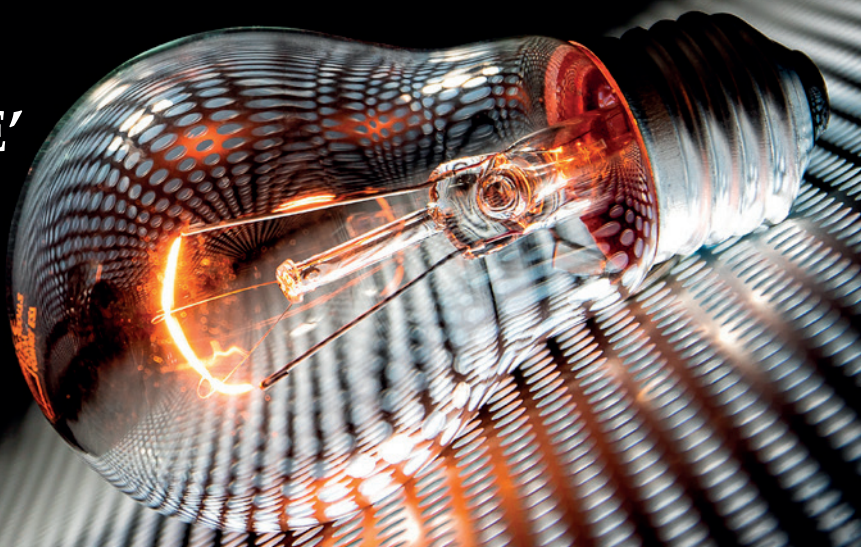


# Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'



## Abstract

Understanding electricity generation's true cost is paramount to choosing and prioritizing our future energy systems. This paper introduces the full cost of electricity (FCOE) and discusses energy returns (eROI). The authors conclude with suggestions for energy policy considering the new challenges that come with global efforts to "decarbonize".

In 2021, debate started to occur regarding energy security (or rather electricity security) which was driven by an increase in electricity demand, shortage of energy raw material supply, insufficient electricity generation from wind and solar, and geopolitical challenges, which in turn resulted in high prices and volatility in major economies. This was witnessed around the world, for instance in China, India, the US, and of course Europe. Reliable electricity supply is crucial for social and economic stability and growth which in turn leads to eradication of poverty.

We explain and quantify the gap between installed energy capacity and actual electricity generation when it comes to variable renewable energy. The main challenge for wind and solar are its intermittency and low energy density, and as a result practically every wind mill or solar panel requires either a backup or storage which adds to system costs.

LCOE is inadequate to compare intermittent forms of energy generation with dispatchable ones and when making decisions at a country or society level. We introduce and describe the methodology for determining the full cost of electricity (FCOE) or the full cost to society. FCOE explains why wind and solar are not cheaper than conventional fuels and in fact become more expensive the higher their penetration in the energy system. The IEA confirms "...the system value of variable renewables such as wind and solar decreases as their share in the power supply increases". This is illustrated by the high cost of the "green" energy transition.

We conclude with suggestions for a revised energy policy. Energy policy and investors should not favor wind, solar, biomass, geothermal, hydro, nuclear, gas, or coal but should support all energy systems in a manner which avoids energy shortage and energy poverty. All energy always requires taking resources from our planet and processing them, thus negatively impacting the environment. It must be humanity's goal to minimize these negative impacts in a meaningful way through investments – not divestments – by increasing, not decreasing, energy and material efficiencies.

Therefore, the authors suggest energy policy makers to refocus on the three objectives, energy security, energy affordability, and environmental protection. This translates into two pathways for the future of energy:

- (1) invest in education and base research to pave the path towards a **New Energy Revolution** where energy systems can sustainably wean off fossil fuels.
- (2) In parallel, energy policy must support **investment in conventional energy** systems to improve their efficiencies and reduce the environmental burden of generating the energy required for our lives.

Additional research is required to better understand eROI, true cost of energy, material input, and effects of current energy transition pathways on global energy security.

### About the authors:

Dr. Lars Schernikau is an energy economist, entrepreneur, and commodity trader, Zurich, Switzerland.

Prof. William Hayden Smith is Professor of Earth and Planetary Sciences at McDonnell Center for Space Sciences at Washington University, St. Louis, MO, USA.

Prof. Emeritus Rosemary Falcon is recently retired DSI-NRF SARChI Professor from the Engineering Faculty at the University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

### Available online at SSRN

Reprinted and adapted from Schernikau et al. 2022 Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'. Journal of Management and Sustainability Vol. 12, No. 1, June 2022 issue at **Canadian Center of Science and Education**.

### Acknowledgement

The authors declare that they did not receive any financial or other support from any company or organization for this paper.

### Selected Abbreviations

|      |   |
|------|---|
| CCUS | – Carbon capture utilization and storage            |
| eROI | – Energy return in energy invested                  |
| VRE  | – Variable renewable energy, such as wind and solar |
| HELE | – High efficiency, low emission                     |
| IEA  | – International Energy Agency in Paris              |
| FCOE | – Full cost of electricity                          |
| LCOE | – Levelized cost of electricity                     |
| PES  | – Primary energy supply or PE for primary energy    |
| PV   | – Photovoltaic                                      |
| USC  | – Ultra-super-critical                              |
| VRE  | – Variable renewable energy                         |
| ~    | – Approximately                                     |

Download this document



YouTube Video "The Future of Energy"



# Preface:

- **Energy** (in Watt-hour or Wh, in German "Arbeit oder Energie") vs. **Power** (in Watt or W, in German "Leistung")
  - Energy is the capacity to do work. Power is energy per unit of time. Thus, energy is what makes change happen and can be transferred from one object to another. Energy can also be transformed from one form to another. Power is the rate at which energy is transferred.
  - Once you know both the energy storage capacity (i.e., MWh) of a battery and the output power (i.e., MW), you can simply divide these numbers to find how long the battery will last.
  - Energy is stored in a Tesla battery (i.e., 100 kWh). "Horse-" power, let's say 150 kW, is what moves the car forward. The battery, filled with energy (kWh), drains over time depending on how much power (kW) is required for moving the car, which depends on how you drive and the surrounding conditions.
- **Capacity Factor "CF"** (in German "Nutzungsgrad") is the percentage of power output achieved from the installed capacity for a given site, usually stated on an annual basis.
  - Capacity factor is site-specific and cannot be changed with technology. Thus, capacity factor here is only driven by natural conditions, not by technology or operations (or "utilization"). In other words, when technology fails, or a power plant is turned off on purpose, this will reduce the utilization, but not the natural driven capacity factor.
  - Capacity factor is different from the efficiency factor. For comparison, efficiency measures the percentage of input energy transformed to usable or output energy.
  - In Germany, photovoltaics ("PV") achieves an average annual capacity factor of ~10-11%, while California reaches an annual average CF of 25% (Schernikau and Smith 2021). Thus, California yields almost 2,5x the output of an identical PV plant in Germany.
  - It is important to distinguish between the average annual capacity factor and the monthly or better weekly and daily capacity factor, which is very relevant when keeping an electricity system stable that requires demand to always equal supply for the electric frequency to remain stable.
- **Conservation of Energy – the 1st Law of Thermodynamics** essentially states that energy can never be created from nothing nor lost into nothing, only converted from one form to another. Different forms of energy include thermal, mechanical, electrical, chemical, nuclear, and radiant energy.
- **Entropy of Energy – the 2nd Law of Thermodynamics** essentially distinguishes between useful energy (low entropy) that can perform work and less useful energy (high entropy) that cannot easily perform work.
  - Entropy is a measure of randomness, disorder, or diffusion in an energy system where greater disorder = greater entropy.
  - Whenever energy is converted from one form to another, there is always some fraction of useful energy that becomes useless (entropy / disorder increases).
  - Planck said in other words "Every process occurring in nature always increases the sum of the entropies of all bodies taking part in the process, at the limit – for reversible processes – the sum remains unchanged."
  - The 2nd Law of Thermodynamics thus explains why perpetual motion machines are not possible
  - Thus, the more complex energy processes are, the more useful energy is lost

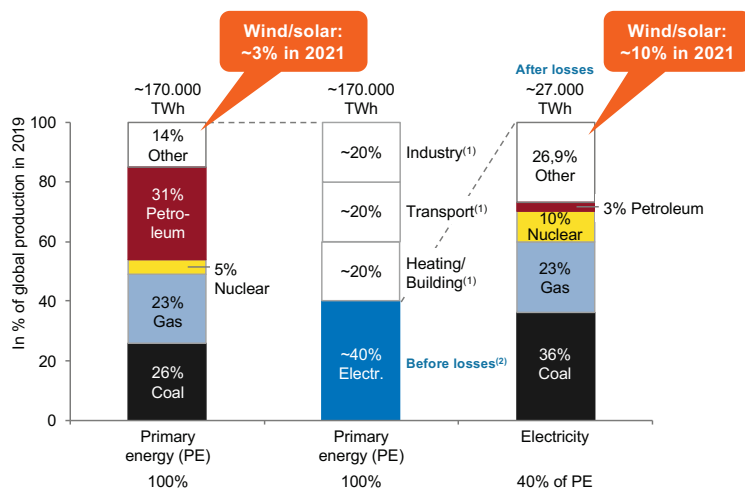
## 1. Introduction (Today's global electricity systems)

In 2019, fossil fuels – in order of importance – **oil, coal, and gas made up ~80% of global primary energy ("PE") production** totaling ~170.000 TWh or ~600 EJ. Despite Covid and significant wind and solar capacity additions, the percentage has not changed in 2021, quite the contrary, coal made a comeback (IEA 2022a). Coal and gas made up ~60% of global gross electricity production totaling ~28.400 TWh in 2021. It is important to note that global electricity production makes up ~40% of primary energy with transportation, heating, and industry accounting for the remaining ~60% (Figure 1).

**Current energy policy focuses on the electrification of energy, thus significantly increasing electricity's share of primary energy** by using electricity more for transportation (see EVs), heating (see heat pumps), and industry (see DRI, producing steel using hydrogen). Therefore, this paper focuses on electricity. For a more comprehensive discussion on transportation, the authors recommend Kiefer 2013 *Twenty-First Century Snake Oil*, that includes details on hydrocarbons and biofuels for transportation which are not covered herein in greater detail.

Despite trillions of US dollar spent globally on the "energy transition", the proportion of fossil fuels as part of total energy supply has been largely constant at around 80% since the 1970s when energy consumption was less than half as high (WEF 2020). Also in Europe, fossil fuels share is still above 70%. Kober et al. 2020 among others, confirm that total primary energy consumption more than doubled in the 40 years between 1978 to 2018. At the same time, energy intensity of GDP improved by a little less than 1% confirming Jevon's Paradox that energy efficiency improvements are always offset by higher energy demand (Polimeni et al. 2015).

Variable "renewables" in the form of wind and solar – while not the subject of this paper – accounted for ~3% of global primary energy and ~8% of global gross electricity production in 2019, and this was largely unchanged in 2020 and 2021 (refer to Schernikau and Smith 2021 for more details on solar PV and Smith and Schernikau 2022 on wind). Other forms of energy supply usually categories as "renewables" – such as biomass, hydro, geothermal, or tidal power – are not detailed further as they are not considered variable and have a different quality. For comparison, coal and gas combined accounted for ~50% of global primary energy and ~60% of global gross electricity production. Thus, fossil fuels still exceeded wind and solar by a "Fossil to Wind-Solar Factor" of 27x for primary energy and 8x for electrical power production (IEA 2021a).



**Figure 1: Overview of Global Primary Energy and Electricity**

(1) Only the portion of industry/transport/building that is not included under electricity; (2) assumed worldwide net efficiency of about 33% for nuclear, 37% for coal, 42% for gas, assume avg. ~40% efficiency => 27.000TWh becomes 68.000 TWh or ~40% of ~170.000TWh

Sources: Schernikau Research and Analysis based on BP 2021/22, IEA 2021a



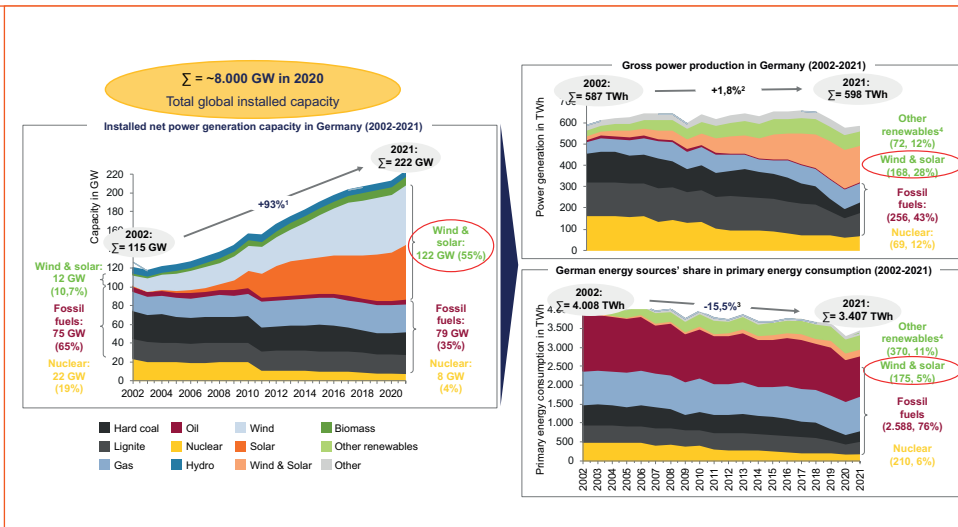
Germany is the foremost industrialized nation in the move toward decarbonization and has invested at least EUR ~360 billion since 2000<sup>1</sup> in the “energy transition” reducing the share of nuclear and fossil fuels (BfWE 2020). It shall be noted that nuclear is the most energy efficient (see section 2 on eROI) and least polluting way of producing electricity but faces other challenges. However, as Europe has been reducing its production of fossil fuels, the continent’s dependence on energy raw material imports increased significantly, mostly from Russia over the past two decades.

With the money invested in the “energy transition” – until 2021 – Germany has reached a wind/solar share for gross electricity production of ~28%. The primary energy<sup>2</sup> share of wind and solar, however, was still only 5%. To achieve this “transition” Germany’s installed power capacity had to double (Figure 2). Consequently, the renewable energy sector grossly underperformed, compared to its investment in real energy terms, and Germany’s electricity prices reached the highest among the G20. This underperformance, however, is due to the low capacity factor, low energy efficiency, and other inherent shortcomings of variable renewable energy discussed herein (Figure 3), not due to bad implementation or bad intent.

**During the 20 years from 2002 to 2021, Germany’s installed power capacity almost doubled from 115 GW to 222 GW while total electricity consumption was essentially flat and primary energy fell over 15%<sup>2</sup>** (Figure 2). Over the next decades, Germany expects a significant increase in electricity consumption from the electrification of transportation, heating, and industrial processes to satisfy increased demand from consumers and industry as required by the German “Energiewende”.

The global average looks slightly better. Of the total 2020 global installed energy capacity of ~8.000 GW or 8 TW (Figure 10), about 18% or ~1.400 GW was wind and solar which contributed ~8% to global electricity and ~3% to primary energy (BP 2021, IEA 2019b, IEA 2021a). After installation of almost 200 GW of solar PV in 2021, in March 2022, the world celebrated the first 1 TW of installed solar capacity (PV-Mag 2022).

Figure 2 illustrates the substantial disconnect between installed capacity and generated electricity. It appears that in countries such as Germany, given the average capacity factors for wind and solar, a doubling in installed capacity will lead to less than 1/3rd of electricity supply and less than 10% contribution to primary energy. The reasons for this disconnect are multi-fold and impact the world of electricity in many ways. Figure



**Figure 2: German Installed Power Capacity, Electricity Production, and Primary Energy**  
 Notes: (1) CAGR: +3.5%; (2) CAGR: +0.1%; (3) CAGR -0.9%; (4) Including hydro & biomass  
 Source: Schemnikau Research and Analysis based on Fraunhofer 2022, AGE 2021, Agora 2022, see footnote<sup>2</sup>

3 lists the shortcomings of variable renewable energy (VRE) for electricity generation in the form of wind and solar which explain the reasons for the apparent disconnect. These deficiencies of VRE can only partially be reduced through technological improvements.

Despite the sun’s immense power, the energy available per m<sup>2</sup> from natural wind and solar resources are limited and too small to allow efficient electricity generation at grid scale (low energy density). Additional negative effects of wind and solar on vegetation, local and regional climate, animal life, seaways, bird flyways, and bird, bat, and even insect populations also must be considered. These effects originate primarily from the required large land area (Smith and Schernikau 2022).

Technological advances will further increase net efficiencies of wind and solar installations somewhat. However, physical boundaries, as described by the Betz Law and Schokler-Queisser Limit, dismiss the possibility of ten-fold improvements. There is no prospect of a paradigm shift in

energy from PV or wind as is promised for quantum computing. **One cannot compare energy with computing, they follow different laws (Figure 7).**

The 33% quantum efficiency Schokler-Queisser Limit for silicon can be exceeded with multi-layer PVs which so far are unstable and less durable than silicon PV panels. Today, they already surpass mono-crystalline silicon’s quantum efficiency by about 50%, but 20-year operational life for multilayer PV are not in reach. Technological improvements and new materials, such as perovskites and quantum dots, may overcome the stability and durability problems in time, but 100% quantum efficiency is the absolute physical maximum that will never be reached.

Thus, **technological improvements may improve PV’s quantum efficiencies by a factor of two, but not by the required multiple to compete with conventional energy generation and to surpass the required eROI hurdle** at grid scale. Be reminiscent that also conventional energy generation improves its efficiency over time.



**Figure 3: Summary of Shortcomings of Variable Renewable Energy for Electricity Generation**  
 Source: Schemnikau Research and Analysis

<sup>1</sup> Note: the numbers include only „EEG-Gesamtvergütung“ (EEG compensation package), but no other investments, research, subsidies, etc.  
<sup>2</sup> The fall of primary energy, among others, has to do with the assumed 100% efficiency of wind and solar electricity when calculating its share in PE. In other words, it is mistakenly assumed that wind and solar electricity generation was converted, conditioned, balanced, and transmitted at 100% efficiency without any losses or energy costs, or at least at the same efficiency as conventionals, which is not the case. If one were to assume a more realistic lower net efficiency, the primary energy share of wind and solar would increase and reported total primary energy in Germany wouldn't fall as much.

## 2. Literature review, methodology, and results (Cost of electricity and eROI)

Schernikau has completed a total of over 70 interviews in Europe, Africa, Asia, and North America during the past 3 years. Discussions have taken place at various ministries, economic government organizations, with universities, and industrial conglomerates. The overarching theme from these interviews was a lack of understanding of the true full cost of electricity and continued misuse of the marginal cost measure LCOE to compare costs of VRE with conventional sources of power. In all interviews, the overarching desire – especially in developing nations – was to support a sustainable yet economically viable energy policy to transition away from fossil fuels as fast as possible. The costs and downsides associated with such transition were rarely understood or researched.

Schernikau has contacted energy think tanks such as the IEA, the IEEJ, and the ACE (ASEAN Center for Energy) as well as leading strategy consulting firms and discussed some of the above topics in detail. The conclusions herein are also a result from these interchanges. The political component inherent in the work at all of the mentioned organization was removed and attention was put on the economic impacts of the proposed transition to VRE. The literature researched is referenced at the specific elements detailed in the paper.

The cost of electricity is important for a country's global competitiveness and a key element for economic development as well as the discussion on energy policy at large. Electricity systems are complex, which is also driven by the fact that **a functioning electricity system can only supply usable power if and only if electricity demand equals electricity supply at all times**, every second. This unique characteristic of electricity systems drives costs. We need to differentiate between cost, value, and price, which are not the same. Further below we discuss only cost:

- **Cost** – the resources and work required for production
- **Value** – the intrinsic value or utility to the consumer for a particular application as compared to its alternatives
- **Price** – what consumers or the market are willing to pay. The price is influenced, or distorted, by government or company intervention, such as laws, mandates, subsidies, geopolitics, and more.

The concept of the true full cost of electricity, FCOE, is detailed in the following section. Cost of electricity has been studied in detail by several government organizations and universities. The Full cost of electricity donated as FCe- was described in a number of white papers published at the University of Texas (UT) 2018. UT however focuses on transmission and distribution, paying less attention to backup, storage, and the intermittency of VRE. Also, the lower asset utilization of backup systems is not discussed in greater detail.

The OECD (OECD NEA 2018) references the full cost of electricity separating between (a) plant-level costs, (b) grid-level system costs, and (c) external or social cost outside the electricity system. The argument is that that the full cost must include all three categories, which the authors agree with. The OECD study pays more attention to higher volatility and complexity with added VRE in the system, but for instance energy required or cost for recycling are not considered. In the OECD's discussion on pollution and GHGs, the life-cycle emission and non-emission impact of energy systems is also not reflected, the focus is on combustion/operation and CO<sub>2</sub> (OECD NEA 2018, p101). The study also only marginally considers resource and space consideration. On costs the following OECD statements are important and agrees with the authors' analysis:

- *“When VREs increase the cost of the total system, ... , they impose such technical externalities or social costs through increased balancing costs, more costly transport and distribution networks and the need for more costly residual systems to provide security of supply around the clock” (OECD NEA 2018, p39).*
- *“From the point of view of economic theory, VREs should be taxed for these surplus costs [integration costs above] in order to achieve their economically optimal deployment.” (OECD NEA 2018, p39).*

Various other electricity-cost-metrics exist<sup>3</sup> such as LCOE, VALCOE, LACE, LCOS, Integrations Costs of VRE, etc. For a complete cost picture, the authors introduce the full cost of electricity to society, FCOE. The authors' FCOE falls into ten different categories that illustrate its complexity and many are not easily measurable (see Figure 5). The authors have not yet found these 10 categories considered in full by any energy economic institutions, government, university, private company, or any of the media. Usually only one or two categories are discussed, and levelized cost of electricity (LCOE) is erroneously used most often. The socio-economic and environmental benefits of understanding the methods for electricity cost determination are substantial and require further study.

### 2.1. Full Cost of Electricity – FCOE

Since the question of electricity is one at society level, or at least at country level, the authors attempt to define the true full cost of electricity FCOE. Ten cost categories determine what we refer to as the **Full Cost of Electricity 'FCOE'** to society:

1. **Cost of Building** electricity generation/processing equipment such as a solar panel, power plant, a mine, a gas well, or a refinery, etc. (often referred to as investment costs).
2. **Cost of Fuel**, such as oil, coal, gas, uranium, biomass, or wind (which has a zero cost of fuel). This would include processing, upgrading, and transporting the fuel through pipelines, on vessels, rail, or trucks. It would also include costs for rehabilitating the source of the fuel, such as mines or wells. LCOE often assumes that the price for CO<sub>2</sub> is part of the Cost of Fuel, but to be correct we define a separate category 7. Cost to Environment which includes GHGs.
3. **Cost of Operating** and maintaining the electricity generation/processing equipment.
4. **Cost of (Electricity) Transportation/ Balancing** systems to the end user, such as transmission grids, charging stations, load balancing, smart meters, other IT technology.
  - a. As grids and energy systems become more computerized, the threat of and costs from cyber-attacks increases. Refer to BCG Guide to Cyber Security (BCG 2021a) and the March 2022 cyber-attack on satellite infrastructure targeting German windmills (Willuhn 2022). Also refer to the 2017 attack on Ukrainian energy infrastructure described in the excellent book Sandworm – a new era of cyberwar (Greenberg 2019).
5. **Cost of Storage**, if required medium and long-term (different from load balancing), that should include cost of building and operating, for example, pumped hydro, batteries, hydrogen, etc. Keep in mind that oil, coal, gas, uranium, and biomass are storage of energy in themselves.
  - a. Full Cost of Storage must include just for storage alone (1) Cost of Building, (3) Cost of Operation, (7) Cost to Environment, (8) Cost of Recycling, and (10) other metrics MIPS, lifetime, eROI.
6. **Cost of Backup** technology; electricity systems include redundancy in case something happens to a power plant or equipment. All reliable electricity systems are overdesigned, usually by ~20% of the highest (peak) power demand. In addition:

<sup>3</sup> LCOE = Levelized Cost of Electricity; VALCOE = Value-Adjusted Cost of Electricity; LACE = Levelized Avoided Cost of Electricity; LCOS = Levelized Cost of Storage; VRE = Variable Renewable Energy.

- a. Every single VRE installation equipment such as wind and solar require 100% backup, storage, or combination of both as by nature they are not dispatchable or predictable.
  - b. Conventional power plants are often used as a backup for VRE. The higher the share of VRE in the electricity system, the less such backup capacity will be used causing lower asset utilization. Thus, the cost of backup increases logarithmically as the VRE share in the energy system increases beyond a certain point (see also IEEJ 2020, p124ff).
  - c. Thus, backup capacity may and currently does substitute long-term storage and is included herein as a separate category since it has a different quality and cost. It is important to avoid double counting.
7. **Cost to Environment** includes the true cost (not arbitrary taxes or subsidies) of all emission and non-emission environmental impacts from power generation technology along the entire value chain. This would include but not be limited to life-cycle GHGs from building to recycling the equipment, particulate matters, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, as well as non-GHG climate effects and impact on plant and animal life (Schernikau and Smith 2022 and Smith and Schernikau 2022).
- a. Climatic and warming effects of large-scale wind and solar installations are well documented but remain mostly ignored by the industry, policy makers, and investors (see Barron-Gafford et al. 2016, Miller and Keith 2018, Lu et al. 2020, Smith and Schernikau 2022).
  - b. Benefits of CO<sub>2</sub> because of its proven fertilization effects for all plant life would also have to be incorporated (Zhu et al. 2016, NASA 2019, WEF 2019). For cost of global warming the authors refer to Nordhaus 2018, Lomborg 2020, and Kahn 2021.
8. **Cost of Recycling**, decommissioning, or rehabilitation of electricity generation and, separately as part of point 6. above, backup equipment after its lifetime expired. See also The Hidden Cost of Solar Energy published by INSEAD and Harvard (Atasu et al. 2021).
9. **Room Cost** (sometimes called *land footprint* or *energy sprawl*) is a new cost category relevant for low energy density "renewable" energy such as wind, solar, or biomass. Due to the low energy density per m<sup>2</sup> of wind, solar, or biomass, they take up significantly more space than conventional energy generation

installations where room costs tend to be negligible, at least relatively to VRE. These larger space requirements negatively impact our environment and need to be considered.

- a. Room cost includes direct costs and opportunity costs related to the larger space required and the impact on, i.e., sea transportation routes, crop land, forests, urban areas, affected bird and animal life, changing wind and local climate, increasing temperatures, increasing water scarcity in arid areas, noise pollution, etc. (Double counting needs to be avoided with point 7. Cost to Environment).
- b. A new coal power plant in India would require about 2,8 km<sup>2</sup> per 1 GW installed capacity plus the space for the coal mining (Zalk and Behrens 2018, CEA 2020). A new solar park would take about 17 km<sup>2</sup> per 1GW installed capacity, plus the space for mining the resources to build solar. 1 GW installed solar capacity would generate much less electricity due to solar's low capacity factor. Adjusting for a 16,5% average Spanish solar capacity factor, this would translate to a comparable 93 km<sup>2</sup> for solar, or a multiple of 33x compared to coal. Additional space is required for backup and/or storage due to solar's intermittent nature (Schernikau and Smith 2021).
- c. The room costs per installed MW of VRE increases the higher the installed capacity reaches. The reason has to do with reduced capacity factor for wind in larger wind farms (see wake effect) as well the reduced value of additional VRE beyond an optimal penetration level (Smith and Schernikau 2022, NEA 2018, p84ff).

10. **Other Metrics:** Three more elements of the Full Cost of Electricity FCOE are metrics that are not measured in US\$

but are important for environmental efficiency of electricity generation. None of these metrics are included in LCOE.

- a. **Material Input Per Unit of Service (MIPS):** measures the material or resource efficiency of building energy equipment in tons of raw materials per MW capacity and per MWh produced electricity. MIPS for energy equipment thus measures an important element of environmental impact. The US Department of Energy DOE and the IEA document the high material input for renewable technology and capacity (see Figure 4, DOE 2015, IEA 2020d, p6).
- b. **Lifetime:** measures how long the equipment is used before it is retired or replaced. We need to consider that "repowering" or better early replacement of wind and solar significantly reduces the designed lifetime.
- c. **Energy Return On Investment (eROI):** in a way summarizes a large portion of all measures mentioned above. eROI also accounts for the energy efficiency of building, operating, and recycling the equipment. It includes all embedded or embodied energy. An eROI of 2:1 means investing 1 kWh input energy for every 2 kWh of output energy. As per Weissbach et al. 2013, solar and biomass in Northern Europe have a buffered eROI of about 2-4. Nuclear has an eROI of about 75, and coal and gas about 30, which the authors consider too optimistic. Roman culture, the most efficient pre-industrial civilization, reached an eROI of 2:1. Much uncertainty remains about actual eROI values.

The authors emphasize here that the **Full Cost of Electricity "FCOE" to society does not include taxes or subsidies** which in fact are arbitrary<sup>4</sup>. Governments sometimes impose government set prices or taxes in an attempt to emulate such true

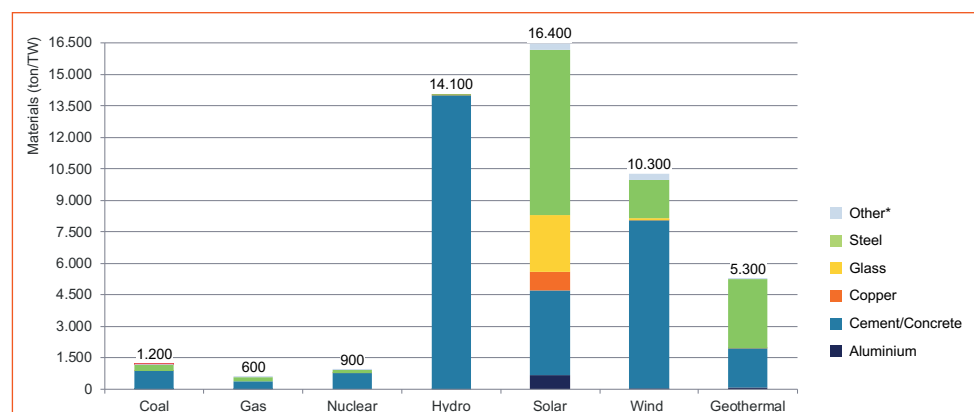


Figure 4: Base-Material Input per 1 TW Generation

Note: Other includes iron, lead, plastic, and silicon.; Schernikau assumes this is based on average US capacity factors  
Source: Adapted from DOE 2015, Table 10.4, p390

<sup>4</sup> The IMF reported about US\$ 450 billion of global "explicit" fossil fuel subsidies in 2020 and about US\$ 5.5 trillion in so called "implicit" subsidies for fossil fuels (IMF 2021). IRENA estimates that renewables received around US\$ 130 billion of subsidies in 2017 (IRENA 2020), thus per MWh significantly more than fossil fuels. The EU spends already more subsidies on renewables than on fossil fuels in absolute terms (EC 2022, p30). The authors dismiss the logic of implicit subsidies as virtually any number can be calculated depending on the assumptions made, and all forms of energy receive "implicit" subsidies, whether it be solar, wind, biomass, hydro, gas, coal, or nuclear. For example, wind and solar are not CO<sub>2</sub>-taxed even though their production and recycling emit significant amounts of CO<sub>2</sub>. For projected cost of global warming, please refer to Nordhaus 2018, Lomborg 2020, and Kahn 2021. To truly compare subsidies, they will always have to be baselined on a per unit of output energy basis and include the full value chain, which is rarely done.



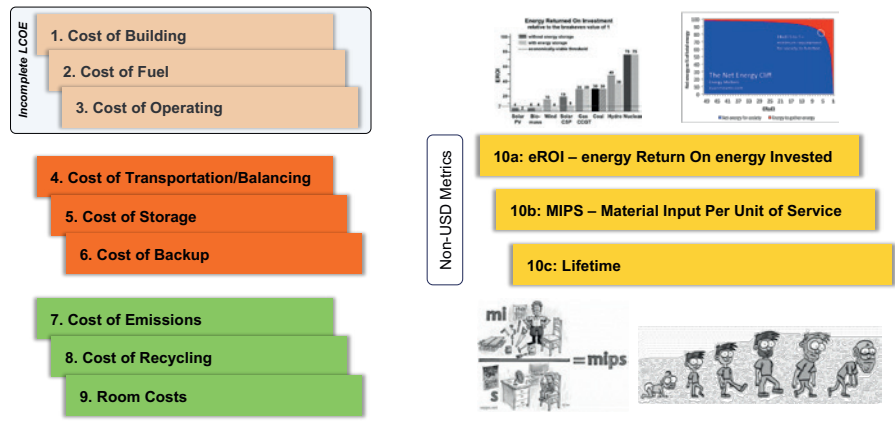
costs or to support research & development. FCOE will account for all “true costs” and therefore may not be the right metric for all investment decisions that have to incorporate taxes, subsidies, or prices (rather than costs) of certain elements.

FCOE attempts to estimate the true cost to society that is relevant when estimating the global cost of the energy transition to the global cost of any human-caused climatic changes. Therefore, fossil fuel subsidies are not included as a separate item<sup>4</sup>. Neither are subsidies for wind and solar included, such as missing CO<sub>2</sub> taxes even though the production and recycling of solar and wind capacity and backup systems incur high relative CO<sub>2</sub> per kWh. Please note that to date, CO<sub>2</sub> or “carbon” taxes include only direct CO<sub>2</sub> emissions from fuel-combustion leaving out life-cycle emissions along the entire value chain, such as methane and other GHGs (see Schernikau and Smith 2022) on Climate Impacts of Fossil Fuels). Therefore, **CO<sub>2</sub> taxes are misleading and wrong, causing economic and environmental undesired distortions, such as the switch from coal to gas** for climate reason, dismissing the higher climate impact of methane emissions associated with gas and especially LNG production.

From the above analysis (see also Schernikau and Smith 2022), it can be concluded that Levelized Cost of Electricity LCOE – which only includes Cost of Building (1), Cost of Fuel (2), Cost of Operation (3), and sometimes certain CO<sub>2</sub> taxes (part of Cost to Environment, 7) – is not a reliable nor environmentally or economically viable measure with which to evaluate different forms of energy generation at country or society level. Only FCOE includes all relevant economic and environmental costs from emissions and non-emissions, though its true value is difficult – but not impossible – to determine.

Renowned energy think-tanks such as the International Energy Agency (IEA) in France, the International Energy Economics Institute (IEEJ) in Japan, the OECD, or the US Energy Information Agency (EIA) have pointed out the incompleteness of LCOE multiple times. Yet LCOE continues to be widely used despite its failings, usually without clear disclaimers and notes, even by these agencies themselves, by governments, banks, institutions, NGOs, companies, many scientists, and the common press.

Undesirable effects occur when conventional fuels and variable renewable energy VRE (wind and solar) are mixed to provide a country's electricity. These effects would be measured completely by FCOE categories 1-10 above. For instance, beyond a certain point, usually about a 10-20% share, the cost to a nation's electricity system always



**Figure 5: Full Cost of Electricity to Society – A Complete Picture**

Note: Age cartoon original from Alexandra Martin; energy cliff from eROI for beginners; MIPS cartoon from Seppo.net, eROI Weissbach et al. 2013. Source: Schernikau Research and Analysis

increases with higher shares of variable renewable energy VRE, such as wind and solar (IEEJ 2020, p124ff, IEA 2019a, and IEA 2020c, p13). The reasons include but are not limited to the previously discussed differential energy density and efficiency, intermittency and thus backup/storage requirement, low-capacity factors, inter-connection costs, material and energy costs, low eROI, efficiency losses of backup capacity, room costs for the space required and plant/animal life destroyed, recycling needs, and so forth.

- The IEA confirmed in December 2020 (IEA 2020c, p14): “...the system value of variable renewables such as wind and solar decreases as their share in the power supply increases”. This would also remain true if the price of renewable capacity (cost item 1: Cost of Building) continues to decline or even were to reach zero. For example, it doesn't change the conclusion even if the price of solar panels produced with coal power in China partially using forced labor reaches zero (Murphy and Elima 2021). This would also remain true if wind or solar technology would reach an impossible 100% quantum efficiency.

LCOE is inadequate to compare intermittent forms of energy generation with dispatchable ones, and therefore when making energy policy decisions at a country or society level. LCOE may, however, be used selectively to compare dispatchable generation methods with similar material and energy inputs, such as coal and gas. Using FCOE, or the full cost to society, wind and solar are not cheaper than conventional power generation and in fact become more expensive the higher their penetration in the energy system. This is also illustrated by the high cost of the so called “green” energy transition especially to poorer nations (McKinsey 2022 and Wood Mackenzie 2022). If wind and solar were truly cheaper – in a free market economy – they would not require trillions of dollars of government funding or subsidies, or laws to force their installation.

## 2.2. Energy return on energy invested – eROI

The authors suggest that environmental efficiency of energy is more complex than emissions alone. Especially energy return on energy invested, or energy return – **eROI, material input, lifetime, and recycling efficiency need to be considered as they determine other very important environmental and economic elements for evaluating electricity generation.**

EROI measures the net energy efficiency of an energy gathering system. Higher eROI translates to lower environmental and economic costs, thus lower prices and higher utility. Lower eROI translates to higher environmental and economic costs, thus higher prices and lower utility. When we use less input energy to produce the same output energy, our systems become environmentally and economically more viable. **When we use relatively more input energy for each unit of output energy, we risk what is referred to as “energy starvation”** (see Appendix on energy shortages). At an eROI of 1 or below we are running our systems at an energy deficit.

*Note: Vaclav Smil's “Energy and Civilization – a History” (Smil 2017) is an excellent, highly-acclaimed book on the subject of energy. In addition, the authors recommend Kiefer 2013 and Delannoy et al. 2021 for more detailed discussions on eROI. Kis et al. 2018 approach eROI by using GER (Gross Energy Ratio) and GEER (Gross External Energy Ratio). Kis et al. define GEER as life-cycle eROI and find a global average for GEER of approx. 11:1. Due to the complexity of eROI more research is required in harmonizing the approach for its determination.*

The eROI is generally higher for wind than for solar, also driven by the higher average capacity factor. According to Carba-jales-Dale et al. 2014, the average solar PV from a net energy efficiency point of view can only “afford” 1.3 days of battery storage

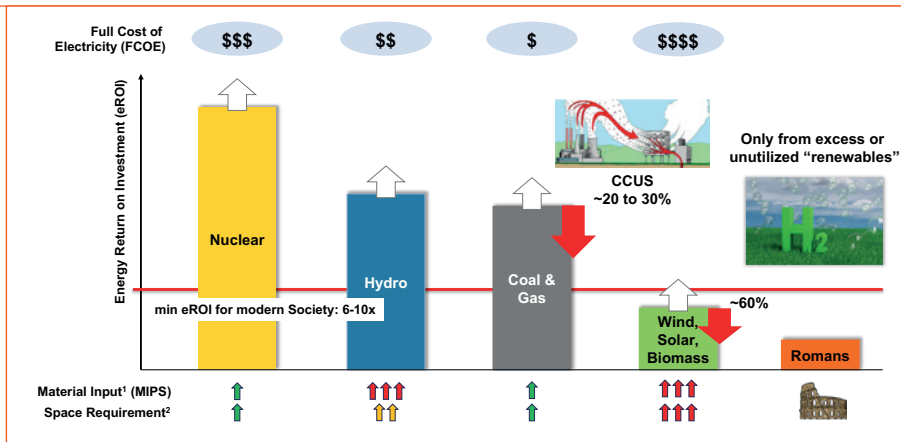
"before the industry operates at an energy deficit". Wind, from a net energy efficiency point of view, can "afford" over 80 days of geological storage (12 days of battery storage). However, for the mentioned net energy efficiency calculations, the researchers made the simplifying yet unrealistically generous assumption that a generation technology is supplied with enough energy flow (either wind or sunlight) to deliver 24h of average electrical power output every day. This means days or weeks with no sun or wind would multiply the storage requirement and therefore further diminish the net energy efficiency or eROI. Carbajales-Dale et al. included the proportion of electricity output consumed in manufacturing and deploying new capacity.

It can be concluded that **wind and solar have a very low eROI and are therefore a step backward in history in terms of net system energy efficiency. Their grid-scale employment risks energy starvation and is therefore not desirable economically nor environmentally.** The authors would like to point out that for certain application, i.e., heating a pool that is not connected to the grid or heating water for personal use in remote areas, solar and wind may be a desirable complement to our energy systems. The installation of wind and solar does reduce the amount of fossil fuels combusted assuming no increase in power demand, which is the only positive of their employment. This one positive aspect comes at a multitude of costs summarized illustratively in Figure 3: *Summary of shortcomings of variable renewable energy for electricity generation* which need to be fairly evaluated.

The industrial revolution reduced humanity's dependency on biomass, hydro, and wind. Based on the new-found **high-eROI-coal-energy**, this energy revolution allowed for the dramatic increase in standards of living, industrialization, decrease of heavy human labor, and abandonment of slavery. This revolution and its positive impact on human life was only possible due to a drastic increase in energy availability, energy efficiency, or eROI. The energy revolution came with a diversification away from biomass burning towards fossil fuels, hydro, and later nuclear.

Prior to the industrial revolution human development peaked during the Roman Empire at an estimated sustained eROI of around 2:1 (Figure 6). During the 20th century, petroleum's high eROI, higher energy density, and versatility enabled the transportation revolution with cars, aircraft, and rockets.

To appreciate the magnitude of this energy revolution, consider that **three tablespoons of crude oil contain the equivalent of**



**Figure 6: The Concepts of eROI and Material Efficiency – Illustrative**  
 Note: white arrows illustrate future technological improvements, red arrows illustrate loss of energy and therefore loss of eROI from CCUS or "green" H<sub>2</sub> systems; (1) Material Input MIPS measures the resource efficiency, i.e., material input required per unit of output, here for example MW capacity or MWh of produced electricity. (2) Space requirement measures the land footprint per unit of electricity produced.  
 Source: Schemikau Research and Analysis

**eight hours of human labor** (Kiefer 2013 and footnote<sup>5</sup>). Figure 6 schematically illustrates the concept of eROI in today's electricity systems and the impact of CCUS or hydrogen storage on net energy efficiencies (Supekar and Skerlos 2015).

Dr. Euan Mearns 2016 based on Kiefer's work explains eROI and points out that modern life requires a minimum eROI of 5-7 while most solar and many wind installations depending on location have a lower eROI and are therefore inherently energy insufficient to support society at large. As per Weissbach et al. 2013, solar and biomass in Northern Europe have a buffered eROI of about 2-4. Kiefer defines "The Net Energy Cliff" which demonstrates how – with declining eROI – society would commit ever larger amounts of available energy to energy gathering activities.

One example is employment. Below an eROI of 5-7, such great numbers of people would be working for energy gathering industries that there would not be enough people left to fill all other positions our current altruistic society requires. Some, however, may argue that this is desirable due to artificial intelligence's long-term threat to human labor. IEA's recent World Energy Outlook (IEA 2021b) confirmed that global employment would rise from

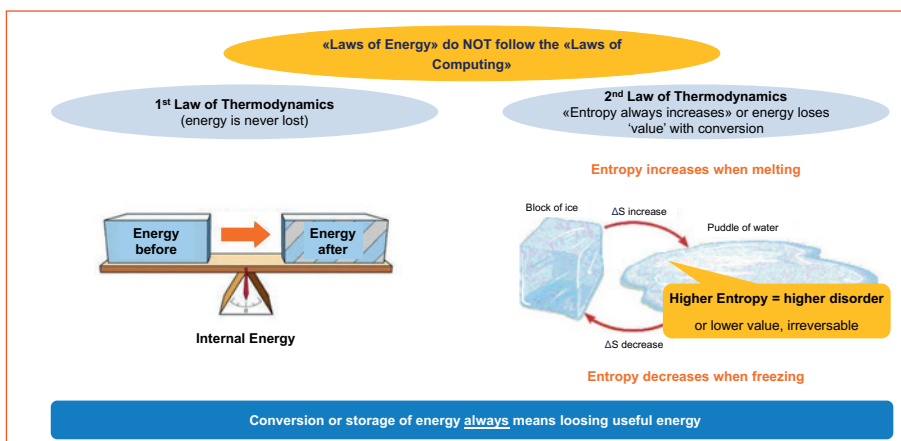
"renewable" energy systems, therefore providing evidence for the lower eROI of "renewable" technologies. McKinsey 2018, not considering the eROI concept, argues that automation will replace low level workers; this trend is already well underway. Those without higher technical and intellectual skills may become unemployable in the future workforce. In essence, McKinsey does not seem to see a problem with a higher employment in energy related industries.

**The principle of energy return on investment eROI is at the core of society's energy efficiency, which is at the core of humanity's development and survival.**

### 2.3. The 2<sup>nd</sup> Law of Thermodynamics' impact on energy systems

The preface already introduced the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Law of Thermodynamics. Figure 7 tries to summarize the laws' function. The 1<sup>st</sup> Law is simple as it basically states that energy can never be lost, only be converted from one form to another.

The 2<sup>nd</sup> Law introduces the concept of entropy, another word for usefulness or value of energy (high entropy = high disorder, or low value of energy). Essentially, the 2<sup>nd</sup> Law



**Figure 7: 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Law of Thermodynamics**  
 Source: Schemikau, graphs from (link)

<sup>5</sup> Based on Kiefer 2013: eROI for humans and oxen as ratio of max work output divided by food calorie input calculated from Homer-Dixon's online data as 0,18:1. EROI for Roman wheat as ratio of food calorie output divided by labor and seed grain inputs was 10,5:1. EROI for alfalfa was 27:1. Humans eating wheat yield heavy labor eROI of 0,18 x 10,5 = 1,8:1. Oxen eating alfalfa yield eROI of 0,18 x 27 = 4,7:1. Teaming humans with oxen and applying reductions for idle time and for light work/skilled labor versus heavy labor gives 4,2:1 peak eROI and 1,8:1 sustained eROI.  
 Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=4000800>

explains why in a natural state heat always moves from warm to cold and not the other way around. When energy is converted from one form to another, entropy always increases, or 'useful' energy is lost. The logical conclusion for our modern energy systems is that **we need to avoid conversion and storage of energy as well as complexity of our energy systems as much as possible**, as all of these result in loss of useful energy.

This loss of useful energy is important because it directly translates into reduced system energy efficiency. It directly results in lowering the eROI when we convert wind power to hydrogen, when we store hydrogen, when we convert hydrogen back to power. It also directly results in warming of our biosphere. The net efficiency of a gas or coal-fired power plant is also the result of the 2<sup>nd</sup> Law of Thermodynamics. Every process that takes place in the boiler, the turbine, or the generator "costs" energy that is lost in form of low value heat to our surroundings.

We established in chapter 2 that the "green" energy transition towards variable renewable energy in form of wind and solar will substantially increase the cost of electricity. The rise in cost will primarily burden poorer people and developing nations (McKinsey 2022 and Wood Mackenzie 2022). With the concept of the 2<sup>nd</sup> Law of Thermodynamics, we can now demonstrate another reason why the "green" energy transition will increase global energy inefficiencies, because they require more complex energy systems and increased storage. The IEA summarized the issue of increasing complexity in their article *Energy transitions require innovation in power system planning* (IEA 2022a, see Figure 8) as follows:

- "Shifting away from centralized thermal power plants as the main providers of electricity makes power systems more complex. Multiple services are needed to maintain secure electricity supply."
- "In addition to supplying enough energy, these include meeting peak capacity requirements, keeping the power system stable during short-term disturbances, and having enough flexibility to ramp up and down in response to changes in supply or demand."

More importantly **the 1<sup>st</sup> Law of Thermodynamics proves that most of our produced and consumed energy will end up in low-value or high-entropy heat and thus warms our biosphere adding to measured temperature increase (Soon et al. 2015)**. The authors note that there is also embodied energy in the products that we produce that is not released in form of heat. These products are primarily used for housing or end up being consumables. The well documented heat island effect is also a manifestation of the heat emitted from our energy systems to our surroundings.

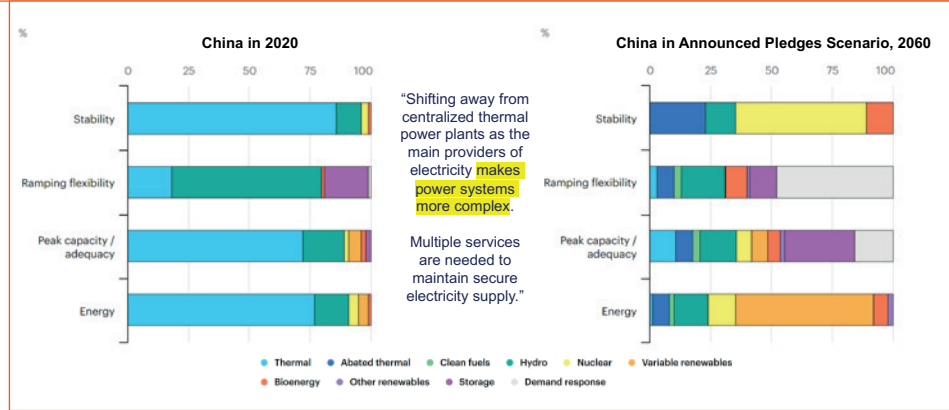


Figure 8: Current and Future Energy Security in China  
Source: Based on IEA 2022a

When we produce energy from sources such as nuclear, oil, coal, gas, or even geothermal, then we take energy that is "inside our planet" and in the end convert it to low-value heat warming our biosphere. When we use energy from solar radiation by employing photovoltaics, we would not "net" warm our planet only if we were to disregard the warming from solar panel's absorption and shifting atmospheric circulation (Lu et al. 2020), and if we disregard the energy for building and recycling the equipment or systems required to extract and use solar energy. Taking the energy from wind has additional climatic warming consequences as detailed by Miller and Keith 2018. High CO<sub>2</sub> emitting forms of producing energy such as coal or gas partially off-set the warming of the biosphere through CO<sub>2</sub>-driven fertilization and greening that reduces solar warming (solar radiation can only do one thing, grow a plant, or warm the Earth, see Smith and Schernikau 2022).

### 3. Discussion (projected future of energy and suggestions for a revised energy policy)

To allow for a "clean energy transition", The Boston Consulting Group (BCG 2021b) projects global wind and solar power capacity to increase similar to Germany's past 20-year overbuilding (see Figure 2 and Figure 9). 2020 global power generation

capacity totaled about 8.000 GW, of which over 1.400 GW were wind and solar. In 8 years (at time of writing), by 2030, BCG projects that wind and solar alone will have to reach 8.600 GW, doubling today's entire global electricity capacity, the same as what happened in Germany during 20 years from 2002 until 2021. Based on 2021 IRENA outlook data, BCG also forecasts that global wind and solar installed capacity must reach 22.000 GW by 2050, almost quadruple today's entire global electricity generation capacity. It is the authors' opinion that **these name-plate capacities will not be reached as the world would run out of energy, raw materials, and money before** it happens, and if they were reached, the economic and environmental impact to society would be distressing as explained in this paper.

Such dramatic expansion of wind and solar capacity will result in more fragile and expensive energy systems. It will also negatively impact the environment (see space requirements, backup, material input, eROI, recycling needs, local climate impacts, etc.) offsetting any desired – entirely modeled – positive effects on the global climate from anthropogenic GHG emissions reductions. On the positive side, in the authors' view the only positive aspect, such expansion will limit the use of fossil raw materials mined. The question is, however, if it would truly reduce total raw material use when honestly and truly accounting for the entire life cycle from resource mining, via material transportation, processing, manufacturing and

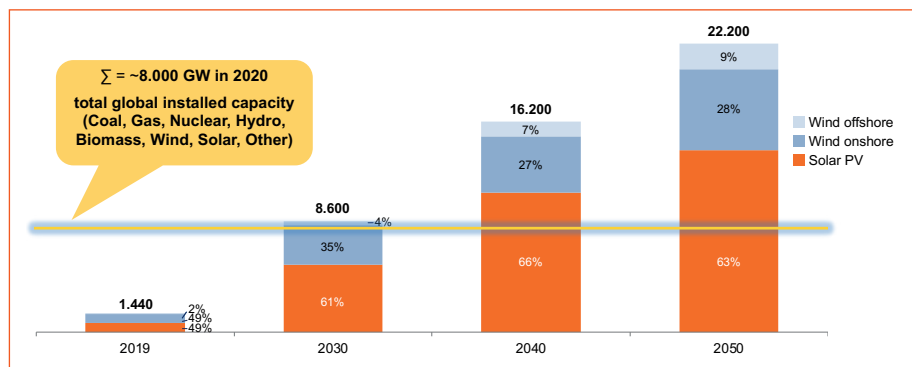


Figure 9: Wind/Solar Capacity Forecast for 2050 to be Almost 4x Today's Total Capacity  
Source: Schemikau Research and Analysis based on 2021 IRENA 2021 and BCG 2021b



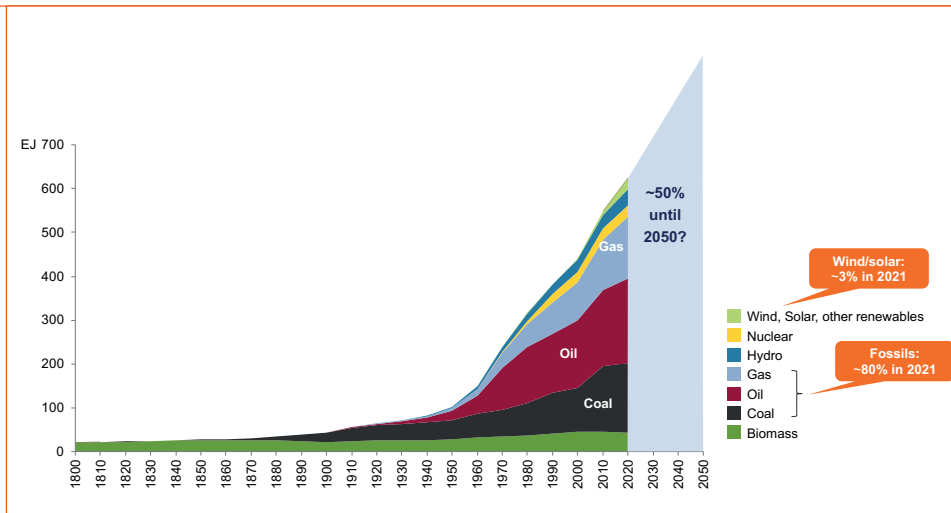
operation, to recycling (Figure 4 and Figure 11). Further research is required here.

After having risen from ~2 billion to ~8 billion in the past 100 years, the UN projects that global population will rise further from currently ~8 billion to ~10 billion until 2050 (OurWorldInData 2021). Population may peak around 11-12 billion by the end of the century. Despite continued improvements in energy efficiencies, rising living standards in developing nations are forecasted to increase global average annual per capita energy consumption from ~21.000 kWh to ~25.000 kWh by 2050 (Lomborg 2020, BP 2019)

As a result, and as illustrated in Figure 10, **global primary energy consumption could rise by up to 50% by 2050** (~25% population increase and ~20% PE/capita increase translates to ~50% PE demand increase). Energy demand growth is fueled by developing nations in Asia, Africa, and South America. Developed nations are expected to consume less energy in the decades to come, driven by population decrease/stagnation and efficiency increases. However, historically, energy efficiency improvements have always increased energy demand (see Jevons Paradox, Polimeni et al. 2015). To illustrate, please refer to the authors recommended book *Life After Google* (Gilder 2018) explaining the increased requirement for energy for global computing.

The authors reiterate that recent models by McKinsey estimate that global primary energy demand will only increase by 14% by 2050, while IEA's 2021 Net-Zero Pathway models a reduction by ~10% in primary energy by 2030, in 8 years from writing of this paper, although this is questioned by the energy industry and the authors (IEA 2021e, McKinsey 2021). The same reports estimate that global electricity generation will almost double from 2020 to 2050 also driven by the projected electrification of transportation. The Institute for Energy Economics in Japan (IEEJ 2021) predicts global primary energy demand to increase by 30% by 2050 while the American EIA predicts a ~50% increase (EIA 2021). Kober et al. 2020 compare various energy scenarios and point out that essentially all energy scenarios assume a decoupling of economic growth and energy consumption in the future.

**Growth in electricity demand will surpass primary energy growth** partially due to the global electrification of operations. Electricity's share of primary energy will also increase because our lives become more computerized and "gadgetized". Electricity is also planned to replace significant non-electricity energy consumption for transportation (i.e, EVs), heating (i.e, heat pump), and industry (i.e., DRI for steel production), which we have shown will reduce net energy efficiencies if wind, solar, or biomass are used.



**Figure 10: Global Primary Energy from 1750 to 2050**  
 Note: Primary electricity converted by direct equivalent method. Exa-Joule (EJ), where 600 EJ approximates 170.000 TWh.  
 Source: Schemikau Research and Analysis based on data compiled by J. David Hughes. Post-1965 data from BP, Statistical Review of World Energy (link). Pre-1965 data from Amulff Grubler (1998): "Technology and Global Change: Data Appendix" (link), and World Energy Council (2013): World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050 (link).

Despite hoped-for technological improvements, **it is a prudent assumption that wind and solar alone will not be able to generate enough total electricity to match the expected demand increase to 2050.** This is confirmed by the IEEJ 2021 forecasting an absolute increase in fossil fuels share in primary energy in its reference case by 2050. In July 2021, the IEA confirmed that "...[renewables] are expected to be able to serve only around half of the projected growth in global [electricity] demand in 2021 and 2022" (IEA 2021c). For primary energy growth, the renewable share will be only a fraction, perhaps 20%, as today about 2/5th of primary energy is consumed in electricity production.

Even if wind and solar were to fulfil all future increases in primary energy demand, it becomes evident that for the next 30 years and beyond we will continue to depend on conventional energy resources for a large portion, if not the vast majority, of our global energy needs. For recent "Net-Zero" pathways (IEA 2021e) and scenarios to succeed on paper, they require a number of highly optimistic, often unrealistic, assumptions related to rapid advances in technol-

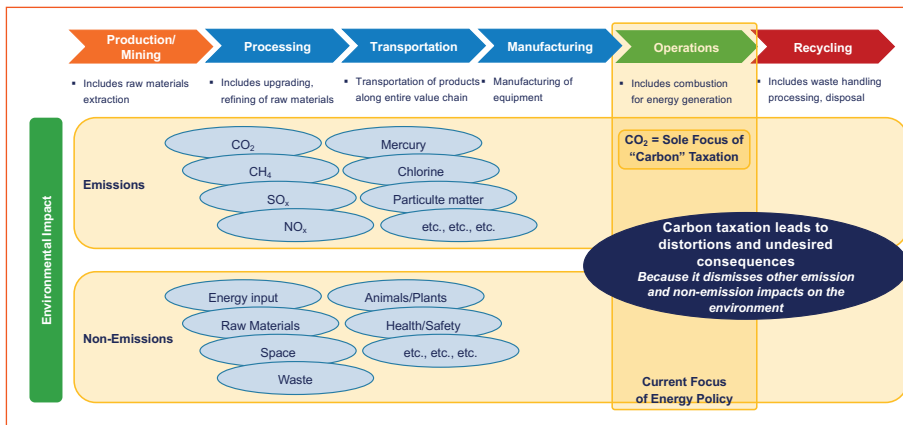
ogy development, hydrogen penetration, demand curtailments, raw materials with controllable prices and supply availability, and so forth. They also largely dismiss eROI, material input, lifetime, and realistic recycling assumptions and thus "renewables" negative economic and environmental impact.

### 4. Conclusions and future research (Future energy policy)

Energy policy is of utmost importance and has three objectives:

- (1) Security of supply,
- (2) Affordability of supply, and
- (3) Environmental protection.

Today's energy policy, however, focuses simplistically on reducing anthropogenic (human-caused-energy) CO<sub>2</sub> emissions with the goal to limit or reduce future global warming (Figure 11). As demonstrated by Glasgow's COP26 meeting results from November 2021 including but not limited to the "Global Coal to Clean Power Transition



**Figure 11: Environmental Impact of Energy Systems - Why Carbon Taxation Leads to Distortions and Undesired Consequences**  
 Source: Schemikau Illustration

Statement" (UN-COP26 2021), many nations' energy policy decisions today pay less attention onto objectives (1) and (2), and even most aspects of (3) such as plant/ animal life, land/ space use, material & energy input, recycling efficiency (see Figure 3, Figure 11, and Figure 12). The 2022 Russia/ Ukraine crisis has put new focus on energy security at least in Europe which to a large extent has relied on Russian energy raw material supply and spent 20 years reducing its own energy independence (see Germany's political decisions to abandon coal and nuclear and the EU's extensive initiatives to divest from reliable fossil fuel energy sources). This new focus, however, seems rather ad-hoc than strategic.

The objective of global investments in the "energy transition" should be to meet all three prime goals of energy policy, not only one sub-goal, to reduce human-energy CO<sub>2</sub> emissions. **Today's misguided energy investment focus on wind and solar increases the risk of energy starvation with all its consequences** (see Appendix).

The full cost of electricity FCOE and eROI illustrate that wind and solar are unfortunately not the solution to humanity's energy problem. At grid scale, they will lead to undesired economic and environmental outcomes. The use of LCOE for the purpose of discussing the "green" energy transition must cease because it continues to mislead decision makers. Governments, industries, and educational institutions are urgently encouraged to spend additional time on leaning and discussing energy economic realities before forcing the basis of today's existence away from proven and relatively affordable energy systems. It takes only energy to solve the food and water crisis, it takes only energy to withstand natural disasters, it takes only energy to eradicate poverty.

It must be understood that the dramatic planned increase in installed solar and wind capacity as detailed in Figure 9 has one advantage, it reduces the amount of required fossil or nuclear fuel consumed, assuming no increase in power demand. However, this one advantage comes at significant costs to our environment and economies that have been detailed herein. The costs to the environment originate from the intermittency and inherent low eROI of VRE when considering the entire value chain and life-cycle (Figure 11).

The **New Energy a33** is a point in time where humanity can sustainably wean off fossil fuels. Such new energy system may be completely new, possible a combination of fusion or fission, solar, geothermal, or a presently unknown energy source (see also Manheimer 2022). It would likely harness the power of the nuclear force, the power of our planetary system (i.e., sun), and the

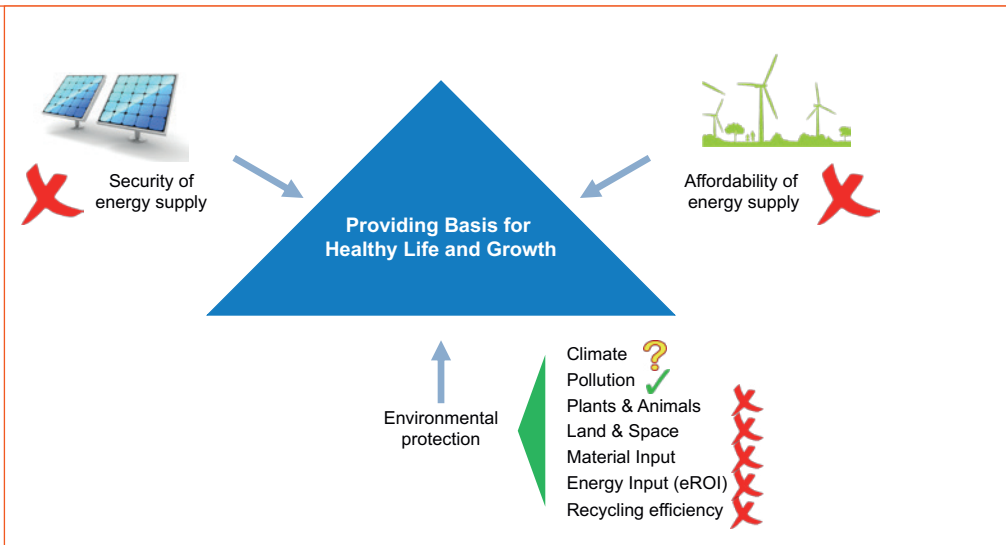


Figure 12: Variable Renewable Energy Does not Fulfill Objectives of Energy Policy  
Source: Schemnikau Illustration

energy from within our planet. It will have little to do with today's wind and photovoltaic technologies due to the physical limits of energy density, or energy available per m<sup>2</sup>, and intermittency.

The authors suggest that to reach this **New Energy Revolution**, more must be invested in education and base research (energy generation, material extraction & processing, storage, superconductors, efficient recycling, etc.). Just as important is the second suggestion for continued simultaneous investment in conventional energy to make it more efficient and environmentally friendly. It must be noted, however, that non-CO<sub>2</sub> emitting forms of energy generation will have no heat-offset in the form of greening and fertilizing CO<sub>2</sub> (see Harverd et al. 2019 and Idso 2021 for an extensive list of peer-reviewed literature). The reduced net energy efficiency of VRE and the increased generation of energy from non-fossil origins will logically cause an increase in low-value or high-entropy heat that will continue to warm our planet even if no GHGs were emitted.

The authors suggest that future research and development should concentrate on understanding the true eROI of energy systems

to aid prioritization, and on reducing emissions and non-emissions environmental impact of existing energy systems. Future research should detail and quantify FCOE and eROI for conventional and variable renewable energy systems, this work requires funding, a larger team, and will be a global effort.

To further optimize conventional energy systems, the authors suggest that ultra-super-critical power plants (USC) and high-efficiency, low-emission (HELE) technologies should be further researched and implemented for increasing their efficiencies. USC technology would have an immediate positive effect on nature at significantly lower costs than installing grid-scale variable renewable energy systems with the required backup (see also Tramosljika et al. 2021). **Investment in – not divestment from – fossil fuel is the logical conclusion not only to eradicate (energy) poverty, improve environmental and economic efficiency** of fossil-fuel-installed capacity (whether it be for transportation, heating, or generating electricity), but also to avoid a prolonged energy crisis that started in second half of 2021.

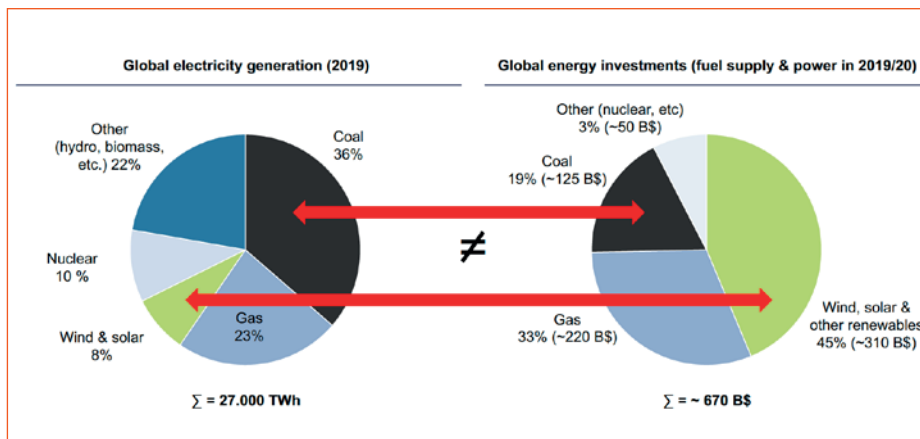


Figure 13: Investments in Coal Less Than Half of Wind/Solar, While Coal Provides 4x More Power  
Note: Right side includes investments in fuel supply and power; for gas it is assumed that 50% of total "oil & gas" fuel supply investments went into gas (511 BS x 0.5 = 255 BS).  
Sources: Schemnikau Research and Analysis based on IEA and BNEF Data; IEA's World Energy Investment 2020

## Appendix: Energy shortages, impacts and causes

The apparent energy shortage in Europe and other parts of the world starting in 2021 illustrates FCOE and the explained high cost of variable renewable energy. The lack of investment in conventional forms of energy resulted in undersupply while at the same time wind and solar were not able to satisfy increased demand. Germany's highest consumer power prices of any industrialized nations is further evidence of FCOE and thus also driven by the relatively high penetration of VRE.

BCG and IEF International Energy Forum warned in their December 2020 Energy report Oil and Gas Investment in the New Risk Environment that "... by 2030, investment levels [in oil and gas] will need to rise by at least US\$ 225 billion from 2020 levels to stave off a [energy] crisis" (BCG and IEF 2020). The press started to pick up this subject in the third quarter of 2021 when energy resources and electricity prices started to soar and first signs of a global energy shortages surfaced. Investments in coal are pro rata lower than in oil and gas (Figure 13).

The 2022 Russian invasion of the Ukraine also illustrated the fragility of global energy systems and how intertwined energy and politics are, especially when it comes to oil, gas, and nuclear. Of the dispatchable forms of energy, coal, hydro, and geothermal energy are the least political. Below a list of selected press articles on the topic of the "new energy crisis", for links see footnote<sup>6</sup>.

1. Bjarne Schieldrop, chief commodities analyst at SEB, Mar 2022: "The global economy is facing energy starvation right now" and 'demand destruction will set a limit to the upside eventually."
2. Vaclav Smil wrote in Feb 2022 referring to the Russian invasion to the Ukraine: "This war will have many long-term consequences, but possibly none more important than its effects on the future of the European energy supply."
3. The N24 wrote in Feb 2022: "The worst energy crisis since 1973."
4. CNN wrote in Nov 2021: "... anti-poverty organizations and environmental campaigners have warned that millions of people across Europe may not be able to afford to heat their homes this winter ..."
5. Wikipedia set up a separate page and referenced the 2021 Global Energy Crisis in November 2021: "The 2021 global energy crisis is an ongoing shortage of energy across the world, affecting countries such as the United Kingdom and China, among others."

6. Bloomberg wrote in Oct 2021: "**The world is living through the first major energy crisis of the clean-power transition. It won't be the last.**"

7. The Globe and Mail wrote in Oct 2021: "India's coal crisis brews as power demand surges, record global prices bite."

8. Bloomberg wrote in Sep 2021: "Europe is short of gas and coal and if the wind doesn't blow, the worst-case scenario could play out: widespread blackouts that force businesses and factories to shut. The unprecedented energy crunch has been brewing for years, with Europe growing increasingly dependent on intermittent sources of energy such as wind and solar while investments in fossil fuels declined."

9. Nikkei Asia wrote in Sep 2021: "Key Apple, Tesla suppliers halt production amid China power crunch.". Bloomberg follows in the same month that China may be diving head first into a power supply shock that could hit Asia's largest economy hard just as the Evergrande crisis sends shockwaves through its financial system."

10. Bloomberg quoted a gas executive in Aug 2021 warning that current energy policy could disrupt delivery of adequate and affordable fuel supply to consumers: "The lack of capital investments in future natural gas projects does not lead us to an energy transition, but instead leads us down an inevitable path toward an energy crisis."

The human and economic costs from shortages in electricity supply are apparent from several examples worldwide. A European example includes the 28<sup>th</sup> September 2003 Italian power outages. That day, the North of Italy experienced up to 3h outage and the South (Sicily) up to 16h. A loss of 200 GWh to customers resulted in an estimated EUR 1,2 billion economic loss (Baruya 2019, former IEA Clean Coal Center). Baruya summarizes "In developing regions, such as sub-Saharan Africa, shortages in energy supplies impede business and economic growth. In advanced economies, failure in the power grid and generating capacity has also led to measurable economic losses, such as those seen in Italy in recent years". Another direct impact of electricity outages will be loss to human lives and health. It must be noted, that none of the "Net-Zero" models or scenarios account for any cost resulting from energy shortage or starvation.

We have shown that **the "energy transition" to variable renewable forms of energies such as wind and solar will result in higher electricity costs**. Energy-transition-supporting strategy consultant McKinsey 2022 summarizes "A Net-Zero transition would have a significant and often front-loaded effect on demand, capital allocation, costs, and jobs". Research shows that a rise in

electricity prices impacts economic output. Baruya 2019 summarized the impact of rising electricity costs to industries in China, the US, Russia, Mexico, Turkey, and Europe based on scientific research. The coefficients of elasticity between economic output and electricity prices were irrefutably negative. Output declined faster in the non-metallic minerals (cement) sector, metal smelting and processing, chemical industry, and mining and metal products. For example, in Vietnam, impacts of an increase in the electricity tariff on the long-run marginal cost of products manufactured using electricity-intensive processes were examined in 2008. An increase in tariffs drove price inflation of all affected goods and services (Baruya 2019)

Baruya 2019 continues and confirms the authors' analysis how the retirement of fossil fuel-fired power plants without adequate, reliable, and affordable alternatives will "reduce the amount of backup power to less than the amount required to meet capacity shortages during peak electricity demand". Developing and industrializing nations, such as India, Indonesia, Bangladesh, and Pakistan will be negatively affected by the cessation of funding from Western financial institutions. Alternative funding may lead to the adoption of less efficient generating technologies resulting in increased environmental burden. Consequently, industrializing countries that do not invest in high-efficiency, low-emissions (HELE) conventional fuel technologies could face higher costs of generation, higher emissions reducing their competitiveness, and as a result slowing economic growth.

The situation cannot be any clearer for governments to act and adjust their taxation, subsidies, and energy policies. **If investments in fossil fuels will not increase substantially and very soon, a prolonged global energy crisis will be difficult to avoid this decade**. This remains true, even if all sustainability goals are achieved and wind and solar capacity continues to increase as planned or hoped. Global energy markets during the 2021 Covid recovery in Europe and Asia and the Russian/Ukrainian war in 2022 are testimonies to the impact of energy shortages.

The authors refer to Kiefer 2013 and reiterate that oil, coal, gas, and uranium are the primary energy sources that nourish rather than starve governments and economies. A true primary energy source, like a true food source, need not be subsidized. It must, by definition, yield many times more energy (and wealth) than it consumes, or else it is a sink, not a source. It is not by subsidies, but rather by the merits of eROI, material efficiency, and energy density, and in spite of heavy taxation and fierce competition with other energy alternatives, that oil, coal, gas, and nuclear have grown to dominate the global energy economy by over 80%.

<sup>6</sup> Sources in order: (1) Telegraph 2 March 2022 ([link](#)), (2) Vaclav Smil, 28 Feb 2021 ([link](#)), (3) The N24, 24 Feb 2022 ([link](#)); (4) CNN, 18 Nov 2021 ([link](#)), (5) Wikipedia 5 Dec 2021 ([link](#)), (6) Bloomberg, 5 Oct 2021 ([link](#)); (7) Globe and Mail, 1 Oct 2021 ([link](#)); (8) Bloomberg, 18 Sep 2021 ([link](#)); (9) Nikkei Asia, 27 Sep 21 ([link](#)); (10) Moneyweb, 8 Aug 2021 ([link](#));

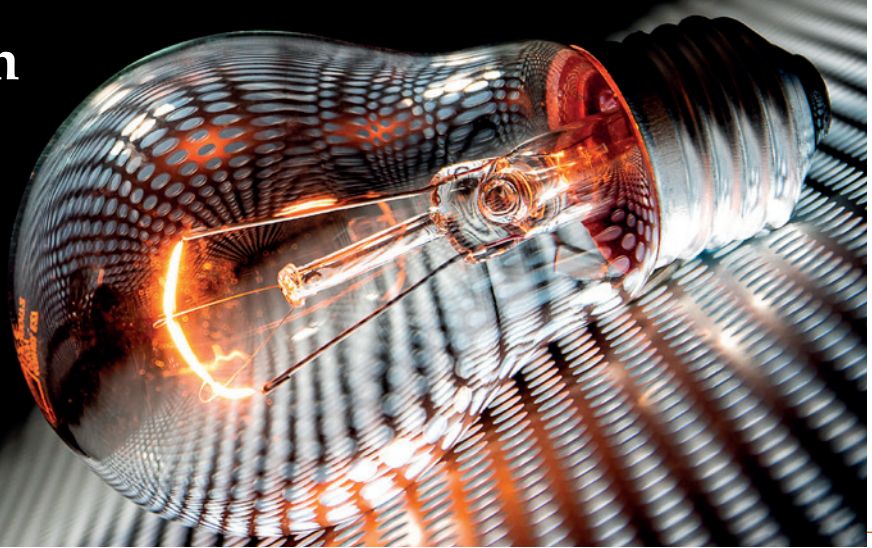


## References

All references where last accessed 31 March 2022 and are mostly buffered in case website content changes.

- AGE 2021, AG Energiebilanzen e.V. 2021, Zusatzinformationen, ([link](#) and [link](#))
- Air Products 2021, ACWA Power and NEOM Sign Agreement for \$5 Billion Production Facility, July 2020, ([link](#))
- Agora 2022, Agora Energiewende, Energiewende Deutschland Stand 2021, ([link](#))
- Atasu et al. 2021, INSEAD, The Hidden Cost of Solar Energy, Dec 2021, ([link](#)); also published by Harvard Business Review, HBR, Jun 2021, ([link](#))
- Barron-Gafford et al. 2016, The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures, Scientific Reports 6, no. 1, ([link](#))
- Baruya 2019, former IEA-Clean Coal Center: The Economic and Strategic Value of Coal, CCC/296, ([link](#))
- BCG and IEF 2020, Oil and Gas Investment in the New Risk Environment ([link](#)); International Energy Forum (IEF) is world's largest int'l organization of energy ministers from 70 countries
- BCG 2021a, BCG CEO Guide to Cyber Security, Sep 2021, ([link](#))
- BCG 2021b, Mastering Scale in Renewables, Jun 2021, ([link](#))
- BCG 2021c: Executive Perspectives: The time for climate action is now ([link](#))
- BWE 2020, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, EEG in Zahlen: Vergütung, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000-2021 ([link](#))
- BNEF 2021, Bloomberg New Energy Finance: Energy Transition Investment Trends, ([link](#))
- BP 2019, BP Statistical Review of World Energy, Primary Energy, ([link](#)); BP donates TPES/capita at 75.7GJ/capita or 21.023 kWh/capita in 2019
- BP 2020, BP Statistical Review of World Energy 2020, ([link](#))
- BP 2021, BP Statistical Review of World Energy 2021, ([link](#))
- Bossel et al. 2003, The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, Cogeneration and Competitive Power Journal Volume 18, Issue 3, 2003, ([link](#))
- Carbajales-Dale et al. 2014, Can We Afford Storage? A Dynamic Net Energy Analysis of Renewable Electricity Generation Supported by Energy Storage, Energy & Environmental Science 7, no. 5, ([link](#))
- CDIAC 2021, Historical Carbon Dioxide Record from the Vostok Ice Core, Dec 2021, ([link](#))
- CEA 2020, Central Electricity Authority, Indian coal space requirement from CEA, April 2020, ([link](#))
- Chen et al. 2019, The Potential of Photovoltaics to Power the Belt and Road Initiative, Joule 3, ([link](#))
- EC 2022, EC Subsidies - Energy Taxation, Carbon Pricing and Energy Subsidies, Jan 2022, ([link](#))
- Delannoy et al. 2021, EROI - peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective, Applied Energy 304, Aug 2021, 117843, ([link](#))
- DOE 2015, Department of Energy, Quadrennial Technology Review 2015, p390 Table 10.4, Sep 2015, ([link](#))
- Economist 2021, The Economist, The Climate Issue: Hitting "Net-Zero" by 2050, Newsletter 22 Mar 2021, ([link](#))
- EIA 2021, US Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2021, Feb 2021, ([link](#))
- Eschenbach, Willie 2017, *The Cruellest Tax Of All | Skating Under The Ice* ([wordpress.com](#)). Detail: the Energy Information Agency (EIA) collects **data**, with exception of gasoline usage. Eschenbach collected **most recent data**, for 2009 (Excel workbook). Gasoline usage figures are **here** from the US Bureau of Labor Statistics. Income averages by tiers are available **here** from the US Census Bureau.
- Fraunhofer 2022, Fraunhofer Institute, Energy Charts, ([link](#))
- Haverd et al. 2019, Higher than Expected CO<sub>2</sub> Fertilization Inferred from Leaf to Global Observations, Global Change Biology 26, no. 4, ([link](#))
- Fujimiri et al. 2020, An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty, Environ. Res. Lett. 15 114063, ([link](#))
- Gilder 2018, Life After Google: The Fall of Big Data and the Rise of the Blockchain Economy, ISBN: 9781621575764, Chapter 8, ([link](#))
- Global Wind Atlas 2022, Wind map, ([link](#))
- Global Solar Atlas 2022, Solar map, ([link](#))
- GSU 2021, Georgia State University, on heat pumps, Dec 2021, ([link](#))
- Greenberg, Andy 2019, Sandworm – a new era of cyberwar and the hunt for the Kremlin's most dangerous hackers, Nov 2019, Book ISBN 978-0-385-54440-5, ([link](#))
- H<sub>2</sub>-View 2021, \$9.4bn H<sub>2</sub> Megaproject Set for Namibia, Nov 2021, ([link](#))
- Harvey, Fiona 2021, The Guardian, May 2021, ([link](#))
- Haverd et al. 2019, Higher than Expected CO<sub>2</sub> Fertilization Inferred from Leaf to Global Observations, Global Change Biology 26, no. 4, (Nov. 2019): 2390–2402. ([link](#))
- HC Group 2021, Hydrogen: Hope, Hype and Thermodynamics with Paul Martin, Oct 2021, ([link](#))
- Idso, Craig 2021, extensive list of peer-reviewed academic papers confirming CO<sub>2</sub> fertilization, CO<sub>2</sub> Science ([link](#) & [link](#))
- IEA 2019a, Is Exponential Growth of Solar PV the Obvious Conclusion? by Brent Wanner, Feb 2019, ([link](#))
- IEA 2019b, Installed power generation capacity in the Stated Policies Scenario, Nov 2019, ([link](#))
- IEA 2019c, Statistics Questionnaire FAQ, Nov 2019, ([link](#))
- IEA 2020a, World Energy Investments 2020, ([link](#))
- IEA 2020b, World Energy Outlook 2020, ([link](#))
- IEA 2020c, Projected Costs of Generating Electricity 2020, Dec 2020, ([link](#))
- IEA 2020d, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, May 2021, ([link](#))
- IEA 2021a, Key World Energy Statistics, Sep 2021, ([link](#))
- IEA 2021b, World Energy Investments 2021, ([link](#))
- IEA 2021c, Electricity Market Report, Jul 2021, ([link](#))
- IEA 2021d, World Energy Outlook 2021, ([link](#))
- IEA 2021e, Net Zero by 2050 – Analysis, May 2021, ([link](#))
- IEA 2022a, Energy transitions require innovation in power system planning, Jan 2022, ([link](#))
- IEA 2022b, Electricity market report, Jan 2022, ([link](#))
- IEEJ 2020, Institute of Energy Economics Japan, IEEJ Energy Outlook 2020, Jan 2020, ([link](#))
- IEEJ 2021, Institute of Energy Economics Japan, IEEJ Energy Outlook 2021, Oct 2020, ([link](#))
- IMF 2021, A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies, Sep 2021, ([link](#))
- IRENA 2020, Energy Subsidies - Evolution in the Global Energy Transformation to 2050, ([link](#))
- IRENA 2021, World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, Jun 2021, ([link](#))
- Kahn et al 2021, Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change Energy Economics 104, ([link](#))
- Kemfert, Claudia 2021, Translated from Prof. Kemfert in RND, Wasserstoff ist nicht das neue Öl, Sep 2021, ([link](#))
- Kiefer, Capt. Ike 2013, Twenty-First Century Snake Oil, Feb 2013, ([link](#)), see p6 section 3.3 on hydrogen and p15 section 5 on eROI
- Kis et al. 2018, Electricity Generation Technologies: Comparison of Materials Use, Energy Return on Investment, Jobs Creation and CO<sub>2</sub> Emissions Reduction, Energy Policy 120, ([link](#))
- Kober et al. 2020, Global energy perspectives to 2060 – WEC's World Energy Scenarios 2019, Energy Strategy Reviews 31: 100523, ([link](#))
- Lomborg, Bjorn 2020, Welfare in the 21st century, Technological Forecasting & Social Change 156 (2020) 119981, ([link](#))
- Lu et al. 2020, Impacts of Large-Scale Sahara Solar Farms on Global Climate and Vegetation Cover, Geophysical Research Letters 48, e2020GL090789, ([link](#))
- Manheimer, Wallace 2022, Civilization Needs Sustainable Energy – Fusion Breeding May Be Best, Journal of Sustainable Development 15, no. 2: p98, ([link](#))
- Mearns, E. 2016, EROI for Beginners, Energy Matters (blog), ([link](#))
- Miller, L. and Keith, D. 2018, Climatic Impacts of Wind Power, Joule 2, ([link](#))
- McKinsey 2018, Automation and the Workforce of the Future, May 2018, ([link](#))
- McKinsey 2021, Global Energy Perspectives 2021, ([link](#)), and 2019, ([link](#))
- McKinsey 2022, The Net-Zero Transition: Its Cost and Benefits, Jan 2022, ([link](#))
- Morris et al. 2019, A manganese hydride molecular sieve for practical hydrogen storage under ambient conditions, Energy & Environmental Science, Issue 5, 2019, ([link](#))
- Murphy, Laura and Nyrola Elima 2021, In Broad Daylight - Uyghur Forced Labour in the Solar Supply Chain, Sheffield Hallam University, May 2021, ([link](#))
- NASA 2019, NASA Earth Observatory 2019, Online 2021, ([link](#))
- NDR3 2020, Nord Deutscher Rundfunk - Extra 3, Ein Gaskraftwerk in Frührente, Mar 2019, ([link](#) and [youtube](#))
- Nordhaus, Ted 2018, Projections and Uncertainties about Climate Change, American Economic Journal, Vol. 10, No. 3, ([link](#))
- NU 2020, Northwestern University, Gas storage method could help next-generation clean energy vehicles, ([link](#))
- OECD NEA (2018), The Full Costs of Electricity Provision, OECD Publishing, Paris, ([link](#))
- OurWorldInData 2020, Energy Mix, Nov 2020, ([link](#))
- OurWorldInData 2021, World Population Growth, Our World in Data based on HYDE, UN, and UN Population Division (2019 Revision), ([link](#))
- Pielke, R. and Richie, J. 2021, Distorting the View of Our Climate Future, Energy Res. & Social Sc. 72: 101890, ([link](#))
- PV-Mag 2022, World Has Installed 1TW of Solar Capacity, pv magazine International, March 2022. ([link](#))
- Polimeni et al. 2015, Book, The Myth of Resource Efficiency: The Jevons Paradox, ISBN 978-1-138-42297-1, ([link](#))
- REN21 2021, Renewables Global Status Report, ([link](#))
- Ruhnau, O. and Qvist, S. 2021, Storage Requirements in 100% Ren. Elec. System: Extreme Events and Inter-Annual Variability, Working Paper, ZBW - Leibniz Info. Centre for Econ., ([link](#))
- Schemikau, L. and Smith, W. 2021, Solar in Spain to Power Germany, SSRN Electronic Journal, Apr 2021, ([link](#))
- Schemikau, L. and Smith, W. 2022, Climate impacts of fossil fuels in today's electricity systems, SAIMM Vol. 122, No. 3, Mar 2022, (SSRN [link](#) and [YouTube](#))
- Smil, Vaclav 2016, Energy Transitions: Global and National Perspectives, ([link](#))
- Smil, Vaclav 2017, Energy and Civilization: A History, ISBN 0262035774, ([link](#))
- Smith, W. and Schemikau, L. 2022, An introduction to wind and wind turbines, unpublished draft paper, SSRN Electronic Journal, Apr 2022, ([link](#))
- S&P 2021, S&P Platts, Coal Trader International, 29 Dec 2021
- Soon et al. 2015, Re-evaluating the role of solar variability on Northern Hemisphere temperature trends, Earth-Science Reviews 150, 409–52, ([link](#))
- Supekar, S. and Skerlos, S. 2015, Reassessing the Efficiency Penalty from Carbon Capture in Coal-Fired Power Plants, Environmental Science & Technology 49, ([link](#))
- Toke 2021, Options for energy storage, 100% Renewable UK, Oct 2021, ([link](#))
- Tromosljika et al. 2021, Advanced Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plant with Post-Combustion Carbon Capture, Sustainability 12(2), 801, ([link](#))
- UN-COP26 2021, UN Climate Change Conference (COP26), Glasgow 2021, Global Coal to Clean Power Transition Statement, Nov 2021, ([link](#))
- University of Texas 2018, Full Cost of Electricity, Energy Institute, The University of Texas at Austin, April 2018, ([link](#))
- Voosen 2021, IPCC Confronts Implausibly Hot Forecasts of Future Warming, Science, AAAS, Jul 2021, ([link](#))
- WEF 2019, World Economic Forum 2019, video on vegetation cover, ([link](#))
- WEF 2020, World Economic Forum, Charts on global energy supply, Sep 2020, ([link](#))
- Weissbach et al. 2013, Energy intensities, EROIs, and energy payback, Energy 52, p210-221, ([link](#))
- Wijngaarden, W. A. and Happer, W. 2020, Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant GHGs, arXiv:2006.03098 [physics], ([link](#)).
- Willuhn, Marian 2022, pv-magazine, Satellite Cyber Attack Paralyzes 11GW of German Wind Turbines, ([link](#))
- WMO 2021, World Meteorological Organization, Greenhouse gases, ([link](#))
- Wolf, Bodo 2021, Der Beitrag der Menschen zur Erwärmung der Biosphäre sind nicht Kohlendioxid- sondern Wärmeemissionen, Dec 2021
- Wood Mackenzie 2022, No Pain, No Gain – the Economic Consequences of Accelerating the Energy Transition, Jan 2022, ([link](#))
- Zalk, J. and Behrens, P. 2018, The Spatial Extent of Renewable and Non-Renewable Power Generation, Energy Policy 123, ([link](#))
- Zhu et al. 2016, Greening of the Earth and Its Drivers, Nature Climate Change 6, no. 8 (August 2016): 791–95, ([link](#))

# Strom-Vollkosten 'FCOE' und Energierenditen 'eROI'



## Zusammenfassung

Das Verständnis der tatsächlichen Kosten der Elektrizitätserzeugung ist für die Festlegung und Priorisierung unserer künftigen Energiesysteme von entscheidender Bedeutung. Diese Arbeit führt den Begriff der Strom-Vollkosten (full cost of electricity, FCOE) ein und untersucht Energierenditen (eROI). Am Ende der Ausführungen leiten die Autoren Vorschläge für die Energiepolitik unter Berücksichtigung der neuen Herausforderungen ab, die sich aus den globalen Anstrengungen zur "Dekarbonisierung" ergeben.

Die Debatte über die Sicherheit der Energieversorgung (oder vielmehr der Elektrizitätsversorgung) begann im Jahr 2021, angetrieben durch einen Anstieg der Elektrizitätsnachfrage, eine Verknappung des Angebots an Energierohstoffen, eine unzureichende Elektrizitätserzeugung durch Wind- und Solaranlagen und geopolitische Herausforderungen, was in den großen Volkswirtschaften zu steigenden Preisen und konjunkturellen Schwankungen führte. Diese Trends waren global zu beobachten, wie beispielsweise in China, Indien und den USA, aber vor allem in Europa. Eine zuverlässige Elektrizitätsversorgung ist von entscheidender Bedeutung für soziale und wirtschaftliche Stabilität und Wirtschaftswachstum, die wiederum zur Beseitigung der Armut notwendig sind.

Wir erläutern und bestimmen den Unterschied zwischen installierter Energiekapazität und tatsächlicher Elektrizitätserzeugung im Zusammenhang mit den variablen erneuerbaren Energien. Das größte Problem der Wind- und Solarenergie sind ihre Intermittenz, oder Unstetigkeit, und ihre geringe Energiedichte, infolgedessen praktisch alle Windkraftanlagen und Solarmodule entweder ein Backup oder einen Speicher benötigen, was die Kosten des Systems erhöht.

Für einen Vergleich von intermittierenden mit regelbaren Formen der Energieerzeugung und für Entscheidungen auf nationaler oder gesellschaftlicher Ebene sind die variablen Elektrizitätsgestehungskosten (levelized cost of electricity, LCOE) ein ungeeigneter Indikator. Wir führen die Strom-Vollkosten (full cost of electricity, FCOE) bzw. die Vollkosten für die Gesellschaft ein und beschreiben die Methodik zu ihrer Ermittlung. Die FCOE erklären, warum Wind- und Solarenergie nicht billiger als konventionelle Brennstoffe sind und mit zunehmendem Anteil am Energiesystem sogar teurer werden. Die IEA bestätigt, dass "...der Systemwert von variablen erneuerbaren Energien wie Wind und Solar mit zunehmendem Anteil an der Elektrizitätsversorgung abnimmt". Dies zeigt sich an den hohen Kosten der "grünen" Energiewende.

Wir schließen mit Vorschlägen für eine Neuaufrichtung der Energiepolitik. Die Energiepolitik und Investoren sollten weder Wind, Solar, Biomasse, Erdwärme, Wasserkraft, Kernkraft, Gas noch Kohle bevorzugen, sondern alle Energiesysteme unterstützen, damit Energieknappheit und Energiearmut vermieden werden. Jede Art von Energie erfordert immer den Verbrauch und die Verarbeitung von Ressourcen, was negative Auswirkungen auf die Umwelt hat. Die Welt muss das Ziel haben, diese negativen Auswirkungen durch Investitionen und nicht durch Desinvestitionen sinnvoll zu minimieren, indem die Energie- und Materialeffizienz erhöht und nicht verringert wird.

Daher regen die Autoren an, dass sich die energiepolitischen Entscheidungsträger wieder auf die folgenden drei Ziele: Energiesicherheit, Bezahlbarkeit der Energie und Umweltschutz konzentrieren. Daraus ergeben sich zwei Wege für eine zukunftsfähige Energieversorgung:

- (1) Investitionen in Bildung und Grundlagenforschung, um den Weg zu einer **Neuen Energie-revolution** zu ebnen, bei der sich die Energiesysteme nachhaltig von fossilen Brennstoffen lösen können.
- (2) Parallel dazu muss die Energiepolitik **Investitionen in konventionelle Energiesysteme** unterstützen, um deren Effizienz zu verbessern und die Umweltbelastung aus der Erzeugung der benötigten Energie zu verringern.

Um den eROI, die tatsächlichen Energiekosten, den Materialeinsatz und die Auswirkungen der derzeitigen Energiewendepfade auf die globale Energiesicherheit besser zu verstehen, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

### Über die Autoren:

Dr. Lars Schernikau ist Energieökonom, Unternehmer und Rohstoffhändler; Zürich, Schweiz.

Prof. William Hayden Smith ist Professor für Geowissenschaften und Planetologie am McDonnell Center for Space Sciences der Washington University, St. Louis, MO, USA.

Prof. Emeritus Rosemary Falcon ist eine kürzlich in den Ruhestand getretene DSI-NRF SARChI-Professorin der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität von Witwatersrand, Johannesburg, Südafrika.

**Online verfügbar bei SSRN. Ein kurzes Video zur Erläuterung der wichtigsten Konzepte dieser Arbeit ist unter YouTube verfügbar.**

Übersetzt, nachgedruckt und angepasst aus Schernikau et al. 2022 "Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'". Journal of Management and Sustainability Vol. 12, Nr. 1, Ausgabe Juni 2022 des **Canadian Center of Science and Education**.

**Bestätigung:** Die Autoren erklären, dass sie für diese Arbeit keine finanzielle oder sonstige Unterstützung von einem Unternehmen bzw. einer Organisation erhalten haben.

### Ausgewählte Abkürzungen

|      |  |
|------|--|
| CCUS | – Abscheidung und Verwendung von Kohlendioxid              |
| eROI | – Rendite auf die eingesetzte Energie                      |
| HELE | – Hoher Wirkungsgrad, niedrige Emissionen                  |
| IEA  | – Internationale Energieagentur in Paris                   |
| FCOE | – Strom-Vollkosten   |
| LCOE | – Elektrizitätsgestehungskosten                            |
| MIPS | – Material-Input pro Serviceeinheit                        |
| PES  | – Primärenergieversorgung<br>bzw. PE für Primärenergie     |
| PV   | – Photovoltaik   |
| USC  | – Ultrakritische Leistung                                  |
| VEE  | – Variable erneuerbare Energie,<br>wie z.B. Wind und Solar |
| ~    | – Ungefähr   |

Zum Herunterladen  
dieses Dokuments



YouTube-Video  
"The Future of Energy"





# Einleitung:

- **Arbeit** oder **Energie** (in Wattstunden oder Wh) gegenüber **Leistung** (in Watt oder W)
  - Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Leistung ist Energie pro Zeiteinheit. Energie ist also das, was eine Veränderung bewirkt und kann von einem Objekt auf ein anderes übertragen werden. Energie kann auch von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Leistung ist die Geschwindigkeit, mit der Energie übertragen wird.
  - Wenn man die Energiespeicherkapazität (z.B. MWh) und die Ausgangsleistung (z.B. MW) einer Batterie kennt, kann man durch die Division beider Werte errechnen, wie lange die Batterie halten wird.
  - In einer Tesla-Batterie wird Energie gespeichert (z.B. 100 kWh). Was das Auto antreibt ist die "Pferdestärke", zum Beispiel 150 kW. Die mit Energie (kWh) geladene Batterie entlädt sich im Laufe der Zeit, je nachdem wie viel Leistung (kW) für die Fortbewegung des Autos erforderlich ist, was von der Fahrweise und den Umgebungsbedingungen abhängt.
- Der, hier natürliche, **Nutzungsgrad (CF)** ist der üblicherweise auf Jahresbasis angegebene prozentuale Anteil der Leistung, die aus der installierten Kapazität an einem bestimmten Standort generiert wird und durch Umweltfaktoren wie Wind und Sonne limitiert ist.
  - Der Nutzungsgrad ist nicht gleich dem Wirkungsgrad. Zum Vergleich: Der Wirkungsgrad misst den Prozentsatz der eingesetzten Energie, der in nutzbare bzw. Ausgangsenergie umgewandelt wird. Der natürliche Nutzungsgrad entspricht auch nicht der Ausnutzung, der z.B. durch technischen Ausfall oder eingeschränkte Nachfrage beeinflusst wird.
  - In Deutschland erreicht die Photovoltaik ("PV") im Durchschnitt einen jährlichen natürlichen Nutzungsgrad von ~10-11%, während in Kalifornien durchschnittliche Jahreswerte von 25% erreicht werden (Schernikau und Smith 2021). Entsprechend erzielen PV-Anlagen in Kalifornien die 2,5-fache Leistung identischer Anlagen in Deutschland.
  - Dabei ist es wichtig zwischen dem durchschnittlichen jährlichen Nutzungsgrad und den monatlichen bzw. wöchentlichen und täglichen Nutzungsgraden zu unterscheiden. Dies ist entscheidend für die Stabilität eines Elektrizitätssystems, in dem die Nachfrage immer dem Angebot entsprechen muss, damit die elektrische Frequenz stabil bleibt.
- **Energieerhaltung – der 1. Hauptsatz der Thermodynamik** besagt im Wesentlichen, dass Energie weder aus dem Nichts entstehen noch ins Nichts verloren gehen kann, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden kann. Zu den verschiedenen Formen von Energie gehören thermische, mechanische, elektrische, chemische, nukleare und Strahlungsenergie.
- **Entropie der Energie – der 2. Hauptsatz der Thermodynamik** unterscheidet im Wesentlichen zwischen nutzbarer Energie (geringe Entropie), die Arbeit verrichten kann, und weniger nutzbarer Energie (hohe Entropie), die nicht ohne weiteres zur Verrichtung von Arbeit genutzt werden kann.
  - Entropie ist ein Maß für Zufälligkeit, Unordnung oder Diffusion in einem Energiesystem, wobei größere Unordnung = größere Entropie bedeutet.
  - Wenn Energie von einer Form in eine andere umgewandelt wird, wird immer ein Teil der nutzbaren Energie nutzlos (Entropie/Unordnung nimmt zu).
  - Planck sagte mit anderen Worten: "Jeder in der Natur stattfindende Prozess verläuft in dem Sinne, dass die Summe der Entropien aller am Prozess beteiligten Körper vergrößert wird, im Grenzfall – bei reversiblen Prozessen – bleibt die Summe unverändert."
  - Das 2. Hauptsatz der Thermodynamik erklärt also, warum ein Perpetuum Mobile unmöglich ist.
  - Demzufolge gilt: Je komplexer die Energieprozesse sind, desto mehr nutzbare Energie geht verloren.

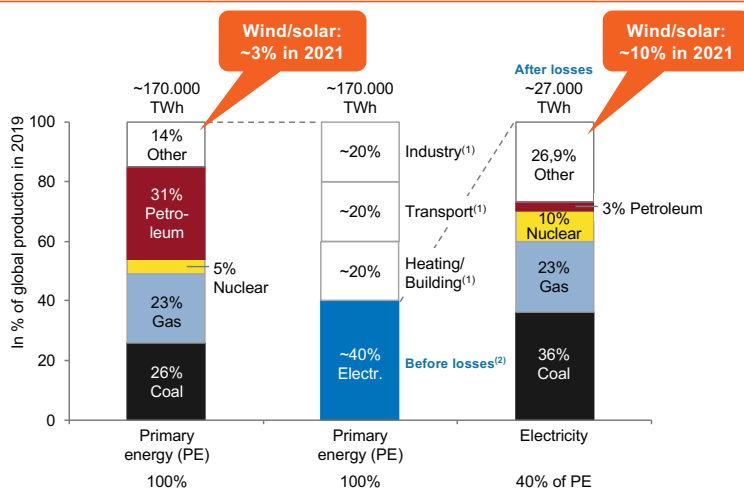
## 1. Einleitung (die derzeitigen globalen Elektrizitätssysteme)

Im Jahr 2019 entfiel auf die fossilen Brennstoffe – in der Reihenfolge ihrer Bedeutung – **Öl, Kohle und Gas ~80% der globalen Primärenergieerzeugung (PE – Primärenergie)** und damit insgesamt ~170.000 TWh bzw. ~600 EJ. Trotz der Covid-19-Pandemie und des erheblichen Zubaus von Wind- und Solarkapazitäten hat sich dieser Anteil in 2021 nicht wesentlich verändert. Im Gegenteil: Kohle hat sogar ein Comeback erlebt (IEA 2022a). Auf Kohle und Gas entfielen 2021 ~60% der globalen Bruttoelektrizitätserzeugung von insgesamt ~28.400 TWh. Auf die weltweite Elektrizitätserzeugung entfällt ~40% der Primärenergie (PE), während sich die restlichen ~60% auf Verkehr, Heizung und Industrie verteilen (Abbildung 1).

**Die derzeitige Energiepolitik konzentriert sich auf die Elektrifizierung der Energie, wodurch der Anteil der Elektrizität an der Primärenergie deutlich steigt**, z.B. durch den verstärkten Einsatz von Elektrizität im Verkehr (siehe Elektrofahrzeuge), bei Heizungen (siehe Wärmepumpen) und in der Industrie (siehe DRI, Stahlerzeugung auf Basis von Wasserstoff). Daher konzentriert sich dieser Artikel auf die Elektrizität. Für eine umfassendere Diskussion über den Verkehr empfehlen die Autoren die Arbeit von Kiefer 2013 "Twenty-First Century Snake Oil", die sich mit dem Thema von Kohlenwasserstoffen und Biokraftstoffen für den Verkehr beschäftigt, die hier nicht näher behandelt werden.

Trotz der Billionen von US-Dollar, die weltweit für die "Energiewende" investiert wurden, blieb der Anteil der fossilen Brennstoffe an der Gesamtenergieversorgung seit den 1970er Jahren, als der Energieverbrauch weniger als halb so hoch war wie heute, weitgehend konstant bei rund 80% (WEF 2020). Auch in Europa liegt der Anteil der fossilen Energieträger immer noch bei über 70%. Unter anderem Kober et al. 2020 kommen zu dem Ergebnis, dass sich der gesamte Primärenergieverbrauch in den 40 Jahren von 1978 und 2018 mehr als verdoppelt hat. Gleichzeitig hat sich die Energieintensität des BIP um etwas weniger als 1% verbessert, was das Jevon'sche Paradoxon bestätigt, dass Verbesserungen der Energieeffizienz immer durch eine höhere Energienachfrage kompensiert werden (Polimeni et al. 2015).

Der Anteil der variablen "erneuerbaren" Energien, VEE, in Form von Wind- und Solarenergie – wengleich nicht Gegenstand dieser Arbeit – an der globalen Primärenergie lag im Jahr 2019 bei ~3% und an der globalen Bruttoelektrizitätserzeugung bei ~8%. Diese Anteile blieben in den Jahren 2020 und 2021 weitgehend unverändert (siehe Schernikau und Smith 2021 für weitere Einzelheiten zu Solar-PV und Smith und Schernikau 2022 zu Windenergie). Andere Formen der Energieversorgung, die üblicherweise zu den "erneuerbaren Energien" gezählt werden – wie Biomasse, Wasserkraft, Geothermie oder Gezeitenkraft – werden nicht weiter ausgeführt, da sie nicht als variabel gelten und eine andere Qualität haben. Zum Vergleich: Kohle und Gas machten zusammen ~50% der weltweiten Primärenergie und ~60% der



**Abbildung 1: Überblick über die globale Primärenergie und Elektrizität**  
 (1) Nur der Anteil von Industrie/Verkehr/Gebäuden, der nicht in Elektrizität enthalten ist. (2) Angenommener weltweiter Netto-Wirkungsgrad von ca. 33% für Kernenergie, 37% für Kohle, 42% für Gas, angenommener durchschnittlicher Wirkungsgrad von ~40% => 27.000 TWh werden zu 68.000 TWh oder 40% von 170.000 TWh.  
 Quellen: Schernikau Research und Analyse basierend auf BP 2021/22, IEA 2021a



weltweiten Bruttoelektrizitätserzeugung aus. Gemessen am "Fossil to Wind-Solar Factor" übertrifft der Anteil fossiler Brennstoffe den von Wind- und Solarenergie um den Faktor 27 an der Primärenergie und um den Faktor 8 an der Elektrizitätserzeugung (IEA 2021a).

Deutschland ist die auf dem Weg zur „De-karbonisierung“ am weitesten fortgeschrittene Industrienation und hat seit dem Jahr 2000<sup>1</sup> ~400 Mrd. EUR in die „Energiewende“ investiert, um den Anteil der Kernenergie und fossiler Brennstoffe zu reduzieren (BfWE 2020). Kernenergie ist die energieeffizienteste (siehe Abschnitt 2 bzgl. eROI) und schadstoffärmste Form der Elektrizitätserzeugung, jedoch mit anderen Herausforderungen konfrontiert. Da Europa den Einsatz fossiler Brennstoffe reduziert hat, ist seine Abhängigkeit von Energierohstoffimporten, vor allem aus Russland, in den letzten zwei Jahrzehnten erheblich gestiegen.

Mit den in die „Energiewende“ investierten Geldern hat Deutschland – bis 2021 – einen Wind-/Solaranteil an der Bruttoelektrizitätserzeugung von ~28% erreicht. Der Anteil von Wind und Solar an der Primärenergie<sup>2</sup> lag dagegen nur bei 5%. Um die „Energiewende“ erfolgreich umzusetzen, müsste sich die installierte Kraftwerksleistung in Deutschland verdoppeln (Abbildung 2). Dementsprechend hinken die erneuerbaren Energien im Vergleich zu den Investitionen in realen Energieeinheiten deutlich hinterher und die Strompreise in Deutschland sind die höchsten innerhalb der G20. Diese Underperformance resultiert aus dem geringen Nutzungsgrad, der niedrigen Energieeffizienz und anderen in diesem Artikel beschriebenen inhärenten Defiziten variabler erneuerbarer Energien (Abbildung 3), und nicht auf eine schlechte Umsetzung oder böse Absichten.

**Im 20-Jahreszeitraum von 2002 bis 2021 hat sich die installierte Kraftwerksleistung in Deutschland von 115 GW auf 222 GW fast verdoppelt, während der Gesamtelektrizitätsverbrauch weitgehend stagnierte und der Primärenergieverbrauch um über 15%<sup>2</sup> zurückging** (Abbildung 2). Aufgrund der Elektrifizierung des Verkehrs, des Heizens und der industriellen Prozesse und der damit steigenden Nachfrage von Verbrauchern und Industrie im Rahmen der „Energiewende“ erwartet Deutschland in den nächsten Jahrzehnten einen erheblichen Anstieg des Elektrizitätsverbrauchs.

Im globalen Durchschnitt sieht es etwas besser aus. Von der gesamten weltweit installierten Kraftwerksleistung von ~8.000 GW bzw. 8 TW im Jahr 2020 (Abbildung 10) entfielen etwa 18% bzw. ~1.400 GW auf Wind- und Solarenergie, die ~8% zur globalen Elektrizität und ~3% zur Primärenergie<sup>2</sup> beitragen (BP 2021, IEA 2019b, IEA 2021a). Nach dem Zubau von fast 200 GW Solar-PV im Jahr 2021 erreichte die weltweit installierte Solarkapazität im März 2022 erstmals den Wert von 1 TW (PV-Mag 2022).

Abbildung 2 veranschaulicht die erhebliche Diskrepanz zwischen installierter Kapazität und erzeugter Elektrizität. Aufgrund der geringen durchschnittlichen natürlichen Nutzungsgrade von Wind- und Solarener-

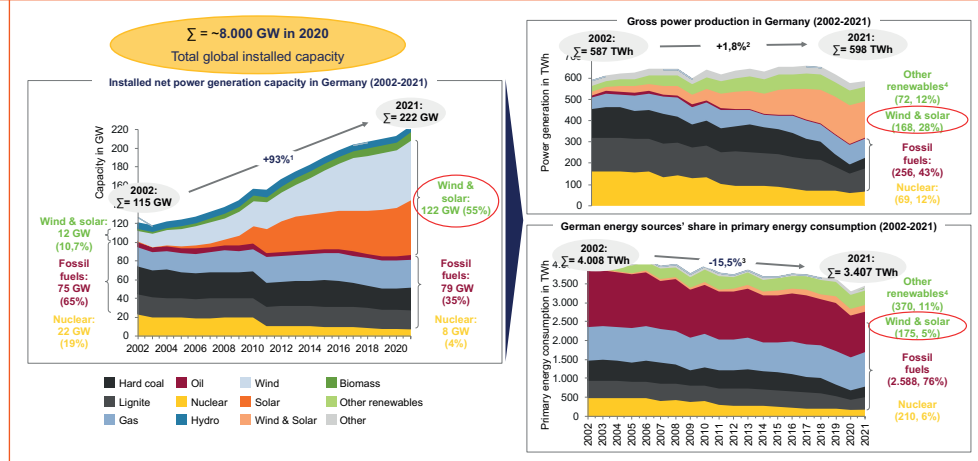


Abbildung 2: Installierte Kraftwerksleistung, Elektrizitätserzeugung und Primärenergie in Deutschland  
Anmerkungen: (1) CAGR: +3.5%; (2) CAGR: +0.1%; (3) CAGR: +0.9%; (4) Einschließlich Wasserkraft und Biomasse.  
Quelle: Schemikau Research und Analyse basierend auf Fraunhofer 2022, AGE 2021, Agora 2022, siehe Fußnote<sup>2</sup>

gie führt eine Verdopplung der installierten Kapazität in Ländern wie Deutschland nur zu einem Anstieg der Elektrizitätsversorgung von weniger als einem Drittel und der Primärenergie von weniger als 10%. Die Gründe für diese Diskrepanz sind vielfältig und haben vielerlei Auswirkungen. Abbildung 3 fasst die Unzulänglichkeiten variabler erneuerbarer Energien (VEE) für die Elektrizitätserzeugung in Form von Wind- und Solarenergie zusammen und erklärt die Gründe für die offensichtliche Diskrepanz. Diese Unzulänglichkeiten von VEE können nur zum Teil durch technologische Verbesserungen verringert werden.

Trotz der immensen Kraft der Sonne ist die Energie, die man pro m<sup>2</sup> aus natürlichen Wind- und Solarressourcen gewinnen kann, begrenzt und zu gering für eine effiziente Elektrizitätserzeugung im Netzmaßstab (geringe Energiedichte). Zusätzliche negative Auswirkungen von Wind und Solar auf die Vegetation, das lokale oder regionale Klima, die Tierwelt, die Seewege, die Flugrouten und die Populationen von Vögeln, Fledermäusen und sogar Insekten müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Diese Auswirkungen sind vor allem das Ergebnis der benötigten großen Landfläche (Smith und Schemikau 2022).

Technologische Fortschritte werden die Netzwirkungsgrade von Wind- und Solaranlagen weiter etwas erhöhen, aber physikalische Grenzen, wie sie durch das Betz-Gesetz und die Schockler-Queisser-Grenze beschrieben

werden, schließen die Möglichkeit einer Verzehnfachung aus. Es gibt keine Aussicht auf einen Paradigmenwechsel in der Energieversorgung durch PV oder Wind, wie er für das Quantencomputing versprochen wird. **Man kann Energie nicht mit Computern vergleichen, da sie anderen Gesetzmäßigkeiten folgt (Abbildung 7).**

Die Schockler-Queisser-Grenze für den Quantenwirkungsgrad von Silizium von 33% kann mit mehrschichtigen PV-Modulen übertroffen werden, die bisher aber instabil und weniger haltbar sind als Silizium-Module. Schon heute übertreffen sie den Quantenwirkungsgrad von monokristallinem Silizium um etwa 50%, aber eine Betriebsdauer von 20 Jahren ist für Mehrschicht-PV-Anlagen nicht in Reichweite. Technologische Verbesserungen und neue Materialien wie Perowskit und Quantenpunkte können die Stabilitäts- und Haltbarkeitsprobleme mit der Zeit überwinden, aber ein Quantenwirkungsgrad von 100% ist das absolute physikalische Maximum, das nie erreicht werden wird.

**Technologische Verbesserungen können die Quantenwirkungsgrade der PV möglicherweise um den Faktor 2 verbessern, aber nicht um das erforderliche Vielfache, um mit der konventionellen Energieerzeugung zu konkurrieren und die erforderliche eROI-Hürde im Netzmaßstab zu übertreffen.** Es sei zudem erwähnt, dass auch bei konventioneller Energieerzeugung die Effizienz im Zeitverlauf zunimmt.



Abbildung 3: Zusammenfassung der Unzulänglichkeiten der variablen erneuerbaren Energien bei der Elektrizitätserzeugung  
Quelle: Schemikau Research und Analyse

<sup>1</sup> Anmerkung: Die Zahlen beinhalten nur die "EEG-Gesamtvergütung", aber keine anderen Investitionen, Forschung, Subventionen usw.

<sup>2</sup> Der Rückgang des Primärenergieverbrauches in Deutschland ist u.a. auf die Annahme eines Wirkungsgrads von 100% von Wind- und Solarenergie bei der Berechnung des Anteils an der PE zurückzuführen. Es wird also fälschlicherweise angenommen, dass die aus Wind und Solar erzeugte Elektrizität mit einem Wirkungsgrad von nahezu 100% ohne Verluste und Energiekosten in nutzbarer Elektrizität umgewandelt wird. Würde man von einem realistischen niedrigeren Netzwirkungsgrad ausgehen, würde der Anteil von Wind- und Solar an der Primärenergie ansteigen und die für Deutschland angegebene Gesamtprimärenergie würde sinken.

## 2. Literaturübersicht, Methodik und Ergebnisse (Elektrizitätskosten und eROI)

In den letzten drei Jahren hat Lars Schernikau mehr als 70 Gespräche in Europa, Afrika, Asien und Nordamerika geführt. Die Gesprächspartner waren verschiedene Ministerien, wirtschaftliche Regierungsorganisationen, Universitäten und Industrieunternehmen. Übergreifend war das mangelnde Verständnis der tatsächlichen Strom-Vollkosten und der anhaltende falsche Gebrauch des Grenzkostenmaßes LCOE, um die Kosten von VEE mit konventionellen Energiequellen zu vergleichen. In allen Gesprächen – vor allem in den Entwicklungsländern – wurde der übergreifende Wunsch geäußert, eine nachhaltige und dennoch wirtschaftlich tragfähige Energiepolitik zu unterstützen, um so schnell wie möglich aus fossilen Brennstoffen auszustiegen. Die mit einem solchen Übergang verbundenen Kosten und Nachteile wurden kaum verstanden oder untersucht.

Lars Schernikau setzte sich mit Energie-Denkfabriken wie der IEA, dem IEEJ und dem ACE (ASEAN Center for Energy) sowie führenden Strategieberatungsfirmen in Verbindung und diskutierte einige der genannten Themen im Detail. Die hier vorliegenden Schlussfolgerungen sind auch das Ergebnis dieses Austauschs. Der inhärente politische Aspekt der Tätigkeit der genannten Organisationen wurde ausgeklammert und stattdessen lag das Augenmerk auf den wirtschaftlichen Auswirkungen des vorgeschlagenen Übergangs zu VEE. Auf die untersuchte Literatur wird bei den einzelnen Elementen dieser Arbeit verwiesen.

Die Elektrizitätskosten sind wichtig für die globale Wettbewerbsfähigkeit eines Landes und ein Schlüsselement für die wirtschaftliche Entwicklung sowie für die energiepolitische Diskussion im Allgemeinen. Elektrizitätssysteme sind komplex, was auch dadurch bedingt ist, dass **ein funktionierendes Elektrizitätssystem nur dann nutzbare Energie liefern kann, wenn zu jedem Zeitpunkt – und somit in jeder Sekunde – die Elektrizitätsnachfrage dem Elektrizitätsangebot entspricht**. Diese besondere Eigenschaft von Elektrizitätssystemen ist ein erheblicher Kostenfaktor. Es muss zwischen Kosten, Wert und Preis unterschieden werden, die nicht dasselbe sind. Im Folgenden gehen wir nur auf die Kosten ein:

- **Kosten** – die für die Produktion erforderlichen Ressourcen und Arbeiten
- **Wert** – der intrinsische Wert oder Nutzen für den Verbraucher für eine bestimmte Anwendung im Vergleich zu seinen Alternativen
- **Preis** – was die Verbraucher oder der Markt zu zahlen bereit sind. Der Preis wird durch Eingriffe der Regierung oder von Unternehmen beeinflusst oder verzerrt, z.B. durch Gesetze, Anordnungen, Subventionen, Geopolitik und vieles mehr.

Das Konzept der tatsächlichen Strom-Vollkosten (FCOE) wird im folgenden Abschnitt

erläutert. Die Elektrizitätskosten wurden von mehreren Regierungsorganisationen und Universitäten eingehend untersucht. Die Strom-Vollkosten, die auch als FCE bezeichnet werden, wurden in einer Reihe von Weißbüchern beschrieben, die von der University of Texas (UT) 2018 veröffentlicht wurden. Die UT konzentriert sich jedoch auf die Übertragung und Verteilung und legt weniger Augenmerk auf Backup, Speicherung und Intermittenz von VEE. Auch die geringere Auslastung von Backup-Systemen wird nicht näher erörtert.

Die OECD (OECD NEA 2018) verweist auf die Strom-Vollkosten, wobei sie zwischen (a) Kosten auf Anlagenebene, (b) Systemkosten auf Netzebene und (c) externen bzw. sozialen Kosten außerhalb des Elektrizitätssystems unterscheidet. Die Begründung der OECD lautet, dass die Vollkosten alle drei Kategorien umfassen müssen – eine Einschätzung, die die Autoren teilen. In der OECD-Studie wird der höheren Volatilität und Komplexität des Systems bei einem steigenden Anteil von VEE mehr Aufmerksamkeit gewidmet, dagegen werden z.B. der Energieaufwand, eROI, und die Kosten für das Recycling nicht berücksichtigt. In der Abhandlung der OECD über Umweltverschmutzung und Treibhausgase werden die Auswirkungen von Emissionen und Nicht-Emissionen über den Lebenszyklus hinweg auf die Energiesysteme ebenfalls nicht berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt auf Verbrennung bzw. Betrieb und CO<sub>2</sub> (OECD NEA 2018, S. 101). Auch die Ressourcen- und Raumbetrachtung wird in der Studie nur am Rande berücksichtigt. Zu den Kosten sind die folgenden Aussagen der OECD wichtig, die mit der Analyse der Autoren übereinstimmen:

- „Wo VEEs die Kosten des Gesamtsystems erhöhen, ..., verursachen sie diese externen Effekte oder sozialen Kosten durch erhöhte Ausgleichskosten, teurere Transport- und Verteilungsnetze und die Notwendigkeit kostspieliger Backup-Systeme, um die Versorgungssicherheit rund um die Uhr zu gewährleisten“ (OECD NEA 2018, S. 39).
- „Aus Sicht der ökonomischen Theorie sollten VEEs für diese Mehrkosten [oben genannten Integrationskosten] besteuert werden, um ihren wirtschaftlich optimalen Einsatz zu gewährleisten.“ (OECD NEA 2018, S. 39).

Es gibt verschiedene andere Kennzahlen<sup>3</sup> für die Elektrizitätskosten wie LCOE, VALCOE, LACE, LCOS, Integrationskosten von VEE, usw. Um ein vollständiges Bild über die Kosten zu erhalten, führen die Autoren die Strom-Vollkosten für die Gesellschaft (FCOE) ein. Die von den Autoren definierten FCOE lassen sich in zehn verschiedene Kategorien einteilen, was ihre Komplexität verdeutlicht, und von denen viele nicht leicht messbar sind (siehe Abbildung 5). Diese zehn Kategorien wurden nach dem Verständnis der Autoren bisher weder von einer energiewirtschaftlichen Institution, Regierung, Universität, Privatunternehmen noch von den Medien in vollem Umfang berücksichtigt. Üblicherweise werden nur eine oder zwei Kategorien diskutiert, und am häufigsten werden fälschlicherweise die marginalen Elektrizitätsgestehungskosten (LCOE) verwendet. Die sozio-ökonomischen und ökologischen Vorteile, die

sich aus dem Verständnis der Methoden zur Ermittlung der Elektrizitätskosten ergeben, sind erheblich und bedürfen weiterer Untersuchungen.

### 2.1. Strom-Vollkosten (FCOE)

Da es sich bei Elektrizität um eine Frage auf gesellschaftlicher Ebene handelt, oder zumindest um eine Frage auf Länderebene, wollen die Autoren die tatsächlichen Strom-Vollkosten (FCOE) definieren. Was wir dabei als die **Strom-Vollkosten (FCOE)** für die Gesellschaft bezeichnen, setzt sich aus zehn Kostenkategorien zusammen:

1. **Baukosten** für die Anlagen zur Elektrizitätserzeugung und -verarbeitung wie Solarzellen, Kraftwerke, Bergwerke, Gasquellen, Raffinerien usw. (oft als Investitionskosten bezeichnet).
2. **Brennstoffkosten** z.B. für Öl, Kohle, Gas, Uran, Biomasse oder Wind (bei dem die Brennstoffkosten gleich Null sind). Dazu gehören die Verarbeitung, die Aufbereitung und der Transport des Brennstoffs durch Pipelines, auf Schiffen, auf der Schiene oder per Lkw. Dazu gehören auch die Kosten für die Sanierung der Brennstoffquellen, wie z.B. Minen oder Bohrlöcher. Bei den Elektrizitätsgestehungskosten wird oft davon ausgegangen, dass der Preis für CO<sub>2</sub> Teil der Brennstoffkosten ist. Um diese korrekt zu erfassen, definieren wir hierfür eine eigene Kategorie 7. Umweltkosten, in denen die THG enthalten sind.
3. **Betriebskosten** und Kosten der Wartung der Anlagen zur Elektrizitätserzeugung und -verarbeitung.
4. **Kosten der (Elektrizitäts-)Transport-/Ausgleichssysteme** für den Endverbraucher, wie z.B. Übertragungsnetze, Ladestationen, Lastausgleich, intelligente Zähler und andere IT-Technologie.
  - a. Mit der zunehmenden Computerisierung der Netze und Energiesysteme steigt die Bedrohung durch Cyberangriffe und die damit verbundenen Kosten. Siehe BCG Guide to Cyber Security (BCG 2021a) und den auf deutsche Windkraftanlagen abzielenden Cyberangriff auf die Satelliteninfrastruktur im März 2022 (Willuhn 2022). Es wird auch auf den Angriff auf die ukrainische Energieinfrastruktur im Jahr 2017 verwiesen, der in dem hervorragenden Buch „Sandworm – a new era of cyberwar“ (Greenberg 2019) beschrieben wird.
5. **Speicherkosten** (soweit erforderlich) für die mittel- und langfristige Speicherung (abweichend vom Lastausgleich), einschließlich der Kosten für Bau und Betrieb, z.B. von Pumpspeicherwerken, Batterien, Wasserstoff usw. Dabei ist zu beachten, dass Öl, Kohle, Gas, Uran und Biomasse an sich Energiespeicher sind.
  - a. Die Gesamtkosten der Speicherung müssen nur für die Speicherung allein (1) die Baukosten, (3) die Betriebskosten, (7) die Umweltkosten, (8) die Recyclingkosten und (10) andere Kennzahlen wie MIPS, Lebensdauer und eROI umfassen.

<sup>3</sup> LCOE = Levelized Cost of Electricity (Elektrizitätsgestehungskosten); VALCOE = Value-Adjusted Cost of Electricity (wertbereinigte Elektrizitätsgestehungskosten); LACE = Levelized Avoided Cost of Electricity (vermeidene Elektrizitätsgestehungskosten); LCOS = Levelized Cost of Storage (Speicherkosten); VEE = Variable Renewable Energy (variable erneuerbare Energien)

- 6. **Kosten für Backup-Technologie:** Elektrizitätssysteme beinhalten Redundanzen für den Fall, dass ein Kraftwerk oder eine Anlage ausfällt. Alle zuverlässigen Elektrizitätssysteme sind überdimensioniert, in der Regel im Umfang von ~20% des höchsten (Spitzen-) Elektrizitätsbedarfs. Hinzu kommen:
  - a. Jede einzelne VEE-Anlage, wie z.B. Wind- und Solaranlagen, erfordert eine 100% Absicherung, Speicherung oder eine Kombination aus beidem, da sie von Natur aus nicht regelbar oder vorhersehbar ist.
  - b. Oft werden konventionelle Kraftwerke als Backup für VEE genutzt. Je höher der Anteil der erneuerbaren Energien im Elektrizitätssystem ist, desto weniger wird diese Reservekapazität genutzt, was zu einer geringeren Auslastung der Anlagen führt. Damit steigen die Kosten für die Reserveleistung logarithmisch an, wenn der Anteil der VEE im Energiesystem über einen bestimmten Punkt hinaus ansteigt (siehe auch IEEJ 2020, S. 124ff).
  - c. Die Backup-Kapazität kann – wie derzeit der Fall – die Langzeitspeicherung ersetzen, und wird hier als separate Kategorie aufgeführt, da sie eine andere Qualität und andere Kosten hat. Es ist wichtig, Doppelzählungen zu vermeiden.
- 7. **Umweltkosten** umfassen die tatsächlichen Kosten (keine willkürlichen Steuern oder Subventionen) aller durch die Elektrizitätserzeugung verursachten Auswirkungen auf die Umwelt durch Emissionen und Nicht-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dazu gehören u.a. die THG über den gesamten Lebenszyklus vom Bau bis zum Recycling der Anlagen, Feinstaub, SOx, NOx und Klimaeffekte von nicht-THG sowie der Einfluss auf die Tier- und Pflanzenwelt (Schernikau and Smith 2022 and Smith and Schernikau 2022).
  - a. Die Klima- und Erwärmungseffekte von großflächigen Wind- und Solaranlagen sind gut dokumentiert, werden aber von der Branche, politischen Entscheidungsträgern und Investoren weitgehend ignoriert (siehe Barron-Gafford et al. 2016, Miller und Keith 2018, Lu et al. 2020, Schernikau und Smith 2022).
  - b. Der Nutzen von CO<sub>2</sub> aufgrund seiner nachgewiesenen Düngewirkung für die Pflanzenwelt müsste ebenfalls einbezogen werden (Zhu et al. 2016, NASA 2019, WEF 2019). Zu den Kosten der globalen Erwärmung verweisen die Autoren auf Nordhaus 2018, Lomborg 2020 und Kahn 2021.
- 8. **Recyclingkosten**, sowie die Kosten für die Stilllegung oder Sanierung von Anlagen zur Elektrizitätserzeugung (gesondert als Teil von Punkt 6. oben) und Backup nach Ablauf ihrer Lebensdauer. Siehe auch „The Hidden Cost of Solar Energy“, veröffentlicht von INSEAD und Harvard (Atasu et al. 2021).

- 9. **Raumkosten** (auch Flächenbedarf) sind eine neue Kostenkategorie, die für erneuerbare Energien mit geringer Energiedichte wie Wind, Solar oder Biomasse relevant sind. Aufgrund der geringen Energiedichte pro m<sup>2</sup> von Wind, Solar und Biomasse benötigen sie wesentlich mehr Platz als konventionelle Energieerzeugungsanlagen, bei denen die Raumkosten eher vernachlässigbar sind, zumindest im Vergleich zu VEE. Dieser größere Platzbedarf hat negative Auswirkungen und muss berücksichtigt werden.
  - a. Die Raumkosten umfassen direkte Kosten und Opportunitätskosten im Zusammenhang mit dem größeren Raumbedarf und die Auswirkungen auf z.B. Seeverkehrswege, Anbauflächen, Wälder, städtische Gebiete, zunehmende Wasserknappheit in trockenen Gebieten, Lärmbelästigung usw. (eine Doppelerfassung der unter 7. Umweltkosten aufgeführten Kosten muss vermieden werden).
  - b. Ein neues Kohlekraftwerk in Indien würde etwa 2,8 km<sup>2</sup> pro 1 GW installierter Leistung benötigen, zusätzlich der Fläche für den Kohleabbau (Zalk und Behrens 2018, CEA 2020). Ein neuer Solarpark würde etwa 17 km<sup>2</sup> pro 1 GW installierter Leistung benötigen, zusätzlich der Fläche für den Abbau der Ressourcen für den Bau von Solaranlagen. Eine installierte Solarkapazität von 1 GW würde aufgrund des niedrigen Nutzungsgrads der Solarenergie viel weniger Elektrizität erzeugen. Bei einem durchschnittlichen natürlichen Nutzungsgrad für Solar in Spanien von 16,5% ergäbe sich eine entsprechende Fläche von 93 km<sup>2</sup> für den Solarpark, d.h. das 33-fache im Vergleich zum Kohlekraftwerk. Aufgrund der intermittierenden Natur der Solarenergie wird zusätzlicher Platz für Backup und/oder Speicherung benötigt (Schernikau und Smith 2021).
  - c. Die Raumkosten pro installiertem MW VEE nehmen mit zunehmender installierter Leistung zu. Der Grund dafür ist der geringere Nutzungsgrad von Wind in größeren Windparks (siehe Nachlaufeffekt) sowie der geringere

Wert zusätzlicher VEE-Anlagen jenseits eines optimalen Durchdringungsgrads (Smith und Schernikau 2022, NEA 2018, S. 84ff).

- 10. **Andere Kennzahlen:** Drei weitere Elemente der Strom-Vollkosten (FCOE) sind Kennzahlen, die nicht in US-Dollar zu messen sind, die aber für die Umwelteffizienz der Elektrizitätserzeugung wichtig sind. Keine dieser Kennzahlen ist in den LCOE enthalten.
  - a. **Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS):** misst die Material- oder Ressourceneffizienz des Baus von Energieanlagen in Tonnen Rohstoffen pro MW Leistung und pro MWh erzeugter Elektrizität. MIPS für Energieanlagen misst somit ein wichtiges Element der Umweltauswirkungen. Das US-Energieministerium (DOE) und die IEA dokumentieren diesen hohen Materialeinsatz für erneuerbare Technologien und Kapazitäten (siehe Abbildung 4, DOE 2015, IEA 2020d, S. 6).
  - b. **Lebensdauer:** Sie gibt an, wie lange die Anlage genutzt wird, bevor sie abgebaut oder ersetzt wird. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Repowering bzw. zutreffender der frühe Ersatz von Wind- und Solaranlagen die geplante Lebensdauer erheblich verkürzt.
  - c. **Energierendite (eROI):** fasst einen großen Teil aller oben genannten Maßzahlen zusammen. eROI berücksichtigt auch die Energieeffizienz beim Bau, Betrieb und Recycling der Anlagen. Er umfasst die gesamte eingebrachte bzw. enthaltene Energie. Ein eROI von 2:1 bedeutet, dass 1 kWh Input-Energie für je 2 kWh Output-Energie investiert wird. Laut Weissbach et al. 2013 haben Solarenergie und Biomasse in Nordeuropa einen gepufferten eROI von etwa 2-4. Die Kernenergie hat einen eROI von etwa 75, Kohle und Gas von etwa 30 (was die Autoren für zu hoch erachten). Die römische Kultur, die effizienteste vorindustrielle Zivilisation, erreichte einen eROI von 2:1. Über die tatsächlichen eROI-Werte herrscht noch große Unsicherheit.

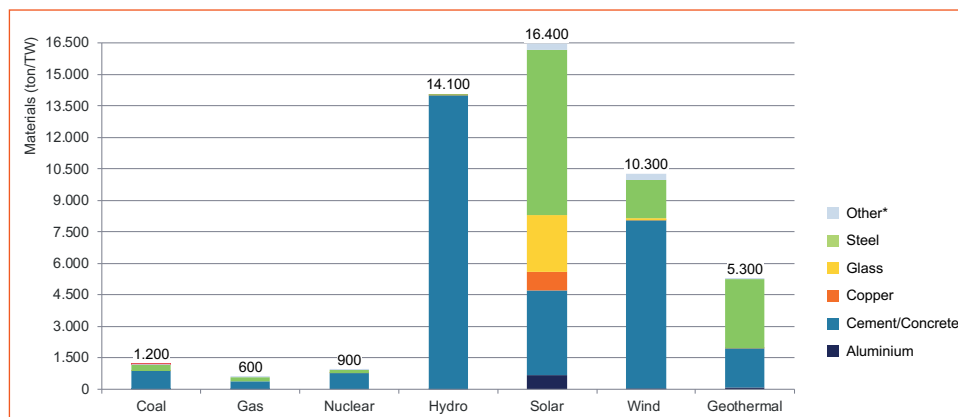


Abbildung 4: Basis-Materialeinsatz pro 1 TW Erzeugung  
 Anmerkung: Sonstige beinhalten Eisen, Blei, Kunststoff und Silizium; Schernikau geht davon aus, dass dies auf dem durchschnittlichen US-Nutzungsgrad basiert.  
 Quelle: angepasst von DOE 2015, Tabelle 10.4, S. 390



Die Autoren betonen an dieser Stelle, dass die **Strom-Vollkosten (FCOE) für die Gesellschaft keine Steuern oder Subventionen** enthalten, die willkürlich festgelegt werden<sup>4</sup>. Regierungen erheben manchmal Steuern oder legen Preise fest in dem Versuch, die tatsächlichen Kosten abzubilden oder Forschung und Entwicklung zu unterstützen. Die FCOE berücksichtigen alle „tatsächlichen Kosten“ und sind daher möglicherweise nicht der richtige Maßstab für Investitionsentscheidungen, bei denen Steuern, Subventionen oder Preise (statt Kosten) für bestimmte Elemente zu berücksichtigen sind.

Mit den FCOE wird versucht, die tatsächlichen Kosten für die Gesellschaft zu bestimmen und damit die relevante Kostenbasis für die Schätzung der globalen Kosten der Energiewende im Vergleich zu den globalen Kosten der anteilig vom Menschen verursachten klimatischen Veränderungen. Daher werden die Subventionen für fossile Brennstoffe nicht als separater Posten<sup>4</sup> aufgeführt. Zudem bleiben Subventionen für Wind- und Solarenergie unberücksichtigt, wie z.B. fehlende CO<sub>2</sub>-Steuern, obwohl die Produktion und das Recycling von Solar- und Windkraftanlagen und Backup-Systemen hohe relative CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh verursachen. CO<sub>2</sub> oder „Kohlenstoff“-Steuern berücksichtigen bisher nur die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Einsatz von Brennstoffen und berücksichtigen nicht die Lebenszyklusemissionen entlang der Wertschöpfungskette wie z.B. von Methan und anderen THG (siehe Schernikau und Smith 2022 zu dem Klimaeffekt fossiler Brennstoffe). Daher sind **CO<sub>2</sub>-Steuern irreführend und falsch und führen zu unerwünschten wirtschaftlichen und ökologischen Verzerrungen, wie z.B. der Umstellung von Kohle auf Gas** aus Klimagründen, und vernachlässigen den scheinbar schädlicheren Klimaeffekt von Methanemissionen aus der Erdgas- und insbesondere LNG-Produktion.

Aus der obigen Analyse (siehe auch Schernikau und Smith 2022) lässt sich der Schluss ziehen, dass die Elektrizitätsgestehungskosten (LCOE) – die nur die Baukosten (1), die Brennstoffkosten (2), die Betriebskosten (3) und teilweise bestimmte CO<sub>2</sub>-Steuern (Teil der Umweltkosten 7) umfassen – weder eine zuverlässige noch eine ökologisch oder wirtschaftlich sinnvolle Kennzahl zur Bewertung verschiedener Formen der Energieerzeugung auf Länder- oder Gesellschaftsebene sind. Nur die FCOE umfassen alle relevanten wirtschaftlichen und ökologischen Kosten aus Emissionen und Nichtemissionen, obwohl ihr tatsächlicher Wert schwieriger – aber nicht unmöglich – zu bestimmen ist.

Renommierte Energie-Denkfabriken wie die Internationale Energieagentur (IEA) in Frankreich, das International Energy Economics Institute (IEE) in Japan, die OECD oder die amerikanische Energy Information Agency (EIA) haben mehrfach auf die Unvollständigkeit der LCOE hingewiesen. Trotz ihrer Unzulänglichkeiten werden die LCOE dennoch weiterhin in großem Maßstab verwendet, in der Regel ohne klare Ausschlussklauseln und Hinweise, selbst von diesen Agenturen, von Regierungen, Banken, Institutionen, NGOs,

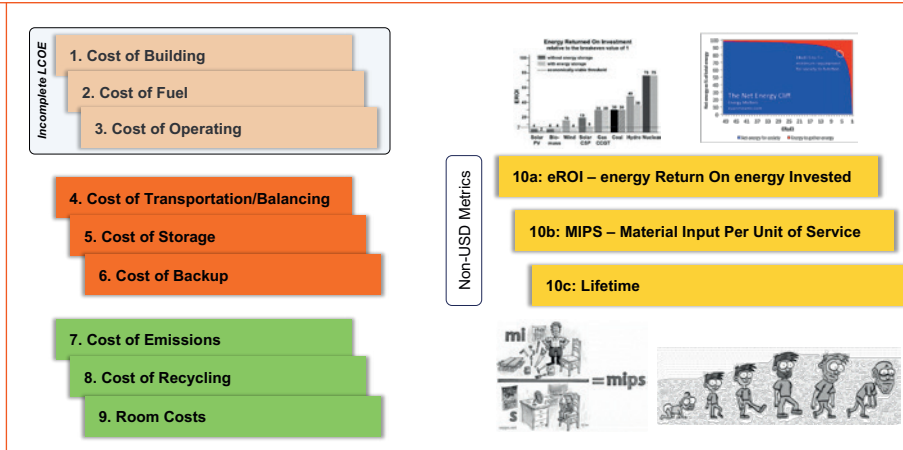


Abbildung 5: Strom-Vollkosten für die Gesellschaft – ein vollständiges Bild  
Anmerkung: Altersskizzen ursprünglich von Alexandra Martin; Energieklippe von eROI for beginners; MIPS-Karikatur von Seppo.net; eROI Weissbach et al. 2013.  
Quelle: Schernikau Research und Analyse

Unternehmen, vielen Wissenschaftlern und der allgemeinen Presse.

Wenn für die Elektrizitätserzeugung eines Landes konventionelle Brennstoffe und VEE (Wind und Solar) kombiniert werden, ergeben sich unerwünschte Effekte. Diese Effekte lassen sich vollständig anhand der FCOE-Kategorien 1-10 erklären. Ab einem bestimmten Punkt, in der Regel bei einem Anteil von 10-20%, steigen die Kosten für das Elektrizitätssystem eines Landes mit einem zunehmenden Anteil an VEE wie Wind und Solar immer weiter an (IEEJ 2020, S. 124ff, IEA 2019a und IEA 2020c, S. 13). Die Gründe dafür sind u.a. die bereits erwähnte unterschiedliche Energiedichte und -effizienz, Intermittenz und damit der Bedarf an Backup-/Speicherkapazitäten, niedrige natürliche Nutzungsgrade, Anbindungskosten, Material- und Energiekosten, niedriger eROI, Effizienzverluste für Backup-Kapazitäten, Raumkosten für den benötigten Platz, die Zerstörung der Tier- und Pflanzenwelt, Recyclingbedarf usw.

- Im Dezember 2020 bestätigte die IEA (IEA 2020c, S. 14): „...der Systemwert variabler erneuerbarer Energien wie Wind und Solar sinkt mit steigendem Anteil an der Elektrizitätserzeugung“. Dies würde auch dann gelten, wenn der Preis für erneuerbare Kapazitäten (Kostenpunkt 1: Baukosten) weiter sinken oder sogar gegen Null gehen würde, z.B. selbst dann, wenn der Preis für Solarmodule, die in China mit Kohlestrom und teilweise unter Einsatz von Zwangsarbeit hergestellt werden, Null erreichen würde (Murphy und Elima 2021). Dies würde auch dann noch gelten, wenn die Wind- oder Solartechnologie einen unmöglichen Wirkungsgrad von 100% erreichen würde.

Die LCOE sind ein ungeeigneter Maßstab, um intermittierende Formen der Energieerzeugung mit regelbaren Formen zu vergleichen und somit auch für das Treffen energiepolitischer Entscheidungen auf nationaler oder gesellschaftlicher Ebene. Die LCOE können jedoch selektiv verwendet werden, um regelbare Erzeugungsmethoden mit ähnlichem Material- und Energieeinsatz, wie z.B. Kohle und Gas, zu vergleichen. Legt man die FCOE bzw. die Vollkosten für die Gesellschaft zugrunde, sind Wind- und Solarenergie nicht billiger als die konventionelle Elektrizitätserzeugung,

sondern werden mit steigendem Anteil am Energiesystem sogar teurer. Dies verdeutlichen die hohen Kosten der so genannten „grünen“ Energiewende, insbesondere für ärmere Länder (McKinsey 2022 und Wood Mackenzie 2022). Wären Wind- und Solarenergie in einer freien Marktwirtschaft wirklich günstiger, bräuchten sie nicht Milliarden Euro an staatlichen Mitteln und Subventionen oder Gesetze, um ihren Bau zu erzwingen.

## 2.2. Energierendite auf investierte Energie – eROI

Die Autoren weisen darauf hin, dass die ökologische Effizienz von Energie ein komplexerer Sachverhalt ist als nur die Betrachtung von Treibhausgasemissionen. Insbesondere die Energierendite auf die investierte Energie (**eROI**), **der Materialeinsatz, die Lebensdauer und die Recyclingeffizienz sind zu berücksichtigen, da sie weitere und sehr wichtige ökologische und wirtschaftliche Elemente bei der Bewertung der Elektrizitätserzeugung bestimmen.**

Der eROI misst die Nettoenergieeffizienz eines Energieerzeugungssystems. Ein höherer eROI bedeutet geringere ökologische und wirtschaftliche Kosten und damit niedrigere Preise und einen höheren Nutzen. Ein niedrigerer eROI bedeutet dagegen höhere ökologische und wirtschaftliche Kosten und damit höhere Preise und einen geringeren Nutzen. Wenn man weniger Energie einsetzen muss, um die gleiche Output-Energie zu erzeugen, erhöht dies die ökologische und wirtschaftliche Rentabilität des Systems. **Setzt man dagegen vergleichsweise mehr Energie für die Erzeugung einer Einheit Output-Energie ein, besteht die Gefahr einer Energieverknappung** (siehe Anhang bezüglich Energieknappheit). Bei einem eROI von 1 oder weniger werden die Systeme mit einem Energiedefizit betrieben.

*Hinweis: Vaclav Smil's „Energy and Civilization – a History“ (Smil 2017) ist ein hervorragendes Buch zum Thema Energie. Die Autoren empfehlen zudem Kiefer 2013 und Delannoy et al. 2021 für eine ausführlichere Diskussion über den eROI. Kis et al. 2018 nähern sich dem eROI mit Hilfe von GER (Gross Energy Ratio) und GEER (Gross External Energy Ratio). Kis et al. definieren GEER als eROI über den Lebenszyklus und ermitteln einen globalen*

<sup>4</sup> Der IWF meldete für 2020 rund 450 Mrd. USD an weltweiten „expliziten“ Subventionen und rund 5,5 Bio. USD an so genannten „impliziten“ Subventionen für fossile Brennstoffe (IWF 2021). IRENA schätzt, dass „erneuerbare“ Energien im Jahr 2017 rund 130 Mrd. USD an Subventionen erhielten (IRENA 2020), also pro MWh deutlich mehr als fossile Brennstoffe. Die EU verteilt in absoluten Zahlen bereits mehr Subventionen für „erneuerbare“ Energien als für fossile Brennstoffe (EC 2022, S. 30). Die Autoren lehnen das Konzept der „impliziten Subventionen“ ab, da sich je nach den getroffenen Annahmen praktisch jede Zahl errechnen lässt und alle Energieformen – unabhängig davon, ob es sich um Solar-, Wind-, Biomasse-, Wasser-, Gas-, Kohle- oder Kernenergie handelt – „implizite Subventionen“ erhalten. So werden beispielsweise Wind- und Solarenergie nicht mit einer CO<sub>2</sub>-Steuer belegt, obwohl ihre Produktion und ihr Recycling erhebliche THG-Emissionen verursachen. Für eine Abhandlung über die prognostizierten Kosten der globalen Erwärmung siehe Nordhaus 2018, Lomborg 2020 und Kahn 2021. Um Subventionen wirklich vergleichen zu können, müssen sie immer pro Energieeinheit betrachtet werden, was aber selten der Fall ist.

Durchschnitt für GEER von ca. 11:1. Aufgrund der Komplexität des eROI sind weitere Forschungsarbeiten zur Harmonisierung des Ansatzes für seine Bestimmung erforderlich.

Der eROI bei Windenergie ist grundsätzlich höher als bei Solarenergie, was auch auf den höheren durchschnittlichen natürlichen Nutzungsgrad zurückzuführen ist. Laut Carbajales-Dale et al. 2014 kann sich eine durchschnittliche PV-Anlage unter dem Gesichtspunkt der Netto-Energieeffizienz nur 1,3 Batteriespeichertage „leisten“, „bevor sie mit einem Energiedefizit arbeitet“. Unter dem Gesichtspunkt der Nettoenergieeffizienz kann sich die Windkraft über 80 Tage geologische Speicherung (12 Tage Batteriespeicherung) „leisten“. Bei den erwähnten Berechnungen der Nettoenergieeffizienz gingen die Forscher jedoch von der vereinfachenden, aber unrealistisch großzügigen Annahme aus, dass eine Erzeugungstechnologie mit ausreichend Energie (entweder Wind oder Sonnenlicht) versorgt wird, um jeden Tag für 24 Stunden eine durchschnittliche elektrische Leistung zu liefern. Das bedeutet, dass Tage oder Wochen ohne Sonne oder Wind (Dunkelflauten) den Speicherbedarf vervielfachen und damit die Nettoenergieeffizienz oder den eROI weiter verringern würden. Carbajales-Dale et al. berücksichtigten auch den Anteil der Elektrizitätserzeugung, der für die Herstellung und den Einsatz neuer Kapazitäten verbraucht wird.

**Wind- und Solarenergie haben einen sehr niedrigen eROI und stellen somit in Bezug auf die Netto-Energieeffizienz des Systems einen Rückschritt dar. Ihr Einsatz im Netzausmaß birgt die Gefahr der Energieverknappung und ist daher weder wirtschaftlich noch ökologisch wünschenswert.** Für bestimmte Anwendungen, z.B. für die Beheizung eines nicht an das Netz angeschlossenen Schwimmbades oder für das Erwärmen von Wasser für den persönlichen Bedarf in abgelegenen Regionen, können Solar- und Windenergie eine sinnvolle Ergänzung unserer Energiesysteme sein. Der Bau von Wind- und Solaranlagen verringert die Menge der verbrannten fossilen Brennstoffe, wenn man davon ausgeht, dass die Elektrizitätsnachfrage dadurch nicht steigt, was der einzige positive Aspekt ihres Einsatzes ist. Dieser eine positive Aspekt ist mit einer Vielzahl von Kosten verbunden, die in *Abbildung 3: Zusammenfassung der Unzulänglichkeiten der variablen erneuerbaren Energien bei der Elektrizitätserzeugung* veranschaulicht werden und die fair bewertet werden müssen.

Im Zuge der industriellen Revolution verringerte sich die Abhängigkeit der Menschheit von Biomasse, Wasserkraft und Wind. Auf der Grundlage der neu entdeckten **Kohleenergie mit hohem eROI** ermöglichte diese Energie-revolution einen dramatischen Anstieg des Lebensstandards, der Industrialisierung, der Verringerung schwerer körperlicher Arbeit und der Abschaffung der Sklaverei. Diese Revolution und ihre positiven Auswirkungen auf die Menschheit waren nur durch eine drastische Steigerung der Energieverfügbarkeit, der Energieeffizienz bzw. des eROI möglich. Die Energie-revolution ging einher mit einer Diversifizierung weg von der Verbren-

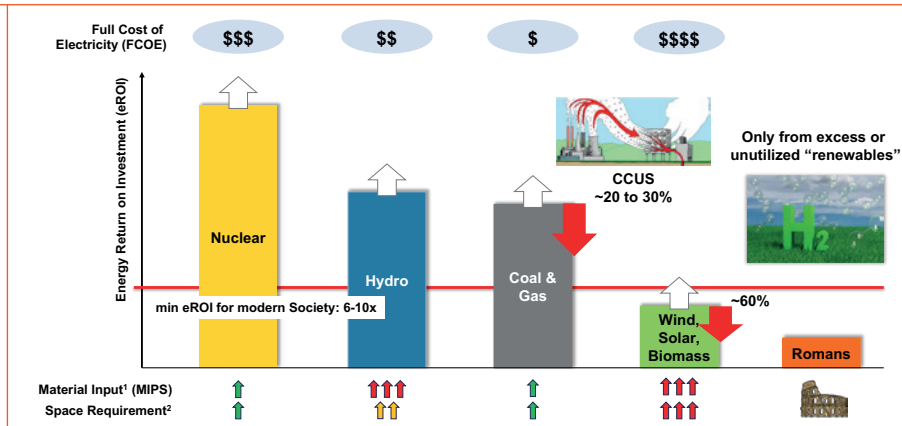


Abbildung 6: Die Konzepte des eROI und der Materialeffizienz – Illustration

Anmerkung: Weiße Pfeile zeigen zukünftige technologische Verbesserungen, rote Pfeile zeigen den Energieverlust und damit einen geringeren eROI aufgrund von CCUS oder „grünen“ H<sub>2</sub>-Systemen. (1) Der Materialeinsatz (MIPS) misst die Ressourceneffizienz, d.h. den Materialeinsatz, der pro Einheit des Outputs erforderlich ist, z.B. MW bzw. MWh pro erzeugter Elektrizität. (2) Der Raumbedarf misst den Flächenbedarf pro erzeugter Elektrizitätseinheit. Quelle: Schemikau Research und Analyse

nung von Biomasse hin zu fossilen Brennstoffen, Wasserkraft und später Kernenergie.

Vor der industriellen Revolution erreichte die menschliche Entwicklung ihren Höhepunkt während des Römischen Reichs mit einem geschätzten nachhaltigen eROI von etwa 2:1 (Abbildung 6). Im 20. Jahrhundert ermöglichten die hohe eROI, die höhere Energiedichte und die Vielseitigkeit des Erdöls die Verkehrsrevolution mit Autos, Flugzeugen und Raketen.

Um das Ausmaß dieser Energie-revolution zu verstehen, muss man sich vor Augen halten, dass drei Esslöffel Rohöl das Äquivalent von acht Stunden menschlicher Arbeit enthalten (Kiefer 2013 und Fußnote<sup>5</sup>). Abbildung 6 veranschaulicht schematisch das Konzept des eROI in den heutigen Elektrizitätssystemen und die Auswirkungen von CCUS oder Wasserstoffspeichern auf die Netto-Energieeffizienz (Supekar und Skerlos 2015).

Dr. Euan Mearns 2016 erläutert den eROI auf der Grundlage von Kiefers Arbeit und weist darauf hin, dass für eine moderne Gesellschaft ein eROI von mindestens 5-7 notwendig ist, während die meisten Solar- und viele Windkraftanlagen je nach Standort einen niedrigeren eROI haben und daher von Natur aus nicht genügend Energie liefern. Laut Weissbach et al. 2013 haben Solar- und Biomasseanlagen in Nordeuropa einen gepufferten eROI von etwa 2-4. Kiefer definiert den Begriff der „Nettoenergieklippe“, die zeigt, dass eine Gesellschaft bei abnehmendem eROI immer größere Mengen an verfügbarer Energie für die Energiegewinnung einsetzen muss.

Nehmen wir als Beispiel die Beschäftigung: Unter einem eROI von 5-7 müssten so viele Menschen in der Energieerzeugung arbeiten, dass nicht mehr genügend Menschen übrig wären, um die anderen Stellen zu besetzen, die unsere Gesellschaft benötigt. Man mag argumentieren, dass dies aufgrund der zu langfristigen Bedrohung der menschlichen Arbeitskraft durch künstliche Intelligenz wünschenswert ist. Der aktuellste World Energy Outlook der IEA (IEA 2021b) bestätigt, dass die weltweite Beschäftigung durch „erneuerbare“ Energiesysteme zunehmen wird, und liefert damit einen Beleg für den niedrigeren eROI der „erneuerbaren“ Technologien.

**Das Prinzip der Energierendite (eROI) steht im Mittelpunkt der Energieeffizienz einer Gesellschaft, die wiederum für die Entwicklung und das Überleben der Menschheit von entscheidender Bedeutung ist.**

### 2.3. Die Bedeutung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik für Energiesysteme

Der 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik wurden bereits im Vorwort vorgestellt. Abbildung 7 versucht, die Aussagen der beiden Hauptsätze zusammenzufassen. Der 1. Hauptsatz ist einfach, da er im Grunde besagt, dass Energie niemals verloren gehen kann, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt wird.

Der 2. Hauptsatz führt das Konzept der Entropie ein, ein anderes Wort für die Nützlichkeit oder den Wert der Energie (hohe Entropie

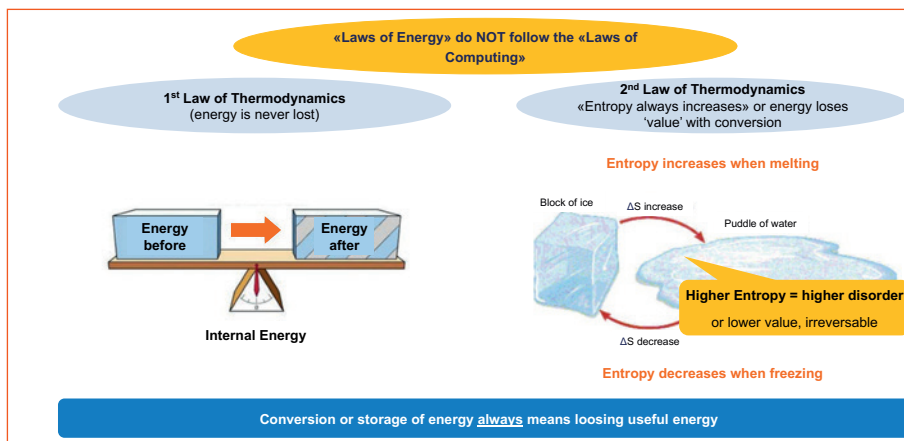


Abbildung 7: 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Quelle: Schemikau, Diagramme aus (Link)

<sup>5</sup> Basierend auf Kiefer 2013: eROI für Menschen und Ochsen als Verhältnis von maximaler Arbeitsleistung (Output) geteilt durch die Kalorien der Nahrung (Input), berechnet aus den Online-Daten von Homer-Dixon: 0,175:1. Der eROI römischen Weizens als Verhältnis der Kalorien der Nahrung (Output) geteilt durch die Arbeitskraft und das Saatgetreide (Input) betrug 10,5:1. Der eROI von Saat-Luzernen war 27:1. Der menschliche Verzehr von Weizen ergibt einen eROI für schwere Arbeit von 0,175 x 10,5 = 1,8:1. Ochsen, die mit Saat-Luzernen gefüttert werden, erreichen einen eROI von 0,175 x 27 = 4,7:1. Im Zusammenspiel von Mensch und Ochse und unter Berücksichtigung von Abschlägen für ungenutzte Zeit sowie für leichte Arbeit/Facharbeit gegenüber schwerer Arbeit ergibt sich in der Spitze ein eROI von ~4,2:1 und dauerhaft von ~1,8:1.



= hohe Unordnung bzw. niedriger Wert der Energie). Im Wesentlichen erklärt der 2. Hauptsatz, warum im Normalzustand Wärme immer von warm nach kalt fließt und nicht umgekehrt. Wenn Energie von einer Form in eine andere umgewandelt wird, nimmt die Entropie immer zu bzw. es geht „nutzbare“ Energie verloren. Die logische Schlussfolgerung für unsere modernen Energiesysteme ist, dass wir die **Umwandlung und Speicherung von Energie sowie die Komplexität unserer Energiesysteme so weit wie möglich vermeiden müssen**, da all dies zu einem Verlust an nutzbarer Energie führt.

Dieser Verlust an nutzbarer Energie ist bedeutsam, da er direkt eine geringere Energieeffizienz des Systems bewirkt. Die Umwandlung von Windstrom in Wasserstoff, die Speicherung von Wasserstoff und die Umwandlung von Wasserstoff wieder zurück in Elektrizität führen direkt zu einer Verringerung des eROI. Sie trägt auch direkt zur Erderwärmung bei. Der Nettowirkungsgrad eines Gas- oder Kohlekraftwerks ist auch das Ergebnis des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik. Jeder Prozess, der im Kessel, in der Turbine oder im Generator abläuft, „kostet“ Energie, die in Form von geringwertiger Wärme an die Umgebung verloren geht.

Wir haben in Kapitel 2 festgestellt, dass die „grüne“ Energiewende hin zu variablen erneuerbaren Energien in Form von Wind- und Solarenergie die Elektrizitätskosten erheblich erhöhen wird. Die höheren Kosten werden vor allem ärmere Bevölkerungsschichten und Entwicklungsländer belasten (McKinsey 2022 und Wood Mackenzie 2022). Mit dem Konzept des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik können wir nun einen weiteren Grund aufzeigen, warum die „grüne“ Energiewende zu einer höheren globalen Energieineffizienz führen wird, da sie komplexere Energiesysteme und eine größere Speicherung erfordert. Die IEA fasst das Problem der zunehmenden Komplexität in ihrem Artikel „Energy transitions require innovation in power system planning“ (IEA 2022a, siehe Abbildung 8) wie folgt zusammen.

- „Die Abkehr von zentralen thermischen Kraftwerken als Hauptlieferant von Elektrizität erhöht die Komplexität der Elektrizitätssysteme. Zur Aufrechterhaltung einer sicheren Elektrizitätsversorgung werden mehrere Leistungen benötigt.“
- Neben einer ausreichenden Energieversorgung umfassen diese auch die Deckung des Spitzenlastbedarfs, die Stabilisierung des Stromnetzes bei kurzfristigen Störungen und eine ausreichende Flexibilität, um auf Veränderungen bei Angebot und Nachfrage reagieren zu können.“

**Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik beweist zudem, dass der Großteil der von uns erzeugten und verbrauchten Energie in geringwertige bzw. hochentropische Wärme umgewandelt wird und somit zur Erderwärmung und dem gemessenen Temperaturanstieg beiträgt** (Soon et al. 2015). In einigen von uns hergestellten Produkten ist auch Energie enthalten, die nicht in Form von Wärme freigesetzt wird. Diese Produkte werden in erster Linie zu Wohnzwecken oder als Verbrauchsgüter verwendet.

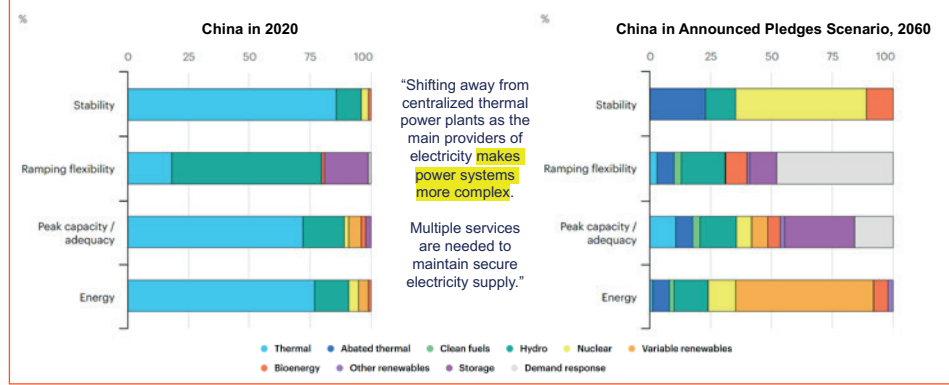


Abbildung 8: Gegenwärtige und zukünftige Energiesicherheit in China  
Quelle: Basierend auf IEA 2022a

Der gut dokumentierte „Wärmeineffekt“ ist auch eine Form der Wärmeabgabe unserer Energiesysteme an die Umgebung.

Wenn wir Energie aus Quellen wie Uran, Öl, Kohle, Gas oder sogar Erdwärme erzeugen, dann nehmen wir Energie, die sich „im Inneren unseres Planeten“ befindet, und wandeln sie letztlich in geringwertige Wärmeenergie um, die die Erde erwärmt. Wenn wir die Energie der Sonneneinstrahlung durch den Einsatz der Photovoltaik nutzen, wird unser Planet nur dann nicht „netto“ erwärmt, wenn wir die Erwärmung durch die Absorption der Solarmodule und die sich verändernde atmosphärische Zirkulation außer Acht lassen (Lu et al. 2020) und die Energie für den Bau und das Recycling der Anlagen oder Systeme, die zur Gewinnung und Nutzung der Solarenergie erforderlich sind, nicht berücksichtigen. Die Energiegewinnung durch Wind hat zusätzliche Folgen für die Klimaerwärmung, wie von Miller und Keith 2018 dargestellt. Energieerzeugungsformen mit hohem CO<sub>2</sub> Ausstoß wie Kohle oder Gas gleichen die Erderwärmung durch den Effekt der CO<sub>2</sub>-Düngung und Begrünung, die die Sonnenenergie verringern, teilweise aus (die Sonnenstrahlung kann nur eines bewirken: entweder Pflanzenwachstum oder Erderwärmung; siehe Schemnikau und Smith 2022).

### 3. Diskussion (Erwartungen an die Energie der Zukunft und Vorschläge für eine Neuausrichtung der Energiepolitik)

Die Boston Consulting Group (BCG 2021b) erwartet, dass die weltweite Wind- und Solarkapazität für die „saubere Energiewende“ ähnlich stark ausgebaut wird wie der Aufbau an Überkapazitäten in Deutschland über die vergangenen 20 Jahre (siehe Abbildung 2 und Abbildung 9). Im Jahr 2020 belief sich die gesamte weltweite Elektrizitätserzeugungskapazität auf etwa 8.000 GW, wovon über 1.400 GW auf Wind- und Solarenergie entfielen. BCG geht davon aus, dass in 8 Jahren (zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels), d.h. bis 2030, allein die Wind- und Solarenergie eine Kapazität von 8.600 GW erreichen muss, was einer Verdoppelung der heutigen globalen Elektrizitätserzeugungskapazität entspricht, so wie es in Deutschland über einen Zeitraum von 20 Jahren von 2002 bis 2021 der Fall war.

Auf der Grundlage der Daten des IRENA-Ausblicks 2021 prognostiziert BCG außerdem, dass die weltweit installierte Wind- und Solarkapazität bis 2050 22.000 GW erreichen muss, was fast dem Vierfachen der heutigen globalen Elektrizitätserzeugungskapazität entspricht. Die Autoren sind der Meinung, dass diese **installierte Kapazität nicht erreicht wird, da der Welt vorher die Energie, die Rohstoffe und das Geld ausgehen werden**. Wenn sie tatsächlich erreicht würde, wären die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen auf die Gesellschaft besorgniserregend, wie hier erläutert.

Ein so dramatischer Ausbau von Wind- und Solarenergiekapazitäten würde zu instabileren und teureren Energiesystemen führen. Er würde sich auch negativ auf die Umwelt auswirken (siehe Raumbedarf, Backup, Materialeinsatz, eROI, Recyclingbedarf, lokale Klimaauswirkungen usw.) und die – ausschließlich auf Modellen basierenden – erhofften positiven Auswirkungen auf das globale Klima infolge der Verringerung der menschenverursachten THG-Emissionen entgegen wirken. Ein Vorteil des Ausbaus – aus Sicht der Autoren der einzige positive Aspekt – wäre die Begrenzung des Abbaus **fossiler Rohstoffe**. Es stellt sich jedoch die Frage, ob der **Gesamtrohstoffverbrauch** wirklich reduziert würde, wenn der gesamte Lebenszyklus vom Abbau der Rohstoffe über

– ausschließlich auf Modellen basierenden – erhofften positiven Auswirkungen auf das globale Klima infolge der Verringerung der menschenverursachten THG-Emissionen entgegen wirken. Ein Vorteil des Ausbaus – aus Sicht der Autoren der einzige positive Aspekt – wäre die Begrenzung des Abbaus **fossiler Rohstoffe**. Es stellt sich jedoch die Frage, ob der **Gesamtrohstoffverbrauch** wirklich reduziert würde, wenn der gesamte Lebenszyklus vom Abbau der Rohstoffe über

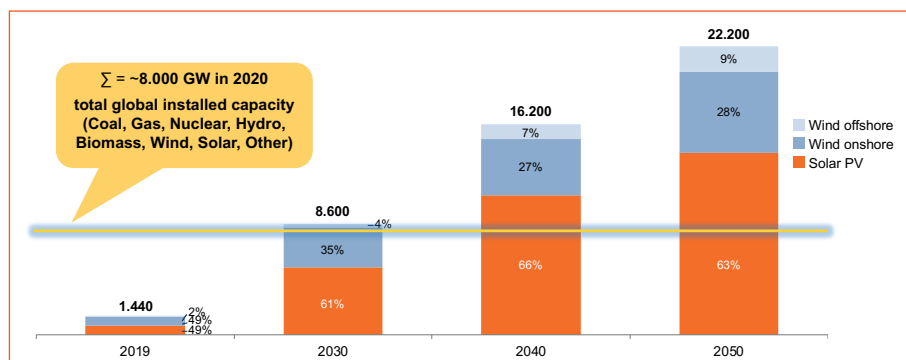


Abbildung 9: Für 2050 wird eine Wind-/Solarkapazität prognostiziert, die fast 4-mal so hoch ist wie die heutige Gesamtkapazität  
Quelle: Schemnikau Research und Analyse auf der Grundlage von IRENA 2021 und BCG 2021b



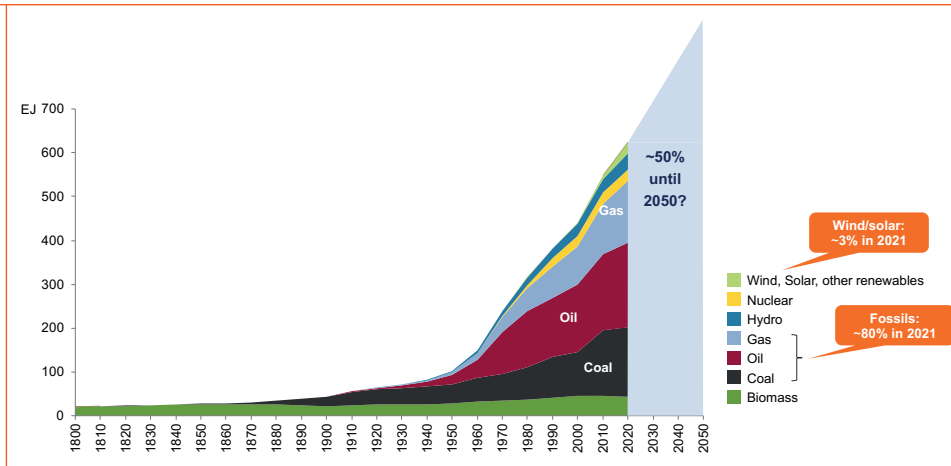
den Transport, die Verarbeitung, die Herstellung und den Betrieb bis hin zum Recycling ehrlich und vollständig berücksichtigt wird (Abbildung 4 und Abbildung 11). Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Nachdem die Weltbevölkerung in den letzten 100 Jahren von ~2 Milliarden auf ~8 Milliarden Menschen gewachsen ist, geht die UNO davon aus, dass sie bis 2050 weiter auf ~10 Milliarden ansteigen wird (OurWorldIn-Data 2021). Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte die Bevölkerung einen Höchststand von etwa 11-12 Milliarden erreichen. Trotz kontinuierlicher Verbesserungen der Energieeffizienz wird der steigende Lebensstandard in den Entwicklungsländern den Prognosen zufolge den durchschnittlichen jährlichen Pro-Kopf-Energieverbrauch von ~21.000 kWh auf ~25.000 kWh bis 2050 erhöhen (Lomborg 2020, BP 2019).

Wie in Abbildung 10 dargestellt, **könnte der weltweite Primärenergieverbrauch infolgedessen bis 2050 um bis zu 50% steigen** (~25% Bevölkerungswachstum und ~20% Anstieg des Pro-Kopf-PE-Verbrauchs ergeben einen Anstieg der PE um ~50%). Das Wachstum der Energienachfrage wird von den Entwicklungsländern in Asien, Afrika und Südamerika getragen. Es wird erwartet, dass die Industrieländer infolge einer rückläufigen bzw. stagnierenden Bevölkerung und Energieeffizienzsteigerungen in den kommenden Jahrzehnten weniger Energie verbrauchen werden. In der Vergangenheit haben Verbesserungen der Energieeffizienz jedoch immer zu einem Anstieg der Energienachfrage geführt (siehe Jevons-Paradox, Polimeni et al. 2015). Zur Veranschaulichung wird auf das von den Autoren empfohlene Buch „Life After Google“ (Gilder 2018) verwiesen, in dem der erhöhte Energiebedarf für die globale Datenverarbeitung erläutert wird.

Die aktuellen Modelle von McKinsey gehen davon aus, dass die weltweite Primärenergie-nachfrage bis 2050 um 14% steigen wird, während der „Netto-Null-Pfad“ der IEA (2021) von einer Verringerung des PE-Verbrauchs um ~10% bis 2030 ausgeht – also in 8 Jahren gemessen von dem Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels. Diese Prognose wird von der Energiebranche und den Autoren in Frage gestellt (IEA 2021e, McKinsey 2021). In denselben Studien wird geschätzt, dass sich die weltweite Elektrizitätserzeugung von 2020 bis 2050 fast verdoppeln wird, was auch auf die erwartete Elektrifizierung des Verkehrs zurückzuführen ist. Das Institute for Energy Economics in Japan (IEEJ 2021) prognostiziert dagegen einen Anstieg des weltweiten Primärenergiebedarfs um 30% bis 2050, während die amerikanische EIA einen Anstieg um 50% vorhersagt (EIA 2021). Kober et al. 2020 vergleichen verschiedene Energieszenarien und weisen darauf hin, dass im Wesentlichen alle Energieszenarien in der Zukunft von einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch ausgehen.

**Das Wachstum der Elektrizitätsnachfrage wird das Wachstum der Primärenergie übersteigen**, was zum Teil auf die weltweite Elektrifizierung zurückzuführen ist. Der Anteil der Elektrizität an der Primärenergie wird auch deshalb steigen, weil unser Leben zunehmend von Computern und anderen



**Abbildung 10: Globale Primärenergie von 1750 bis 2050**  
 Anmerkung: Primärelektrizität (umgerechnet nach der direkten Äquivalenzmethode). Exa-Joule (EJ), wobei 600 EJ etwa 170.000 TWh entsprechen.  
 Quelle: Schemikau Research und Analyse auf der Grundlage von Daten, die von J. David Hughes zusammengestellt wurden. Daten nach 1965 von BP, Statistical Review of World Energy (Link). Daten vor 1965 von Arnulf Grubler (1998): "Technology and Global Change: Data Appendix" (Link), und World Energy Council (2013): World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050 (Link).

elektrischen Geräten geprägt wird. Elektrizität soll auch einen beträchtlichen Teil des nichtelektrischen Energieverbrauchs im Verkehr (z.B. Elektrofahrzeuge), beim Heizen (z.B. Wärmepumpen) und in der Industrie (z.B. DRI für die Stahlproduktion) ersetzen. Wie dargestellt, wird dies bei der Verwendung von Wind, Solar oder Biomasse zu einer Verringerung der Netto-Energieeffizienz führen.

Trotz der erhofften technologischen Verbesserungen **ist davon auszugehen, dass mit Wind und Solar allein nicht genügend Elektrizität erzeugt werden kann, um den erwarteten Nachfraganstieg bis 2050 zu decken**. Dies wird durch das IEEJ 2021 bestätigt, dass in seinem Referenzszenario einen absoluten Anstieg des Anteils der fossilen Brennstoffe an der Primärenergie bis 2050 prognostiziert. Im Juli 2021 bestätigte die IEA, dass „... [die erneuerbaren Energien] voraussichtlich nur etwa die Hälfte des für 2021 und 2022 prognostizierten Anstiegs der weltweiten [Elektrizitäts]-Nachfrage decken können“ (IEA 2021c). Beim Primärenergiewachstum wird der Anteil der erneuerbaren Energien nur einen Anteil von vielleicht 20% ausmachen, da heute etwa 40% der Primärenergie für die Elektrizitätserzeugung verwendet wird.

Selbst wenn Wind- und Solarenergie den gesamten künftigen Anstieg des Primärenergiebedarfs decken könnten, wird deutlich, dass wir in den nächsten 30 Jahren und darüber hinaus weiterhin auf konventionelle Energieressourcen angewiesen sein werden,

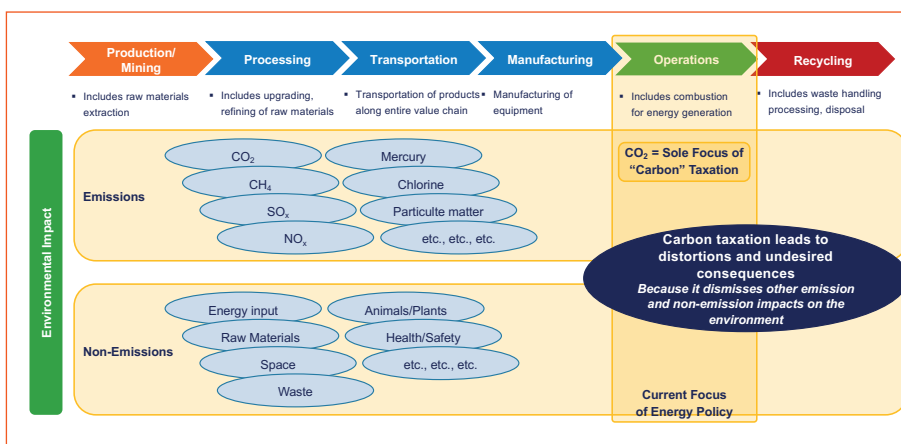
um den Großteil – wenn nicht sogar den überwiegenden Anteil – unseres weltweiten Energiebedarfs zu decken. Damit die aktuellen „Netto-Null-Pfade“ (IEA 2021e) und -Szenarien auf dem Papier erfolgreich sind, bedarf es einer Reihe äußerst optimistischer und häufig unrealistischer Annahmen in Bezug auf rasche Fortschritte in der Technologieentwicklung, den Einsatz von Wasserstoff, Nachfragebeschränkungen, Rohstoffe mit kontrollierbaren Preisen und Lieferverfügbarkeit und so weiter. Sie lassen auch den eROI, den Materialeinsatz, die Lebensdauer und realistische Recycling-Annahmen und damit die negativen wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der „erneuerbaren“ Energien weitgehend außer Acht.

#### 4. Schlussfolgerungen und zukünftige Forschung (zukünftige Energiepolitik)

Die Energiepolitik ist von enormer Wichtigkeit und verfolgt drei Ziele:

- (1) Sicherheit der Versorgung,
- (2) Bezahlbares Angebot, und
- (3) Schutz der Umwelt.

Die heutige Energiepolitik konzentriert sich jedoch simplistisch auf die Verringerung der anthropogenen (durch den Menschen verursachten) CO<sub>2</sub>-Emissionen, in der Hoffnung, somit die künftige globale Erwärmung zu begrenzen bzw. zu verringern (Abbildung 11). Wie die Ergebnisse der COP26-Konferenz in



**Abbildung 11: Umweltauswirkungen von Energiesystemen – Warum die Besteuerung von Kohlenstoff zu Verzerrungen und unerwünschten Effekten führt**  
 Quelle: Schemikau Illustration

Glasgow im November 2021 zeigen, so unter anderem auch die „Globale Erklärung zum Übergang von der Kohle- zur sauberen Energieversorgung“ (UN-COP26 2021), legen viele Nationen bei ihren energiepolitischen Entscheidungen kaum Gewicht auf die Ziele (1) und (2) sowie die meisten Aspekte des Ziels (3), wie z.B. Tier- und Pflanzenwelt, Land- und Raumnutzung, Material- und Energieeinsatz, Recyclingeffizienz (siehe Abbildung 3, Abbildung 11, und Abbildung 12). Infolge der Russland-Ukraine-Krise im Jahr 2022 rückte die Energiesicherheit neu in den Mittelpunkt – zumindest in Europa, das stark auf die Versorgung mit russischen Energierohstoffen gesetzt hatte und in den vergangenen 20 Jahren seine eigene Energieunabhängigkeit verloren hat (siehe die politischen Entscheidungen Deutschlands zum Ausstieg aus der Kohle- und Kernenergie und die umfassenden Initiativen der EU zur Abkehr von zuverlässigen fossilen Energiequellen). Der neue Fokus scheint jedoch eher eine ad hoc als eine strategische Ausrichtung zu sein.

Das Ziel globaler Investitionen in die „Energiewende“ sollte darin bestehen, alle drei Hauptziele der Energiepolitik zu erreichen, und nicht nur das Teilziel der Verringerung der von Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energieerzeugung. **Die heutige falsche Fokussierung der Energieinvestitionen auf Wind und Solar erhöht das Risiko einer Energieverknappung mit all seinen Folgen** (siehe Anhang).

Die Strom-Vollkosten (FCOE) und der eROI zeigen, dass Wind und Solar leider nicht die Lösung für das Energieproblem sind. Ihr Ausbau im Netzmaßstab wird unerwünschte wirtschaftliche und ökologische Folgen haben. Die Diskussionen über die „grüne“ Energiewende dürfen nicht länger auf Basis der LCOE geführt werden, da sie die Entscheidungsträger in die Irre führen. Regierungen, Industrie und Bildungseinrichtungen sollten dringend mehr Zeit aufwenden, um die energiewirtschaftlichen Realitäten zu erkennen und zu diskutieren, bevor bewährte und relativ kostengünstige Energiesysteme aufgegeben werden. Es braucht nur Energie, um die Nahrungsmittel- und Wasserkrise zu lösen, Naturkatastrophen zu bewältigen, und die Armut zu beseitigen.

Wir müssen verstehen, dass der geplante dramatische Anstieg der installierten Solar- und Windkapazität (wie in Abbildung 9 dargestellt) zwar den Vorteil des geringeren Bedarfs an fossilen oder nuklearen Brennstoffen hat, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Elektrizitätsnachfrage nicht steigt. Dieser eine Vorteil ist mit erheblichen Kosten für unsere Umwelt und unsere Volkswirtschaften verbunden, wie in diesem Artikel detailliert ausgeführt wird. Die Kosten für die Umwelt ergeben sich aus der Intermittenz und dem inhärenten niedrigen eROI von VEE, wenn man die gesamte Wertschöpfungskette und den Lebenszyklus betrachtet (Abbildung 11).

Die **Neue Energierevolution** ist ein Zeitpunkt, an dem sich die Welt nachhaltig von fossilen Brennstoffen lösen kann. So ein neues Energiesystem kann möglicherweise eine Kombination aus Kernfusion oder Kernspaltung, Solarenergie, Erdwärme oder eine heute noch unbekannte Energiequelle (siehe auch

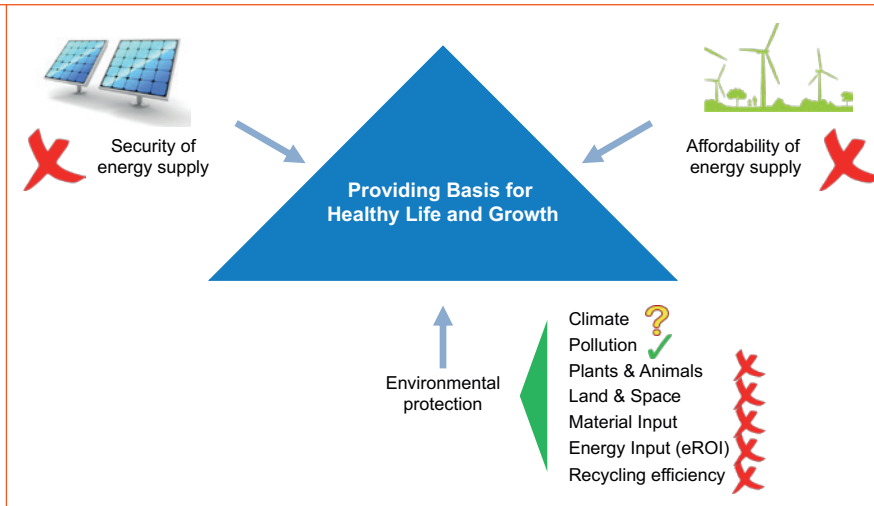


Abbildung 12: Variable erneuerbare Energien erfüllen nicht die Ziele der Energiepolitik  
Quelle: Schemikau Illustration

Manheimer 2022) umfassen. Sie würde wahrscheinlich die Kraft der molekularen Teilchen (Kernkraft), die Energie unseres Planetensystems (d.h. die Sonne) und die Eigenenergie unseres Planeten nutzen. Ein neues Energiesystem wird mit den heutigen Wind- und Photovoltaiktechnologien – aufgrund deren physikalischen Grenzen der Energiedichte bzw. der pro m<sup>2</sup> verfügbaren Energie und der Intermittenz – wenig gemeinsam haben.

Die Autoren empfehlen, mehr in Bildung und Grundlagenforschung (Energieerzeugung, Materialgewinnung und -verarbeitung, Speicherung, Supraleiter, effizientes Recycling usw.) zu investieren, um die **Neue Energierevolution** zu realisieren. Ebenso wichtig ist die zweite Empfehlung, parallel weiter in konventionelle Energien zu investieren, um sie effizienter und umweltfreundlicher zu machen. Bei Energieerzeugungsformen ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht allerdings kein Wärmeausgleich in Form von Begrünung und Düngung durch CO<sub>2</sub> (siehe Harverd et al. 2019 und Idso 2021 für eine umfangreiche Liste von Peer-Reviewed Literatur). Die geringere Netto-Energieeffizienz von VEE und die verstärkte Energieerzeugung aus nicht-fossilen Quellen wird entsprechend zu einem Anstieg geringwertiger Wärme bzw. Wärme mit hoher Entropie führen, die unseren Planeten auch dann erwärmen wird, wenn keine THG mehr emittiert würden.

Die Autoren empfehlen, dass sich künftige Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten darauf konzentrieren sollten, den tatsächlichen

eROI von Energiesystemen als Grundlage für die Festlegung von Prioritäten zu ermitteln, und die Umweltauswirkungen bestehender Energiesysteme in Form von Emissionen und Nicht-Emissionen zu verringern. Die künftige Forschung sollte die FCOE und den eROI für konventionelle und variable erneuerbare Energiesysteme beschreiben und quantifizieren. Dies erfordert eine Finanzierung, ein großes Team und wird eine globale Anstrengung sein.

Um die konventionellen Energiesysteme weiter zu optimieren, schlagen die Autoren vor, dass ultra-superkritische Kraftwerke (USC) und hocheffiziente, emissionsarme Technologien (HELE) weiter erforscht und umgesetzt werden, um ihre Wirkungsgrade zu erhöhen. Die USC-Technologie würde sich unmittelbar positiv auf die Umwelt auswirken, und das zu wesentlich geringeren Kosten als der Bau von variablen erneuerbaren Energiesystemen im Netzmaßstab mit dem erforderlichen Backup (siehe auch Tramosljika et al. 2021). **Investitionen in fossile Brennstoffe – und nicht die Abkehr von ihnen – sind die folgerichtige Schlussfolgerung, nicht nur um den (Energie-) Mangel zu beseitigen, die ökologische und wirtschaftliche Effizienz der mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerke zu verbessern** (sei es für den Transport, das Heizen oder die Elektrizitätserzeugung), sondern auch um eine langanhaltende Energiekrise zu vermeiden, die bereits in der zweiten Hälfte des Jahres 2021 begann.

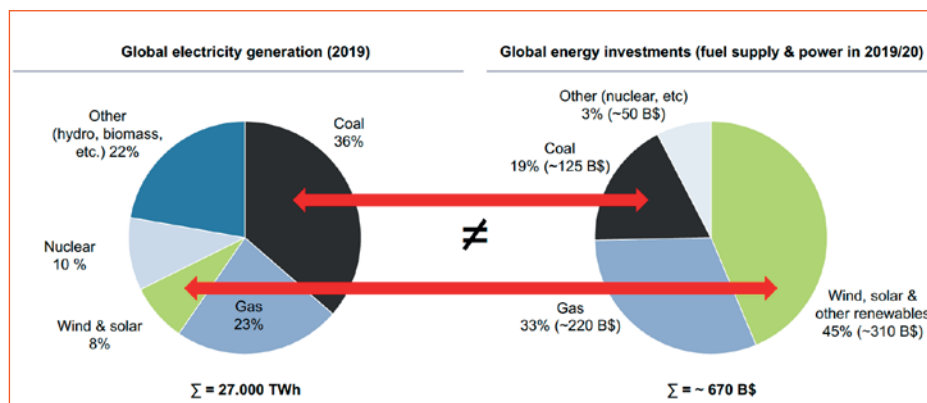


Abbildung 13: Investitionen in Kohle machen weniger als die Hälfte der Investitionen in Wind/Solar aus, obwohl Kohle 4-mal mehr Elektrizität liefert  
Anmerkung: Die rechte Seite beinhaltet Investitionen in die Brennstoff- und Elektrizitätsversorgung; bzgl. Gas wird davon ausgegangen, dass 50% der Gesamtinvestitionen in die 'Öl- und Gas'-Brennstoffversorgung auf Gas entfallen (511 B\$ x 0,5 = 255 B\$)  
Quelle: Schemikau Research und Analyse auf Grundlage von Daten der IEA und BNEF; World Energy Investment 2020 – IEA.



## Anhang: Energieknappheit: ihre Auswirkungen und Ursachen

Die offensichtliche Energieknappheit in Europa und anderen Teilen der Welt seit dem Jahr 2021 verdeutlicht die FCOE und erklärt die hohen Kosten der variablen erneuerbaren Energien. Die unzureichenden Investitionen in konventionelle Energieformen führte zu einer Unterversorgung, während gleichzeitig Wind- und Solarenergie nicht in der Lage waren, die gestiegene Nachfrage zu decken. Die Tatsache, dass Verbraucher in Deutschland die höchsten Strompreise aller Industrienationen bezahlen, ist ein weiterer Beleg für die FCOE und auch das Ergebnis des relativ hohen Anteils der VEE.

BCG und IEF International Energy Forum warnten in ihrem Energiebericht (Oil and Gas Investment in the New Risk Environment) vom Dezember 2020, dass „... die Investitionen [in Öl und Gas] bis 2030 um mindestens 225 Mrd. USD gegenüber 2020 steigen müssen, um eine [Energie]Krise abzuwenden“ (BCG und IEF 2020). Die Presse begann dieses Thema im dritten Quartal 2021 aufzugreifen, als die Preise für Energie und Strom in die Höhe schnellten und erste Anzeichen einer weltweiten Energieknappheit sichtbar wurden. Die Investitionen in Kohle sind im relativen Vergleich niedriger als in Öl und Gas (Abbildung 13).

Die russische Invasion der Ukraine im Jahr 2022 verdeutlichte auch die Verletzlichkeit der globalen Energiesysteme und die Verflechtung von Energie und Politik, insbesondere wenn es um Öl, Gas und Kernenergie geht. Von den regelbaren Energieformen sind Kohle, Wasserkraft und Geothermie am wenigsten politisch. Nachfolgend eine Liste ausgewählter Presseartikel zum Thema der „neuen Energiekrise“ (Links siehe Fußnote<sup>6</sup>).

1. Bjarne Schieldrop, Rohstoff-Chefanalyst der SEB, März 2022: „Die Weltwirtschaft steht derzeit vor einem Energieengpass, und die ‚Zerstörung der Nachfrage‘ wird dem Aufwärtstrend letztendlich eine Grenze setzen.“
2. Vaclav Smil schrieb im Februar 2022 mit Blick auf den russischen Einmarsch in die Ukraine: „Dieser Krieg wird viele langfristige Folgen haben, die vielleicht wichtigste werden seine Auswirkungen auf die Zukunft der europäischen Energieversorgung sein.“
3. The N24 im Februar 2022: „Die schlimmste Energiekrise seit 1973.“
4. CNN im November 2021: „... Organisationen zur Bekämpfung der Armut und Umweltschützer haben davor gewarnt, dass Millionen von Menschen in ganz Europa in diesem Winter vielleicht nicht in der Lage sein werden, ihre Häuser zu heizen ...“
5. Wikipedia richtete eine eigene Seite ein und verwies im November 2021 auf die globale Energiekrise 2021: „Die globale Energiekrise 2021 ist eine anhaltende Energieknappheit auf der ganzen Welt und betrifft unter anderem Länder wie das Vereinigte Königreich und China.“
6. Bloomberg im Oktober 2021: „Die Welt erlebt gerade die erste große Energiekrise im Zuge der ‚grünen Energiewende‘. Es wird nicht die letzte sein.“

7. The Globe and Mail im Oktober 2021: „Indiens Kohlekrise braut sich zusammen, da die Stromnachfrage steigt und die Weltmarktpreise auf Rekordniveau liegen.“
8. Bloomberg im September 2021: „In Europa herrscht eine Knappheit an Gas und Kohle, und wenn der Wind nicht weht, könnte das schlimmste Szenario eintreten: Großflächige Stromausfälle, die Unternehmen und Fabriken zur Schließung zwingen. Die beispiellose Energiekrise hat sich seit Jahren zusammengebraut, da Europa immer mehr von intermittierenden Energiequellen wie Wind und Solar abhängig wird, während die Investitionen in fossile Brennstoffe zurückgehen.“
9. Nikkei Asia im September 2021: „Wichtige Zulieferer von Apple und Tesla stoppen ihre Produktion inmitten der chinesischen Elektrizitätsknappheit.“ Bloomberg berichtet im selben Monat, dass „China möglicherweise kopfüber in einen Stromversorgungsschock eintauchen könnte, der Asiens größte Volkswirtschaft hart treffen würde. Und dies zu einem Zeitpunkt, zu dem die Evergrande-Krise Schockwellen durch das Finanzsystem sendet.“
10. Bloomberg zitierte im August 2021 eine Führungskraft aus der Gaswirtschaft, die davor warnte, dass die derzeitige Energiepolitik die Versorgung der Verbraucher mit ausreichenden und kostengünstigen Brennstoffen beeinträchtigen könnte: „Der Mangel an Investitionen in zukünftige Erdgasprojekte führt uns nicht zu einer Energiewende, sondern unweigerlich in eine Energiekrise.“

Die Kosten sowohl im menschlichen als auch im wirtschaftlichen Bereich aufgrund von Engpässen in der Elektrizitätsversorgung sind an vielen Beispielen weltweit sichtbar. Ein Beispiel aus Europa ist der Stromausfall in Italien am 28. September 2003. An diesem Tag war der Norden Italiens bis zu 3 Stunden und der Süden (Sizilien) bis zu 16 Stunden ohne Elektrizität. Ein Verlust von 200 GWh führte zu einem geschätzten volkswirtschaftlichen Schaden von 1,2 Mrd. EUR (Baruya 2019, ehemals IEA Clean Coal Center). Baruya fasst wie folgt zusammen: „In Entwicklungsregionen wie Subsahara-Afrika behindern Engpässe in der Energieversorgung das Geschäfts- und Wirtschaftswachstum. In fortgeschrittenen Volkswirtschaften führen Ausfälle des Elektrizitätsnetzes und der Erzeugungskapazitäten ebenfalls zu messbaren wirtschaftlichen Verlusten, wie sie in den letzten Jahren in Italien zu beobachten waren“. Eine weitere direkte Auswirkung von Stromausfällen ist die Beeinträchtigung des Lebens und der Gesundheit. Keines der „Netto-Null“-Modelle oder Szenarien berücksichtigt die Kosten, die durch Energieknappheit oder -mangel entstehen.

Wir haben gezeigt, dass die „Energiewende“ hin zu variablen erneuerbaren Energieformen wie Wind und Solar zu höheren Stromkosten führen wird. Der die Energiewende unterstützende Strategieberater McKinsey (2022) fasst zusammen: „Eine Netto-Null-Umstellung hätte einen erheblichen Effekt – vor allem zu Beginn – auf Nachfrage, Kapitalallokation, Kosten und Arbeitsplätze“.

Die Forschung zeigt, dass ein Anstieg der Strompreise Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum hat. Baruya 2019 fasste die

Auswirkungen der steigenden Stromkosten auf die Industrie in China, den USA, Russland, Mexiko, der Türkei und Europa auf der Grundlage wissenschaftlicher Untersuchungen zusammen. Die Elastizitätskoeffizienten zwischen Wirtschaftswachstum und Strompreisen waren klar negativ. Die Produktion ging in den Sektoren nicht-metallische Mineralien (Zement), Metallverhüttung und -verarbeitung, Chemie sowie Bergbau und Metallzerzeugnisse am stärksten zurück. In Vietnam beispielsweise wurden 2008 die Auswirkungen einer Erhöhung des Stromtarifs auf die langfristigen Grenzkosten von Produkten untersucht, die mit stromintensiven Verfahren hergestellt werden. Eine Erhöhung der Strompreise trieb die Inflation bei allen betroffenen Waren und Dienstleistungen in die Höhe (Baruya 2019).

Baruya 2019 bestätigt die Analyse der Autoren, dass die Stilllegung fossiler Kraftwerke ohne angemessene, zuverlässige und kostengünstige Alternativen „die Back-up Kapazitäten stärker reduzieren wird, als zur Deckung von Kapazitätsengpässen während der Nachfragespitzen nach Elektrizität erforderlich ist“. Entwicklungs- und Schwellenländer wie Indien, Indonesien, Bangladesch und Pakistan werden von der nicht mehr verfügbaren Finanzierung durch westliche Banken negativ betroffen sein. Eine alternative Finanzierung kann zum Einsatz weniger effizienter Elektrizitätserzeugungstechnologien und damit zu höheren Umweltbelastungen führen. Industrieländer, die nicht in hocheffiziente, emissionsarme Technologien (HELE) für konventionelle Brennstoffe investieren, könnten sich entsprechend mit höheren Elektrizitätserzeugungskosten und höheren Emissionen konfrontiert sehen, was ihre Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen und das Wirtschaftswachstum bremsen würde.

Für Regierungen könnte die Situation nicht klarer sein, um ihre Steuer-, Subventions- und Energiepolitik anzupassen. **Wenn die Investitionen in fossile Brennstoffe nicht bald deutlich erhöht werden, wird eine langanhaltende globale Energiekrise in diesem Jahrzehnt nur schwer zu vermeiden sein.** Dies gilt selbst dann, wenn alle Nachhaltigkeitsziele erreicht werden und die Wind- und Solarkapazität wie geplant oder erhofft weiter zunimmt. Die Auswirkungen der Energieknappheit zeigten sich in den globalen Energiemärkten während des Aufschwungs in Europa und Asien nach der Covid-Krise im Jahr 2021 und des russischen Kriegs gegen die Ukraine im Jahr 2022.

Die Autoren verweisen auf Kiefer 2013 und wiederholen, dass Öl, Kohle, Gas und Uran die primären Energiequellen sind, die die Regierungen und Volkswirtschaften eher antreiben als aushungern. Wie eine echte Nahrungsquelle muss auch eine echte Primärenergiequelle nicht subventioniert werden. Sie muss per Definition ein Vielfaches an Energie (und Wohlstand) liefern, als sie verbraucht, sonst ist sie eine Energiesenke und keine -quelle. Nicht durch Subventionen, sondern durch die Vorteile von eROI, Materialeffizienz und Energiedichte haben sich Öl, Kohle, Gas und Kernkraft trotz hoher Besteuerung und hartem Wettbewerb mit anderen Energiealternativen einen Anteil von über 80% an der globalen Energiewirtschaft erarbeitet.

<sup>6</sup> Quellen in entsprechender Reihenfolge: (1) Telegraph, 2. März 2022 ([Link](#)), (2) Vaclav Smil, 28. Februar 2021 ([Link](#)), (3) The N24, 24. Februar 2022 ([Link](#)), (4) CNN, 18. November 2021 ([Link](#)), (5) Wikipedia, 5. Dezember 2021 ([Link](#)), (6) Bloomberg, 5. Oktober 2021 ([Link](#)), (7) Globe and Mail, 11. Oktober 2021 ([Link](#)), (8) Bloomberg, 18. September 2021 ([Link](#)), (9) Nikkei Asia, 27. September 2021 ([Link](#)), (10) Moneyweb, 8. August 2021 ([Link](#)).



## Quellenangaben

Auf alle Quellenangaben wurde zuletzt am 31. März 2022 zugegriffen; sie sind meist zwischengespeichert, falls sich der Inhalt der Website ändert.

- AGE 2021, AG Energiebilanzen e.V. 2021, Zusatzinformationen, ([Link](#) und [Link](#))
- Air Products 2021, "ACWA Power and NEOM Sign Agreement for \$5 Billion Production Facility", Juli 2020, ([Link](#))
- Agora 2022, Agora Energiewende, Energiewende Deutschland, Stand 2021, ([Link](#))
- Atasu et al. 2021, INSEAD, "The Hidden Cost of Solar Energy", Dez. 2021, ([Link](#)); auch veröffentlicht von Harvard Business Review, HBR, Juni 2021, ([Link](#))
- Barron-Gafford et al. 2016, "The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures", Scientific Reports 6, no. 1. ([Link](#))
- Baruya 2019, ehemals IEA-Clean Coal Center: "The Economic and Strategic Value of Coal", CCC/296, ([Link](#))
- BCG and IEF 2020, "Oil and Gas Investment in the New Risk Environment" ([Link](#)); das Internationale Energy Forum (IEF) ist die weltweit größte internationale Organisation von Energieministerien aus 70 Ländern.
- BCG 2021a, "BCG CEO Guide to Cyber Security", Sept. 2021, ([Link](#))
- BCG 2021b, "Mastering Scale in Renewables", Juni 2021, ([Link](#))
- BCG 2021c: Executive Perspectives: "The time for climate action is now" ([Link](#))
- BfWE 2020, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, EEG in Zahlen: Vergütung, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000-2021 ([Link](#))
- BNEF 2021, Bloomberg New Energy Finance: "Energy Transition Investment Trends", ([Link](#))
- BP 2019, "BP Statistical Review of World Energy 2019", Primary Energy, ([Link](#)); BP spendet TPES/Einwohner mit 75,7GJ/ Einwohner = 21.023 kWh/Einwohner im Jahr 2019.
- BP 2020, "BP Statistical Review of World Energy" 2020, ([Link](#))
- BP 2021, "BP Statistical Review of World Energy 2021", ([Link](#))
- Bossel et al. 2003, "The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?", Cogeneration and Competitive Power Journal Band 18, Ausgabe 3, 2003, ([Link](#))
- Carbajales-Dale et al. 2014, "Can We Afford Storage? A Dynamic Net Energy Analysis of Renewable Electricity Generation Supported by Energy Storage", Energy & Environmental Science 7, Nr. 5, ([Link](#))
- CDIAC 2021, "Historical Carbon Dioxide Record from the Vostok Ice Core", Dez. 2021, ([Link](#))
- CEA 2020, "Central Electricity Authority, Indian coal space requirement from CEA", April 2020, ([Link](#))
- Chen et al. 2019, "The Potential of Photovoltaics to Power the Belt and Road Initiative", Joule 3, ([Link](#))
- EU 2022, "EC Subsidies - Energy Taxation, Carbon Pricing and Energy Subsidies", Jan. 2022, ([Link](#))
- Delannoy et al. 2021, "EROI - peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective", Applied Energy 304, Aug. 2021, 117843, ([Link](#))
- DOE 2015, Department of Energy, Quadrennial Technology Review 2015, S. 390, Tabelle 10.4, Sept. 2015, ([Link](#))
- Economist 2021, The Economist, "The Climate Issue: Hitting 'Net-Zero' by 2050", Newsletter 22, März 2021, ([Link](#))
- EIA 2021, US Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2021, Feb. 2021, ([Link](#))
- Eschenbach, Willie 2017, "The Cruellest Tax Of All | Skating Under The Ice" ([wordpress.com](#)). Detail: Die Energy Information Agency (EIA) sammelt Daten, mit Ausnahme des Benzinverbrauchs. Eschenbach hat die **neuesten Daten** für 2009 gesammelt (Excel Arbeitsmappe). Zahlen zum Benzinverbrauch vom US Bureau of Labor Statistics finden Sie **hier**. Einkommensdurchschnittswerte nach Bevölkerungsgruppen vom US Census Bureau sind **hier** verfügbar.
- Fraunhofer 2022, Fraunhofer Institut, Energie-diagramme, ([Link](#))
- Fujimuri et al. 2020, "An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty, Environ". Res. Lett. 15 114063, ([Link](#))
- Gilder 2018, "Life After Google: The Fall of Big Data and the Rise of the Blockchain Economy", ISBN: 9781621575764, Kapitel 8, ([Link](#))
- Global Wind Atlas 2022, Windkarte, ([Link](#))
- Global Solar Atlas 2022, Solarkarte, ([Link](#))
- GSU 2021, Georgia State University, über Wärmepumpen, Dez. 2021, ([Link](#))
- Greenberg, Andy 2019, "Sandworm – a new era of cyberwar and the hunt for the Kremlin's most dangerous hackers", Nov. 2019, ISBN: 978-0-385-54440-5, ([Link](#))
- H<sub>2</sub>-View 2021, "S9.4bn H<sub>2</sub> Megaproject Set for Namibia", Nov. 2021, ([Link](#))
- Harvey, Fiona 2021, The Guardian, Mai 2021, ([Link](#))
- Haverd et al. 2019, "Higher than Expected CO<sub>2</sub> Fertilization Inferred from Leaf to Global Observations", Global Change Biology 26, Nr. 4, (Nov. 2019): 2390–2402. ([Link](#))
- HC Group 2021, Hydrogen: "Hope, Hype and Thermodynamics with Paul Martin", Okt. 2021, ([Link](#))
- Idso, Craig 2021, umfangreiche Liste Peer-Reviewed wissenschaftlicher Arbeiten, die die CO<sub>2</sub> Düngung bestätigen, CO<sub>2</sub> Science ([Link](#) & [Link](#))
- IEA 2019a, "Is Exponential Growth of Solar PV the Obvious Conclusion?" by Brent Wanner, Feb. 2019, ([Link](#))
- IEA 2019b, "Installed power generation capacity in the Stated Policies Scenario", Nov. 2019, ([Link](#))
- IEA 2019c, "Statistics Questionnaire FAQ", Nov. 2019, ([Link](#))
- IEA 2020a, "World Energy Investments 2020", ([Link](#))
- IEA 2020b, "World Energy Outlook 2020", ([Link](#))
- IEA 2020c, "Projected Costs of Generating Electricity 2020", Dez. 2020, ([Link](#))
- IEA 2020d, "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions", Mai 2021, ([Link](#))
- IEA 2021a, "Key World Energy Statistics", Sept. 2021, ([Link](#))
- IEA 2021b, "World Energy Investments 2021", ([Link](#))
- IEA 2021c, "Electricity Market Report", Juli 2021, ([Link](#))
- IEA 2021d, "World Energy Outlook 2021", ([Link](#))
- IEA 2021e, "Net Zero by 2050 – Analysis", Mai 2021, ([Link](#))
- IEA 2022a, "Energy transitions require innovation in power system planning", Jan. 2022, ([Link](#))
- IEA 2022b, "Electricity market report", Jan. 2022, ([Link](#))
- IEEJ 2020, Institute of Energy Economics Japan, "IEEJ Energy Outlook 2020", Jan. 2020, ([Link](#))
- IEEJ 2021, Institute of Energy Economics Japan, "IEEJ Energy Outlook 2021", Okt. 2020, ([Link](#))
- IMF 2021, "A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies", Sept. 2021, ([Link](#))
- IRENA 2020, "Energy Subsidies - Evolution in the Global Energy Transformation to 2050", ([Link](#))
- IRENA 2021, "World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway", Juni 2021, ([Link](#))
- Kahn et al. 2021, "Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change" Energy Economics 104, ([Link](#))
- Kemfert, Claudia 2021, Translated from Prof. Kemfert in RND, "Wasserstoff ist nicht das neue Öl", Sept. 2021, ([Link](#))
- Kiefer, Capt. Ike 2013, "Twenty-First Century Snake Oil", Feb. 2013, ([Link](#)), siehe Seite 6, Abschnitt 3.3 über Wasserstoff und Seite 15, Abschnitt 5 über eROI
- Kis et al. 2018, "Electricity Generation Technologies: Comparison of Materials Use, Energy Return on Investment, Jobs Creation and CO<sub>2</sub> Emissions Reduction", Energy Policy 120, ([Link](#))
- Kober et al. 2020, "Global energy perspectives to 2060 – WEC's World Energy Scenarios 2019", Energy Strategy Reviews 31: 100523, ([Link](#))
- Lomborg, Bjorn 2020, "Welfare in the 21st century, Technological Forecasting & Social Change" 156 (2020) 119981, ([Link](#))
- Lu et al. 2020, "Impacts of Large-Scale Sahara Solar Farms on Global Climate and Vegetation Cover", Geophysical Research Letters 48, e2020GL090789, ([Link](#))
- Manheimer, Wallace 2022, "Civilization Needs Sustainable Energy – Fusion Breeding May Be Best", Journal of Sustainable Development 15, Nr. 2: Seite 98, ([Link](#))
- Mearns, E. 2016, "eROI for Beginners", Energy Matters (blog), ([Link](#))
- Miller, L. and Keith, D. 2018, "Climatic Impacts of Wind Power", Joule 2, ([Link](#))
- McKinsey 2018, "Automation and the Workforce of the Future", Mai 2018, ([Link](#))
- McKinsey 2021, "Global Energy Perspectives 2021", ([Link](#)), und "... 2019", ([Link](#))
- McKinsey 2022, "The Net-Zero Transition: Its Cost and Benefits", Jan. 2022, ([Link](#))
- Morris et al. 2019, "A manganese hydride molecular sieve for practical hydrogen storage under ambient conditions", Energy & Environmental Science, Ausgabe 5, 2019, ([Link](#))
- Murphy, Laura and Nyrola Elima 2021, "In Broad Daylight - Uyghur Forced Labour in the Solar Supply Chain", Sheffield Hallam University, Mai 2021, ([Link](#))
- NASA 2019, "NASA Earth Observatory 2019", Online 2021, ([Link](#))
- NDR3 2020, Nord Deutscher Rundfunk - Extra 3, "Ein Gaskraftwerk in Fröhrente", März 2019, ([Link](#) und [YouTube](#))
- Nordhaus, Ted 2018, "Projections and Uncertainties about Climate Change", American Economic Journal, Vol. 10, No. 3, ([Link](#))
- NU 2020, Northwestern University, "Gas storage method could help next-generation clean energy vehicles", ([Link](#))
- OECD NEA (2018), "The Full Costs of Electricity Provision", OECD Publishing, Paris, ([Link](#))
- OurWorldInData 2020, Energy Mix, Nov. 2020, ([Link](#))
- OurWorldInData 2021, "World Population Growth", Our World in Data basierend auf HYDE, UN und UN Population Division (2019 Revision), ([Link](#))
- Pielke, R. and Richie, J. 2021, "Distorting the View of Our Climate Future", Energy Res. & Social Sci. 72: 101890, ([Link](#))
- PV-Mag 2022, "World Has Installed 1TW of Solar Capacity", pv magazine International, März 2022, ([Link](#))
- Polimeni et al. 2015, Book, "The Myth of Resource Efficiency: The Jevons Paradox", ISBN 978-1-138-42297-1, ([Link](#))
- REN21 2021, "Renewables Global Status Report", ([Link](#))
- Ruhnau, O. and Qvist, S. 2021, "Storage requirements in a 100% renewable electricity system: Extreme events and inter-annual variability", Arbeitspapier, ZBW - Leibniz Info. Centre for Econ., ([Link](#))
- Schernikau, L. and Smith, W. 2021, "Solar in Spain to Power Germany", SSRN Electronic Journal, April 2021, ([Link](#))
- Schernikau, L. and Smith, W. 2022, "Climate impacts of fossil fuels in today's electricity systems", SAImm Vol. 122, No. 3, März 2022, (SSRN [Link](#) und [YouTube](#))
- Smil, Vaclav 2016, "Energy Transitions: Global and National Perspectives", ([Link](#))
- Smil, Vaclav 2017, "Energy and Civilization: A History", ISBN 0262035774, ([Link](#))
- Smith, W. and Schernikau, L. 2022, "An introduction to wind and wind turbines", unveröffentlichter Entwurf, SSRN Electronic Journal, April 2022, ([Link](#))
- S&P 2021, S&P Platts, Coal Trader International, 29. Dez. 2021
- Soon et al. 2015, "Re-evaluating the role of solar variability on Northern Hemisphere temperature trends", Earth-Science Reviews 150, 409–52, ([Link](#))
- Supekar, S. and Skerlos, S. 2015, "Reassessing the Efficiency Penalty from Carbon Capture in Coal-Fired Power Plants", Environmental Science & Technology 49, ([Link](#))
- Take 2021, "Options for energy storage, 100% Renewable UK", Okt. 2021, ([Link](#))
- Tranosjlika et al. 2021, "Advanced Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plant with Post-Combustion Carbon Capture", Sustainability 12(2), 801, ([Link](#))
- UN-COP26 2021, UN Climate Change Conference (COP26), Glasgow 2021, "Global Coal to Clean Power Transition Statement", Nov. 2021, ([Link](#))
- University of Texas 2018, "Full Cost of Electricity", Energy Institute, The University of Texas at Austin, April 2018, ([Link](#))
- Voosen 2021, "IPCC Confronts Implausibly Hot Forecasts of Future Warming", Science, AAAS, Juli 2021, ([Link](#))
- WEF 2019, Weltwirtschaftsforum 2019, Video zur Vegetationsdichte, ([Link](#))
- WEF 2020, Weltwirtschaftsforum, Diagramme zur globalen Energieversorgung, Sept. 2020, ([Link](#))
- Weissbach et al. 2013, "Energy intensities, EROIs, and energy payback", Energy 52, S. 210-221, ([Link](#))
- Wijngaarden, W. A. and Happer, W. 2020, "Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant GHGs", arXiv:2006.03098 [physics], ([Link](#))
- Willuhn, Marian 2022, pv-magazine, "Satellite Cyber Attack Paralyzes 11GW of German Wind Turbines", ([Link](#))
- WMO 2021, World Meteorological Organization, "Greenhouse gases", ([Link](#))
- Wolf, Bodo 2021, "Der Beitrag der Menschen zur Erwärmung der Biosphäre sind nicht Kohlendioxid- sondern Wärmeemissionen", Dez. 2021
- Wood Mackenzie 2022, "No Pain, No Gain – the Economic Consequences of Accelerating the Energy Transition", Jan. 2022, ([Link](#))
- Zalk, J. and Behrens, P. 2018, "The Spatial Extent of Renewable and Non-Renewable Power Generation", Energy Policy 123, ([Link](#))
- Zhu et al. 2016, "Greening of the Earth and Its Drivers", Nature Climate Change 6, Nr. 8 (August 2016): 791–95, ([Link](#))