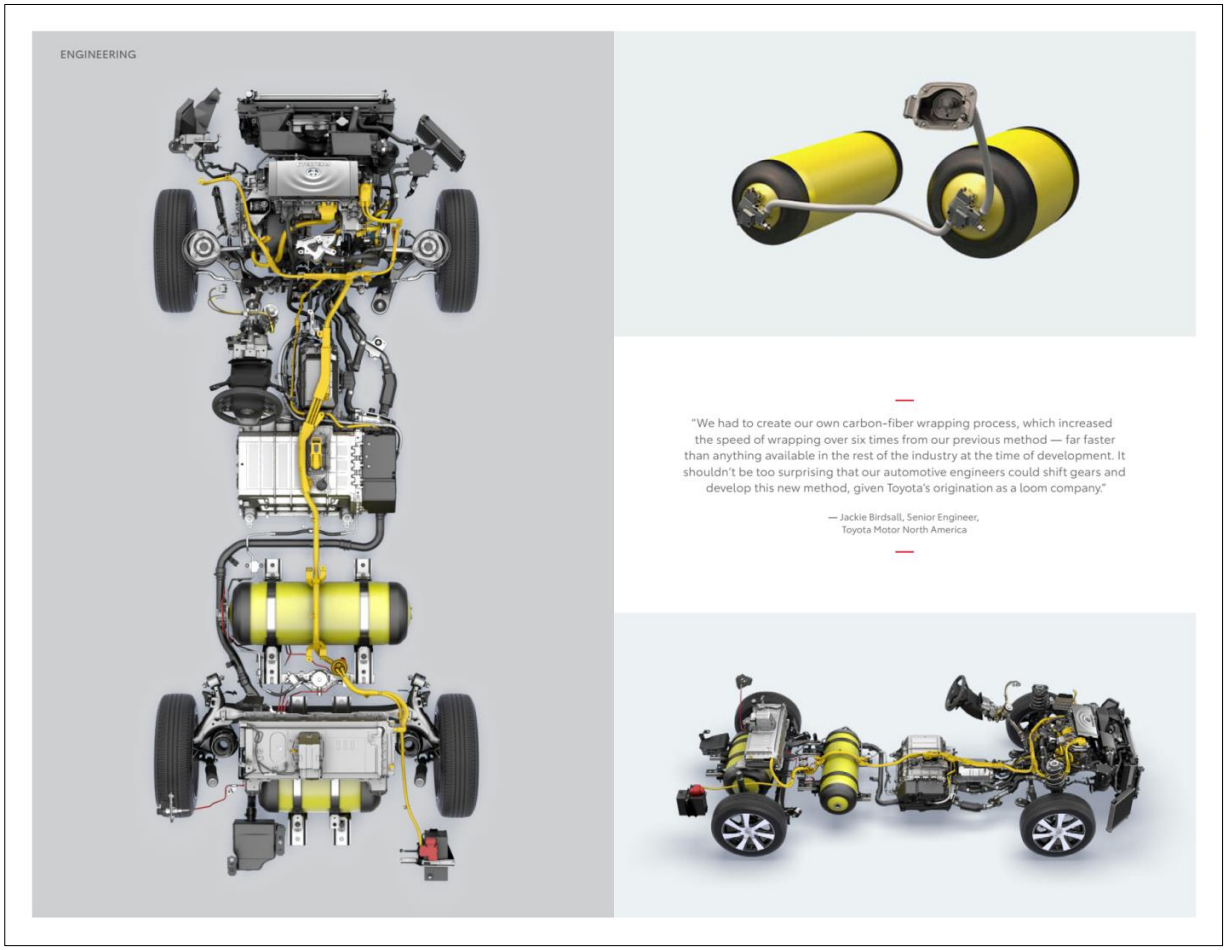
m. Der Aufbau einer neuen und separaten Infrastruktur für Erzeugung, Lagerung und Verbrauch wäre nicht nur teuer und langwierig, sondern der Entwurf einer optimalen «Architektur» einer neuen Wasserstoffversorgungskette («hydrogen supply chain») ist infolge der vielen zu berücksichtigenden Faktoren ausserordentlich komplex. Zudem ist der Umgang mit Wasserstoff unter Druck mit konventioneller Technologie wahrlich kein "banales" Thema.

n. Vorläufig bleibt Wasserstoff wesentlich teurer als fossile Treib- und Brennstoffe. Crabtree und Mitautoren schätzten im Jahr 2004, dass Wasserstoff pro Energieeinheit etwa viermal teurer war als Benzin. Eine Verbesserung dieser Diskrepanz bleibt ein Hauptziel der Forschungsanstrengungen.

In Südkalifornien kann man heute den Toyota 2019 «Mirai» kaufen. «Mirai» bedeutet auf Japanisch «Zukunft». Das mit Wasserstoff betriebene Fahrzeug kostet etwa $ 60,000.00. Es basiert auf bewährter Toyota-Hybridtechnologie (wie mit dem Prius unter Beweis gestellt), operiert aber zusätzlich mit 370 Brennstoffzellen, welche den in zwei Tanks (vorne 60 Liter, hinten 62.4 Liter) gespeicherten Wasserstoff durch Zufuhr von in der Luft existierendem Sauerstoff in Elektrizität umwandeln. Im Moment gibt es in Südkalifornien rund 35 öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen.

Nach Angaben des Herstellers dauert eine Betankung ca. 5 Minuten; das Fahrzeug hat eine Reichweite von etwa 480 Kilometern. Die Beschleunigung auf 60 Meilen pro Stunde erfordert neun Sekunden. Grafik 16, ein Auszug aus einer Toyota-Broschüre, zeigt das Chassis des «Mirai».

Grafik 16: Chassis des Mirai



Originalgrafik.

Es wird spannend bleiben, die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet zu verfolgen. Weltweit wird intensiv geforscht. Im Moment erfolgt die Gewinnung von Wasserstoff in den USA (wie fast überall auf der Welt) noch grösstenteils (schätzungsweise zu 96 %) aus fossilen Brennstoffen und ist damit natürlich keineswegs «grün»; andere Methoden wie die (energieintensive) Elektrolyse oder völlig neue Ansätze (Gewinnung direkt aus Nuklearenergie, verschiedenste biochemische Ansätze) müssten, so scheint es, in die Bresche springen, damit das Ganze wirklich eine Zukunft hat.

Vielversprechend in bezug auf eine Lösung der Probleme bezüglich Sicherheit, Lagerung und Transport könnte die bereits erwähnte LOHC Technologie sein. Wasserstoff wird dabei in Gegenwart eines Katalysators hydriert und ist anschliessend in Form einer dieselölartigen Flüssigkeit mit der konventionellen Treib- und Brennstoffinfrastruktur und bei normalen Temperaturen lager- und transportierbar. Das ist natürlich von allergrösster Bedeutung. LOHCs sind zudem (im Gegensatz zu Wasserstoff) schwer entzündlich und senken die Sicherheitsrisiken massiv. Am Bestimmungsort (z.B. an Tankstellen für Wasserstoff) wird die wasserstoffreiche Form des LOHC wiederum in Gegenwart eines Katalysators dehydriert und der Wasserstoff steht zur Verfügung. Das Wärmeträgeröl wird rezykliert, es besteht ein geschlossener Kreislauf.

In Deutschland scheint (neben prominenten Forschungsinstituten) das in Erlangen ansässige Unternehmen «Hydrogenious Technologies» Pionierarbeit in Sachen LOHCs zu leisten. Hier in den USA arbeitet dieses Unternehmen mit der United Hydrogen Group (UHG) zusammen, welche in Charleston, Tennessee eine Fabrik betreibt, welche pro Tag etwa 9 Tonnen flüssigen Wasserstoff erzeugt. Es gibt hierzulande eine «Fuel Cell & Hydrogen Energy Association»; deren Webseite www.fchea.org liefert interessante Informationen über den aktuellen Stand der Entwicklung.

Grösster Knackpunkt dürfte die Wirtschaftlichkeit einer «Wasserstoffwirtschaft» bleiben. Zwar liegen die rein theoretischen Grenzkosten von Sonnen- und Windenergie tatsächlich bei null, aber die Kapitalinvestitionen für eine neue Infrastruktur müssen sich natürlich irgendwie rechnen. Das ist soweit für mich erkennbar zumindest mit den heute zur Verfügung stehenden, konventionellen Technologien noch nicht der Fall. Wind und Solar kämpfen zudem mit dem bestens bekannten Problem, dass die entsprechenden Anlagen nicht 24 Stunden im Tag im Betrieb sind – was ihre Wirtschaftlichkeit empfindlich reduziert.

Unser CCN-Kollege Ferruccio Ferroni hat, zusammen mit seinem Mitstreiter Robert J. Hopkirk, die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen in Regionen mit mässiger Sonneneinstrahlung grundsätzlich in Frage gestellt («Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation», Energy Policy 94 (2016), 33-344). Die Autoren unternehmen in der Studie eine systematische Analyse der Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen beeinflussen. Sie kommen in ihrer Studie zum mehr als ernüchternden Schluss, dass der ERoEI für Photovoltaikanlagen zumindest in Gegenden mittlerer Breite unter 1 liegt.

Folgt man dieser Analyse, dann ist natürlich – a fortiori – auch die Wirtschaftlichkeit einer Erzeugung von Wasserstoff durch «billige» Sonnenenergie (mittels Elektrolyse) grundsätzlich in Frage gestellt: denn jeder Umwandlungsprozess ist bekanntlich mit zusätzlichen Verlusten verbunden.

Die Geister bleiben deshalb gespalten, ob, wann und bis zu welchem Grad Wasserstoff in der Zukunft wirklich eine bedeutende Rolle spielen wird. Kleinere Anwendungen (so Hubstapler in Lagerhäusern) sind schon recht verbreitet, aber auch innerhalb der Fahrzeugindustrie gehen die Ansichten der besten Experten auch heute noch weit auseinander. In letzter Zeit ist vermehrt vom Einsatz von Wasserstoff für schwere Nutzfahrzeuge auf langen Strecken die Rede; natürlich können Schiffe, Busse und Lokomotiven ebenfalls mit Wasserstoff betrieben werden.

Der Traum von einer Wasserstoffwirtschaft ist alt – bereits Jules Verne hat die Geister beflügelt. Ob, wann und wie es allenfalls zu einem Durchbruch kommen wird, kann man heute einfach nicht voraussagen. Sollte die Erzeugung auf Elektrolyse beruhen, gehen die meisten Beobachter bis auf weiteres davon aus, dass nur eine Kombination von (wo geographisch sinnvoll) Solar- und Windkraft, zusammen mit einem massiven Ausbau von Kernkraft, überhaupt in der Lage wäre, genügend «grünen» Strom für eine «Wasserstoffwirtschaft» zu produzieren. Nötig wäre zusätzlich der Einsatz, in industriellen Grössenordnungen, von neuen Transport- bzw. Lagertechnologien wie LOHCs. Dann allerdings würde eine echte energiemässige «Revolution» Realität. Ich verweise aber auf die beiden warnenden Zitate am Schluss dieses Beitrags.

Der sogenannte «Green New Deal»

In den USA diskutiert man schon relativ lange – Al Gore lässt grüssen – das ganze Spannungsfeld zwischen Energie, Umwelt und Klima. Ins mediale Rampenlicht schob sich vor kurzem der sogenannte «Green New Deal» (im folgenden GND). Niemand weiss, welche Bedeutung ein GND im Kampf um die nächste Präsidentschaft – und die Kontrolle in den beiden Kongresskammern – haben könnte. Möglicherweise wird der GND zu einem wichtigen Wahlkampfthema – vielleicht bleibt er aber auch ziemlich am Rand. Der GND ist eine bunte Mischung von Ideen und Visionen. Er umfasst einerseits eine «green agenda» (Elektrizitätsnetz, Transportsektor, Wohnungsbau) und andererseits eine «economic agenda» (Schaffung von Arbeitsplätzen, Gesundheitswesen, Nahrungssicherheit).

Der GND wurde von der frisch gewählten demokratischen Kongressabgeordneten Alexandria Ocasio-Cortez aus New York – zusammen mit dem demokratischen Senator Ed Markey aus Massachusetts – anfangs Februar 2019 den Medien mit erheblichem Rummel vorgestellt. In den USA müssen sich sämtliche Mitglieder der 435-köpfigen grossen Kammer alle zwei Jahre zur Wiederwahl stellen, während die Mitglieder des 100-köpfigen Senats jeweils sechs Jahre im Amt bleiben und die Erneuerung des Senats immer nur in Dritteln gestaffelt erfolgt. Das Ringen um einen möglichen GND wird von Befürwortern und Gegnern stark politisiert. Man kann sich fragen, ob eine emotionale Politisierung der sachlichen Auseinandersetzung mit der komplizierten Materie dient – aber das ist ja anderswo auch nicht viel anders.

Festzuhalten ist zunächst, dass der als (non-binding) «House Resolution 109» im Repräsentantenhaus eingebrachte Vorstoss «Recognizing the Duty of the Federal Goverment to Create a Green New Deal» im Senat vorläufig aufs Eis gelegt wurde. Im Senat sind 60 Stimmen nötig, um eine Debatte zu beginnen. Alle Republikaner, drei Demokraten (Doug Jones AL, Joe Manchin WV und Kyrsten Sinema AZ sowie Angus King, der unabhängige Senator aus Maine, der normalerweise mit den Demokraten stimmt), waren Ende März dagegen. Die restlichen 42 Demokraten und Bernie Sanders (I-VT) stimmten nur «anwesend». Kein einziger demokratischer Senator stimmte somit für ein Eintreten: damit scheiterte der Vorstoss 0 zu 57, und der Senat wird sich bis auf weiteres nicht mit dem GND befassen.

Die Demokraten machten zur Verteidigung ihres etwas eigenartigen Stimmverhaltens geltend, das Ganze sei eine von Senatsführer Mitch McConnell bewusst gestellte Falle gewesen: dieser habe die demokratischen Senatoren (darunter einige Präsidentschaftskandidaten bzw. -kandidatinnen) zwingen wollen, in der Frage des GND früh und öffentlich Farbe zu bekennen. Das mag durchaus zutreffen: die Episode zeigt aber, wie gross die Kluft zwischen Anspruch und Wirklichkeit ist. Was zunächst vielleicht recht gut tönt, hat bei näherem Zusehen seine Haken: das Preisschild des GND ist nämlich mehr als happig. Denn der GND geht weit über «reine» Energie-, Klima- und Umweltpolitik hinaus: zudem zieren sich die Promotoren, mit konkreten Details herauszurücken.

Eine lesbare Analyse des GND wurde am 25. Februar ausgerechnet von einem Team um den Republikaner Douglas Holtz-Eakin vorgestellt. Seine Studie «The Green New Deal: Scope, Scale and Implications» ist auf der Webseite www.americanactionforum.org abrufbar. Holtz-Eakin hat eine akademische Karriere hinter sich: er war u.a. Direktor des «Congressional Budget Office»

unter Präsident George Bush Jr. und «Chefökonom» in der Wahlkampagne von Senator John McCain, der 2008 das Rennen gegen Obama verlor.

Im Zentrum des GND stehen zwei Projekte: «Clean Energy» und «High Speed Rail». «Clean Energy» impliziert einen Übergang, innert 10 Jahren, zu einem «low carbon electricity grid» mit «net zero emissions» von Treibhausgasen. Die Projektkosten werden auf $ 5,4 trillion geschätzt; dazu kommen jährliche Kosten für Betrieb, Unterhalt und Amortisation (über 20 Jahre) von $ 307 billion. Ich verwende bewusst die englischen Bezeichnungen, weil es diesbezüglich immer wieder Verwirrung gibt: eine amerikanische «billion» ist eine deutsche Milliarde und nicht etwa eine Billion. Eine amerikanische «trillion» ist dagegen eine deutsche Billion.

Die Analyse von Holtz-Eakin geht davon aus, dass das Netz für erneuerbare Energien mit einer Speicherkapazität für vier Stunden auskommt. Bundestaaten ohne Nuklearmoratorium würden etwa die Hälfte der zusätzlich benötigten Kapazität aus neu zu bauenden Nuklearkraftwerken beziehen, den Rest aus einer Mischung von erneuerbaren Energien wie Wind, Solar, Hydro, Erdwärme und Batteriespeicher. Für Bundesstaaten mit Nuklearmoratorium wird angenommen, dass der gesamte Ersatz fossiler Brennstoffe durch Wind, Sonne und Speicherung erfolgen kann. Die Autoren der Analyse sind sich natürlich bewusst, wie schwierig gerade in diesen Staaten das Speicherproblem sein dürfte: wie kann die Lücke zwischen der zuverlässigen Bandenergie Nuklearenergie und den Bedarfsspitzen durch Sonne und Wind allein gelöst werden? Es ist im Grunde genommen die gleiche Diskussion, welche in der Schweiz nicht zuletzt auch im Carnot-Cournot-Netzwerk stattfindet.

«High Speed Rail» soll es ermöglichen, auf den kommerziellen Flugverkehr weitgehend oder gar vollständig zu verzichten. Die dafür nötigen Investitionen wären gigantisch – es müsste ein Schienennetz von gegen 20,000 Meilen neu gebaut werden – und dazu kommt das benötigte Rollmaterial. In diesen Kosten noch gar nicht erfasst sind nach meinem Verständnis die gewaltigen Abschreibungen, welche auf der bestehenden Flugverkehrsinfrastruktur vorgenommen werden müssten. Besonders dieser Teil des GND ist in meinen Augen in der Tat nicht viel mehr als eine kühne «aspirational vision», was sogar Nancy Pelosi einräumen musste. Ohne Ausrufung einer «national emergency» ist es gar nicht denkbar, die nötigen Bewilligungen für ein so grandioses Projekt zu erhalten.

Die grobe Holtz-Eakin Kostenschätzung für das GND-Gesamtpaket (Zeitspanne 2020 – 2029) sieht wie folgt aus:

	Totalkosten (in $ trillion)	***Kosten pro Haushalt (in $)***
«Green Agenda»:		
Low-carbon electricity grid	*5.4*	*39'000*
Net Zero Emissions Transportation System	*1.3 bis 2.7*	*9'000 bis 20'000*
Guaranteed Green Housing	*1.6 bis 4.2*	*4'000 bis 12'000*
Subtotal «Green Agenda»	*8.3 bis 12.3*	*52'000 bis 71'000*
«Economic Agenda»:		
Guaranteed Jobs	*6.8 bis 44.6*	*49'000 bis 322'000*
Universal Health Care	*36*	*260'000*
Food Security	*1.5*	*10*
Subtotal "Economic Agenda"	*44.3 bis 82.1*	*264'010 bis 272'010*
Totalkosten	*52.6 bis 94.4*	*316'010 bis 343'010*

Quelle : Holtz-Eakin, www.americanactionforum.org.

Die «economic agenda» dominiert das GND-Gesamtpaket mit über 80 %. Das Wort «Green» betrifft somit weniger als 20 % – und dient daher vielleicht vor allem als marketingmässiger «Deckmantel» für die anderen sozialpolitischen Anliegen.

Zu denken geben müssen vor allem die Grössenordnungen. Das Bruttoinlandprodukt der USA belief sich 2018 auf ungefähr $ 21 trillion. Die Rechnung für das GND-Gesamtpaket beträgt somit im Minimum das 2.5-fache und im Maximum das 5-fache der gesamten jährlichen Wirtschaftsleistung. Und das amerikanische Haushalteinkommen (Median) lag 2017 bei $ 61,000.

Wie und durch wen könnte ein solches Paket überhaupt bezahlt werden? Welche Rolle müsste die Privatwirtschaft spielen? Wie könnte der Staat – ohne Zuflucht zur Notenpresse – ein derart gigantisches Programm durch Steuern und/oder zusätzliche Schulden finanzieren? All diese Fragen sind völlig ungeklärt. Der GND ist im Moment keinesfalls ein konkret durchsetzbarer Plan. Wenn überhaupt hätte ein allfälliger GND – wie immer auch ausgestaltet – nur dann eine Chance, wenn er von massgebenden Kräften beider Parteien unterstützt würde. Davon ist man heute weit entfernt, und es sieht nicht so aus, als ob sich das bis zum November 2020 grundlegend ändern würde.

Allerdings ist nicht ganz ausgeschlossen, dass man sich mindestens auf eine intensivere staatliche Unterstützung zur Erforschung neuer Energietechnologien einigen könnte. Äusserungen von republikanischer Seite (so von Senator Lamar Alexander, TN) deuten darauf hin. Aber im vergifteten politischen Klima, das gegenwärtig in Washington D.C. herrscht, ist überbordender Optimismus kaum angebracht.

Versuch eines Fazits

Zusammenfassend komme ich in meinen – zwangsläufig bruchstückhaften – Betrachtungen zum Energiesystem der USA zu folgenden Schlussfolgerungen:

a. Die amerikanische Versorgungssicherheit hat sich in den letzten zehn Jahren rasch und markant verbessert: die USA sind heute mit Ausnahme von (zum Teil importiertem aber gut lagerbarem) Uran energiemässig praktisch autark. Nach Australien verfügen die USA über die zweitgrössten Thoriumreserven der Welt.

b. Der Energiemix wird sich sowohl auf der Angebotsseite als auch auf der Nachfrageseite weiterhin ändern – rein «energiepolitisch» gesehen steht das Land aber nicht unter Zeitdruck.

c. Die Preise fossiler Energieträger werden die künftige Entwicklung weiterhin stark beeinflussen – vor allem Erdgas bleibt voraussichtlich noch lange relativ billig.

d. Geographie und geringe Bevölkerungsdichte in grossen Landesteilen begünstigen an sich den weiteren Vormarsch von Wind- und Sonnenkraft: die USA sind das drittgrösste Land der Erde und können bzw. könnten sich flächenmässig wesentlich mehr «Fussabdruck» für Windturbinen und Solaranlagen leisten als kleinere Länder.

e. Der Elektrizitätssektor dürfte seine zentrale Rolle weiter ausbauen – wenn auch mit schwer abschätzbarer Geschwindigkeit. Die Substitution von Kohle durch Erdgas wird weitergehen.

f. Niemand kann voraussagen, welche Auswirkungen die zum Teil auch hier leidenschaftlich geführte «Klimadiskussion» (Stichwort GND) letztlich für die – unter der gegenwärtigen Administration eher marktfreundliche – Energiepolitik der USA haben könnte.

g. Energiepolitik wird zudem nicht nur auf Bundesebene betrieben – einzelne Bundesstaaten – vor allem an der Westküste – betreiben seit Jahren ihre «eigene» Energie-, Umwelt- und Klimapolitik. Das führt immer wieder zu happigen und langwierigen (insbesondere auch rechtlichen) Auseinandersetzungen über den «richtigen» Pfad in all diesen Fragen.

h. Die Zukunft der Nuklearenergie hängt von mannigfachen Faktoren ab – als stabile und zuverlässige Bandenergie wird darauf aber auch in Zukunft kaum freiwillig verzichtet werden. Völlig neue (kleinere, dezentralisierte, sicherheits- und entsorgungsmässig hochmoderne) Reaktortypen befinden sich im Projektstadium.

i. Irgendwann könnte Wasserstoff (vor allem im Transportsektor) eine bedeutende Rolle übernehmen – und gleichzeitig als Energiespeicher das Glätten der «Flatterstrom»-Schwankungen von Solar- und Windenergie übernehmen. Das wäre – so es denn wirklich einmal soweit kommen sollte – ein epochaler Durchbruch.

j. Militärische Anstrengungen eröffnen vielleicht noch weitere (der Öffentlichkeit heute nicht bekannte) Möglichkeiten, bei der sauberen Erzeugung von Energie Fortschritte zu erzielen. Die US-Streitkräfte sind ein enormer Verbraucher von Energie, und man weiss, dass sich die Militärs seit Jahrzehnten mit all diesen komplexen Fragen intensiv beschäftigen. Überraschungen sind deshalb nicht auszuschliessen.

Das Energiesystem der USA wird sich auch in den kommenden Jahren kontinuierlich verändern. Marktkräfte und Innovationen werden, so meine Vermutung, in diesem Prozess einen grösseren Einfluss als staatliche Eingriffe ausüben. Das Land dürfte jedenfalls – angesichts der Schwierigkeit bzw. Unmöglichkeit, die meisten Entwicklungen auch nur annähernd genau zu prognostizieren – bestrebt bleiben, sämtliche Handlungsmöglichkeiten offenzuhalten und nicht ohne Not zum vornherein auf eine bestimmte Option zu verzichten.

Zum Schluss dieses Essays zitiere ich gerne einen Abschnitt aus dem ausgezeichneten Buch «Energy Myths and Realities» von Vaclav Smil, einem kanadischen Professor an der Universität von Manitoba in Winnipeg. Der Autor ist ein gebildeter, origineller und ebenso gescheiter wie demütiger Kopf. Er befasst sich seit Jahrzehnten in einer ganzen Reihe von Publikationen intensiv mit der zentralen Frage, ob und wie eine moderne Gesellschaft den Übergang von «high power density» (Kraftdichte) – verkörpert durch fossile Brennstoffe, mit viel Watt pro Quadratmeter – zu «low power density» – verkörpert durch Sonne- und Windkraft, mit wenig Watt pro Quadratmeter – überhaupt bewältigen kann:

«The history of energy transitions strongly suggests that no grandiose plans aimed at large-scale and rapid changes in the composition of primary energy supply or at accelerated commercial adoption and widespread diffusion of new conversion techniques have been particularly successful. Analyses of energy transitions in the world's major economies have one notable thing in common: remarkable persistence of primary energy supply patterns during the past two generations. Wishful thinking, pioneering enthusiasm, and belief in the efficacy of seemingly superior solutions are not enough to change the fundamental nature of gradually unfolding energy transitions, be they shifts to new fuels, to new modes of electricity generation, or to new prime movers. Adoption of these innovations is nearly always tied to major infrastructural developments that require large capital investment; moreover, it inevitably confronts environmental, legal, and organizational complications and can be hindered by irrational perceptions of risk." (Smil 2010 p. 161.)

Warum der Übergang vom «fossilen» zum «erneuerbaren» Energiezeitalter voraussichtlich so schwierig bleibt – und auf jeden Fall viel Zeit beanspruchen wird – hat der gleiche Vaclav Smil an anderer Stelle prägnant wie folgt zusammengefasst:

«There are five major reasons that the transition from fossil to nonfossil supply will be much more difficult than is commonly realized: scale of the shift; lower energy density of replacement fuels; substantially lower power density of renewable energy extraction; intermittence of renewable flows; and uneven distribution of renewable energy resources" (Smil 2011).

Dem ist nichts beizufügen: wie schon einleitend bemerkt haben Energiesysteme ein grosses Beharrungsvermögen. Die Diskussionen über die Möglichkeiten und Grenzen einer echten «Energiewende» dürften deshalb – nicht nur in den USA – noch lange anhalten.

Abkürzungen

BFE	Bundesamt für Energie
BTU	British Thermal Units
CRS	Congressional Research Service
DOE	Department of Energy
EIA	Energy Information Agency
EPA	Environmental Protection Agency
GND	Green New Deal
IER	Institute for Energy Research
LED	Light Emitting Diode
PV	Photovoltaik
TJ	Terajoules

Quellen und Literaturhinweise

Brandon & Kurban, Clean Energy and the hydrogen economy, The Royal Society Publishing, London 2017.

Cawthorne Nigel, Tesla versus Edison, The Life-long Feud that electrified the world. Chartwell Books 2016.

Cline William R., The Economics of Global Warming, Institute for International Economics, Washington DC 1992.

CRS Report «21st Century U.S. Energy Sources: A Primer. https://crsreports.congress.gov, November 5, 2018.

F. Ferroni, R.J. Hopkirk, Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation, Energy Policy 94 (2016) 336-344.

Grid Energy Storage, Report by the US Department of Energy, December 2013.

Hoffmann Peter, Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet, MIT Press 2012.

MIT Energy Initiative: The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. David Petti und Team, Dezember 2018.

Smil Vaclav, Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate, AEI Press 2010.

Smil Vaclav, Global Energy: The latest infatuations. American Scientist 99: 212-219, 2011. Zitiert auf Seite 151 von Professor Charles Hall, einer der «Erfinder» des Konzepts «Energy Return on Investment», in seinem gleichnamigen Buch (Springer 2017).

United States Electricity Industry Primer, DOE/OE-0017, July 2015.

Webseite der U.S. Energy Information Administration: www eia.gov.

Webseite des Center for Sustainable Systems, University of Michigan: css.umich.edu.