

# ZUM EINFLUSS ANTHROPOGENER ABWÄRME AUF DIE KLIMAERWÄRMUNG DER ATMOSPHERE

Klaus Rüd, Consulting Propulsion and Technology, München, Deutschland  
Dieter Scholz, Aircraft Design and Systems Group (AERO), HAW Hamburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Anthropogene Abwärme erweist sich als weiterer, nicht zu unterschätzender Einflussparameter für den Klimawandel. Derzeitige Untersuchungen und Veröffentlichungen konzentrieren sich auf den Klimaeinfluss durch Sonneneinstrahlung in Verbindung mit atmosphärischer Luftverschmutzung (CO<sub>2</sub>, ...). Sie bewerten die damit verbundene Temperaturerhöhung unmittelbar an der Erdoberfläche. In dieser Betrachtung wird die Bedeutung der anthropogenen Abwärme als vernachlässigbar eingestuft und erst in langfristiger Zukunft als Gefährdungsparameter gesehen.

Es gibt aber auch Analysen, die darauf hinweisen, dass selbst bei Klärung der Klima-Abgasproblematik (CO<sub>2</sub>..), das Abwärmeproblem weiter bestehen wird, denn auch bei der Nutzung von Atom- und Solar-energien erfolgt eine permanente Energiezufuhr an unsere Umwelt. Fossile Kraftwerke werden lediglich durch Abgas vermeidende Nutzenergieerzeuger ersetzt.

Auf der Basis grundlegender thermodynamischer Analysen werden hier Abschätzungen zum potenziellen Einfluss von Abwärme aus Industrie, Heizung (Haushalt), Gewerbe und Verkehr auf die Temperaturerhöhung der Atmosphäre vorgestellt, unter Einbeziehung der Auswirkung zukünftiger synthetischer Brennstoffe, wie sie derzeit für Straßenverkehr und Luftfahrt diskutiert werden.

Ausgehend von der in den vergangenen Jahrzehnten meteorologisch beobachteten Klimaerwärmung an der Erdoberfläche von im Mittel 0,02 °C pro Jahr weltweit, werden durch die anthropogene Abwärme Temperaturerhöhungspotenziale der Atmosphäre in der gleichen Größenordnung und höher identifiziert. Besonders stark ist dieser Abwärme Effekt im Bereich der Nordhalbkugel, wo auch der größte Energieverbrauch vorliegt. Die Analysen hierzu ergeben je nach Betrachtungsweise (globaler Mittelwert oder Nordhalbkugel) ein Klimaerwärmungspotenzial von 0,06 °C p.a. bis 0,23 °C p.a., was die beobachtete Klimaerwärmung von 0,02 °C p.a. an der Erdoberfläche deutlich übersteigt.

Auch für die Luftfahrt erscheint eine Substitution von Kerosin durch umweltfreundlichere synthetische Brennstoffe (LH<sub>2</sub>) im Hinblick auf Abwärme nicht vernachlässigbar. Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch SAF (LH<sub>2</sub>) hat die zusätzliche Abwärmefreisetzung das Potenzial, die atmosphärische Klimaerwärmung, um bis zu 7 % zu beschleunigen. Hauptursache ist die Abwärme bei der Brennstoffherstellung. Bei den vorgesehenen, niedrigen Einführungsgeschwindigkeiten bleiben diese SAF-Effekte allerdings vorerst noch gering. Die Abwärmeerzeugung bei Einführung synthetischer Brennstoffe im Straßenverkehr wäre abhängig vom Einführungsgrad erheblich größer. Sie wäre um das 6,5-fache größer als bei vollständiger Substitution von Kerosin in der Luftfahrt.

Die hier ermittelten anthropogenen Abwärmeeffekte beschreiben nur theoretische Potenziale und Größenordnungen zum Klimaeinfluss. Inwieweit diese Wärme die Atmosphäre nach außen ins Weltall verlässt, in Meere und Kontinente eindringt, und letztlich tatsächlich zur finalen Lufterwärmung beiträgt, ist offen. Sie bedarf weiterer Klärung durch Klimaexperten. Vorliegende Untersuchungen bilden einen Anstoß zur detaillierteren Betrachtung hierzu, auch im Hinblick auf die Einführung alternativer Brennstoffe für Luftfahrt und Straßenverkehr.

## Keywords

Luftfahrt; Brennstoff; SAF; LH<sub>2</sub>; Abwärme; Klima; Klimawandel; Atmosphäre

## 1. HINTERGRUND UND PROBLEMSTELLUNG

### 1.1 Klimarelevante Einflüsse synthetischer Brennstoffe

Ursächlich für die vorliegenden Überlegungen und Abschätzungen war die Frage nach der Umweltverträglichkeit zukünftiger synthetischer Brennstoffe für Luftfahrt und Straßenverkehr. Hierzu gehören Brennstoffe die mittels Power-To-Liquid (PTL) oder Sun-To-Liquid (STL) aus regenerativen Energiequellen hergestellt werden. Typische Vertreter sind der derzeit hochaktuelle LH2 Brennstoff oder die synthetischen Benzin, Diesel- oder Kerosinbrennstoffe, die mittels H<sub>2</sub>-Elektrolyse, Carbon Capture und Fischer Tropsch Synthese erzeugt werden, wie in Bild 1.1 dargestellt. Die in Bild 1.1 angeführten Umsetzungswirkungsgrade in den einzelnen Prozessschritten kennzeichnen die Effizienz der Herstellung.

Die Beispiele in Bild 1.1 zeigen anhand der aufgeführten Fuel-To-Thrust Umsetzungswirkungsgrade, dass bei der Bereitstellung alternativer Brennstoffe ein im Schnitt um den Faktor 3 höherer Energieaufwand benötigt wird als bei herkömmlichen fossilen Brennstoffen. Die hohen Energieaufwände zur Brennstoffherstellung können trotz der prognostizierten Prozessverbesserungen nur durch den Übergang zu elektrischen Antrieben eingedämmt werden (Bild 1.1). Elektrische Antriebe sind nach vorliegendem Ermessen die effizienteste Form der Umsetzung regenerativer Energien. Aufgrund des hohen Batteriegewichtes ist die Anwendbarkeit in der Luftfahrt derzeit jedoch nur für Kleinflugzeuge mit geringer Reichweite möglich.

Es ist davon auszugehen, dass auch bei synthetischer Brennstoffherzeugung die nicht in Arbeit umgesetzte Energie in Abwärme übergeht. Bei 3-fachem Primärenergiebedarf sind auch die Abwärmemengen entsprechend grösser.

Bei der LH<sub>2</sub>-Bereitstellung mittels Elektrolyse ergeben sich gegenüber Kerosin die erhöhten Abwärmemengen, vor allem durch die Elektrolyse, die Gasverflüssigung und den Brennstoffvertrieb bzw. den Brennstofftransport (Bild 1.1). Der erhöhte Transportaufwand resultiert aus den um den Faktor 4 niedrigeren volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff und den damit verbundenen größeren Transportvolumina gegenüber Kerosin. Die Anzahl der Transportvorgänge bzw. Förderaufwände in Pipelines müssen dementsprechend erhöht werden.

Gegenüber der LH<sub>2</sub>-Treibstoffherstellung ist die in Bild 1.1. ebenfalls dargestellte synthetische Kerosinherstellung über Elektrolyse, Carbon Capture und Fischer Tropsch deutlich komplexer, aber energetisch vergleichbar. Es wird prognostiziert, dass lang-

fristig diese synthetische Kerosinherstellung vom Energiebedarf her sogar etwas effizienter werden könnte als die gegenwärtige LH<sub>2</sub> Herstellung, zumal der Fischer Tropsch Prozess eher exotherm abläuft und Verteilung/Transport des Treibstoffes herkömmlich effizient gestaltet werden kann. Am energieintensivsten erscheint bei diesem Verfahren der Carbon Capture Aufwand.

Ein drittes, noch prägnanteres Beispiel zur Verdeutlichung der mit synthetischer Brennstoffherstellung verbundenen Umweltbelastung wird in Bild 1.2 beschrieben. Bei diesem Sun-To-Liquid (STL) Prozess wird Solarenergie konzentriert und über thermochemische Hochtemperaturprozesse synthetisches Kerosin und Naphtha (Beiprodukt) erzeugt.

Im Gegensatz zur Herstellung über H<sub>2</sub>-Elektrolyse werden hier aufbereitetes H<sub>2</sub>O und über Carbon Capture aufgefangenes CO<sub>2</sub> thermisch zu H<sub>2</sub> und CO als Synthesegase umgewandelt, und daraus anschließend über Fischer-Tropsch und Hydro-Cracking synthetisches Kerosin hergestellt. Dazu werden aus der solaren Primärenergie für die erforderlichen hohen Prozesstemperaturen (1900 K) sehr hohe Mengen an thermischer und elektrischer Energie benötigt. Der Gesamtwirkungsgrad ((Kerosin + Naphtha) / Primärenergie) liegt derzeit bei lediglich ca. 5 % bis 8 %. Dabei kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die restlichen 92 % bis 95 % der eingesetzten Primärenergie (Sonnenenergie) in Abwärme übergehen, hauptsächlich aufgrund der aufwendigen CO<sub>2</sub> Capture- und H<sub>2</sub>/CO Synthesegasherstellprozesse.

### 1.2 Anthropogene Abwärme und bisheriges Klimaverständnis

Um die climatechnische Bedeutung der Abwärme aus der Erzeugung alternativer Brennstoffe bewerten zu können, ist eine Betrachtung der gegenwärtig insgesamt anfallenden Abwärme aus Industrie, Gewerbe, Haushalt, Verkehr, etc. sowie eine Bewertung des gegenwärtigen Klimaverständnisses notwendig.

Bisherige Analysen zur Klimaerwärmung (Bild 1.3) beruhen hauptsächlich auf der Modellierung und Bilanzierung des Strahlungsaustausches zwischen Weltall und Erde unter Berücksichtigung zusätzlich verursachter Erwärmungen durch Treibhausgas (z. B. CO<sub>2</sub>).

Die Berücksichtigung der konvektiven Abwärme aus Heizung, Industrie und Verkehr fließt dabei nicht ein; sie wurde in gängigen Umweltberichten als nur regionale Erscheinungen und für das Gesamtklima als unbedeutend erklärt. Begründung: Der Wärmeeinfall durch Strahlung aus dem Weltall (Sonne) ist um das

$10^4$ -fache intensiver als die vom Menschen generierte anthropogene Abwärme.

Bild 1.4 zeigt hierzu die für die anthropogene Abwärme ermittelten Ergebnisse von Flanner [2]. Der anthropogene/konvektive Abwärmeeintrag konzentriert sich hauptsächlich auf die bevölkerungs- und -industriereichen Bereiche zwischen dem 20. und 60. Breitengrad.

Die dabei anfallenden Wärmeeinträge steigen lokal bis zu  $4 \text{ W/m}^2$  und langfristig auf  $6 \text{ W/m}^2$  an, wobei diese höher mit Abwärme belasteten Zonen die naheliegenden Gebirgs- und Gletscherbereiche erfassen bzw. tangieren können. In den weniger bevölkerten und industrialisierten Gebieten liegt der Wärmeeintrag unter  $0,2 \text{ W/m}^2$ . Für die zukünftige Zunahme der Industrialisierung und Bevölkerung werden zusätzliche, nicht unbeträchtliche Steigerungen dieser Abwärmeeinträge vorhergesagt (siehe Bild 1.4, Vergleich 2040 mit 2005).

Es gibt Analysen [11], die darauf hinweisen, dass selbst bei Klärung der Klimagasproblematik ( $\text{CO}_2$ ), das Abwärmeproblem uns langfristig weiter verfolgen wird.

Bei der Nutzung von regenerativer Energie in Haushalt, Industrie und Verkehr wird weiterhin Abwärme erzeugt, die konvektiv in die Atmosphäre einfließt. Bei Nutzung von Windenergien wird dem Windsystem Energie entzogen, die ansonsten durch Reibung an der Erdoberfläche dissipieren würde. Die entzogene Windenergie wird nach Nutzung dem Planeten als Abwärme wieder zugeführt. Dieser Vorgang ist hinsichtlich der Energiebilanz neutral, die Abwärme kann aber Rückwirkung auf die Temperaturerhöhung der Atmosphäre haben, mit entsprechenden Konsequenzen für Klima, Fauna und Flora. Genauso verhält es sich bei der Wasserkraft. Anders sieht es jedoch aus, wenn große dunkle Solarfelder Sonnenenergie aufnehmen, die ansonsten durch hellere Oberflächen in den Weltraum reflektiert worden wäre. Die gewonnene Solarenergie wird nach Nutzung dem Planeten als Abwärme zusätzlich zugeführt. Fossile Kraftwerke werden in diesem Fall durch eine abgasschonende Energiequelle ersetzt, die Abwärmeproblematik bleibt aber weitgehend bestehen.

In vorliegendem Beitrag werden auf der Basis des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik aus den bekannten Verbräuchen an Primärenergie die daraus resultierenden Abwärmemengen zur atmosphärischen Temperaturerhöhung abgeleitet und den Ergebnissen der terrestrischen Strahlungsbilanzen der Klimaexperten gegenübergestellt. Im Anschluss daran wird eine Bewertung des potenziellen Beitrags durch neue, synthetische Brennstoffe vorgenommen.

Es können hier anhand der ermittelten Abwärmemengen nur potenzielle Ausmaße zur atmosphärischen Klimaerwärmung angegeben werden. Eine Aussage, wieviel dieser Energie in der Atmosphäre verbleibt und weder durch direkte Abstrahlung ins All oder durch Übertragung ins Erdreich, in Wasser und Meere abfließt, bleibt offen. Die Umsetzung in verbleibende atmosphärische Temperaturerhöhung kann an dieser Stelle aufgrund fehlender Fachkenntnisse und Daten nur qualitativ interpretiert werden. Eine präzisere Aussage erfordert eine genauere Untersuchung und Unterstützung durch Meteorologie- und Klimaexperten.

## 2. ATMOSPHERISCHE KLIMAERWÄRMUNGSPOTENZIALE AUFGRUND FOSSILER PRIMÄRENERGIEVERBRENNUNG

### 2.1 Vorgehensweise und Berechnungsmethoden

Zur Einstufung der Bedeutung von Abwärme aus neuer synthetischer Brennstoffproduktion wird in diesem Abschnitt das Ausmaß der weltweit aus Industrie, Haushalten, Gewerbe und Verkehr

anfallenden Abwärmemengen ermittelt. Zusätzliche Einflüsse aus Vulkanausbrüchen, den zunehmenden Waldbränden oder Sahara-Wind Phänomenen werden nicht berücksichtigt.

Es wurden die verfügbaren Daten über die weltweit verbrauchten fossilen Primärenergiemengen eruiert und anhand von Umsetzungswirkungsgraden in Nutz- und Abwärmeenergie aufgeteilt. In der Thermodynamik wird hierfür der Thermodynamische Wirkungsgrad oder Nutzungsgrad verwendet.

$$\eta = \frac{A}{Q} \quad (1)$$

$$Q_{ab} = (1 - \eta) \cdot Q_{zu} \quad (2)$$

$\eta$  : Wirkungsgrad;  $A$  : in Arbeit umgesetzte Energie;  $Q_{zu}$  : zugeführte Primärenergie;  $Q_{ab}$  : Abwärme.

$Q_{ab}$  ist gleichbedeutend mit der Enthalpiezufuhr in die Atmosphäre.

$$Q_{ab} = \Delta H = M \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

$\Delta H$  : Änderung der Enthalpie (der Atmosphäre);  $M$  : Luftmasse (der Atmosphäre);  $c_p$  : spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (da in der Atmosphäre die Luft sich ungehindert ausdehnen kann, gilt hier  $c_p$ );  $\Delta T$  : Temperaturerhöhung der Atmosphäre.

Aus den Gleichungen (1) bis (3) lässt sich die resultierende potenzielle Aufheizung der Atmosphäre berechnen.

$$\Delta T = \frac{Q_{ab}}{M \cdot c_p} \quad (4)$$

Die Gesamtmasse der Erdatmosphäre beträgt  $5,15 \cdot 10^{18}$  kg [12]. Im Hinblick auf die Höhenabhängigkeit ist deren ungleichmäßige Massenverteilung zu berücksichtigen [13]:

- 90 % der Atmosphäre liegen unter 20 km Höhe.
- 70 % der Atmosphäre liegen unter 10 km Höhe.
- 55 % der Atmosphäre liegen unter 5 km Höhe.

Das Ergebnis folgt dem in Bild 2.1 gezeigten Schema, wobei ein repräsentativer Umsetzungswirkungsgrad  $\eta$  (eta) aus Primärenergie-Verbrauchsstatistiken noch abzuleiten ist. Je geringer der Umsetzungswirkungsgrad, desto grösser die Abwärmeerzeugung und das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial.

Die aus der konvektiven Abwärme berechneten Temperaturerhöhungspotenziale der Atmosphäre werden anschließend den beobachteten bzw. gemessenen atmosphärischen Temperaturerhöhungen gegenübergestellt (Bild 2.2a und 2.2b).

Die gemessenen Erwärmungen der vergangenen 50 Jahre liegen im Schnitt bei etwa  $0,02$  °C p.a. an der Erdoberfläche bzw. in unmittelbarer Oberflächennähe. Leider ist der hierfür relevante Oberflächenabstand, über den sich dieser Bereich erstreckt, nicht näher definiert. In vorliegendem Fall wird die potenzielle Erwärmung der Atmosphäre durch Abwärme für 5,10 und 20km Höhe (Atmosphärendicke) berechnet und diesem Trend aus Bild. 2.2 gegenübergestellt.

Als Referenz für vorliegende Untersuchungen wurde das Jahr 2015 gewählt (Bild 2.3 und 2.4), da hierfür eine detailliertere Aufgliederung der Energieverbräuche nach Energieträger gefunden werden konnte.

Der für 2015 ermittelte Primärenergieverbrauch liegt bei ca. 550 EJ (1 Exajoule =  $10^{18}$  J). In Bild 2.4 ist der Primärenergieverbrauch auf die einzelnen Energieträger aufgeteilt.

In die für die Abwärme relevanten Energieträger wurde neben Kohle, Erdgas, Erdöl auch die Kernenergie (Kernkraftwerksabwärme) einbezogen. Kernkraft ist im Hinblick auf Abwärme nicht klimaneutral. Die erneuerbaren Energien (Wind, Wasser, Solar) wurden abgezogen, weil sie sich hinsichtlich der Abwärme teilweise neutral verhalten. Damit re-

duziert sich der abwärmerelevante Primärenergieverbrauch um ca. 10 %, von 551 EJ auf etwa 495 EJ.

## 2.2 Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade

Die hier durchgeführte Analyse beschreibt das resultierende Potenzial, mit der die anfallende Abwärme aus Haushalt, Industrie, Gewerbe und Verkehr zu einer Temperaturerhöhung der Atmosphäre beitragen kann. Das Potenzial beschreibt die Temperaturerhöhung, die durch den klimaschädlichen Energieausstoß an Abwärme in der Atmosphäre maximal auftreten würde, wenn keine Übertragung dieser Abwärme in den Boden, in die Flüsse, Seen und Meere oder Abstrahlung ins All stattfinden würde (vereinfachte, rein adiabate Betrachtung).

Ausschlaggebend hierfür ist der in Abschnitt 2.1 definierte Umsetzungswirkungsgrad der Primärenergie, der angibt, in welchem Umfang die Primärenergie in Abwärme oder in Arbeit umgewandelt wird.

Die Abschätzung eines mittleren Umsetzungswirkungsgrades wurde stellvertretend anhand der umfangreich verfügbaren Energiedaten für Deutschland im Jahr 2017 und 2018 durchgeführt. Basis hierzu sind die in Bild 2.5 bis Bild 2.7 nach Sektoren aufgliederten Endenergieverbräuche und die mit Hilfe von Bild 2.8 abgeleiteten Umsetzungswirkungsgrade von Primär- zu Endenergie.

Bei der Betrachtung solcher Energiebilanzen muss der Übergang von Primärenergie zu Endenergie zwischengeschaltet werden. Dieser Übergang beschreibt die Umwandlung in Strom, Rohstoffförderung und Aufbereitung, Mineralölherstellung (Well-to-Tank), Transport, bevor diese Energie in Haushalt, Verkehr, Industrie genutzt werden kann. Für Deutschland liegt dieser Umsetzungswirkungsgrad im Mittel bei ca. 70 %. Dieser Wert wurde in erster Näherung pauschal als Referenz verwendet [21]. Für die Bereiche Haushalt und Verkehr erzeugt dies eine gewisse Unschärfe, mit der Folge, dass die Umsetzungswirkungsgrade eher zu hoch berechnet werden.

Bild 2.9 zeigt die ermittelten Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade. Die höchsten Umsetzungswirkungsgrade bezogen auf den Primärenergieverbrauch ergeben sich aufgrund höchster Wirtschaftlichkeitsanforderungen und der nicht als Verlust berechneten Prozesswärmeanteile für die Industrie (77 %); die geringsten Umsetzungswirkungsgrade fallen wegen des hohen Raumwärmeanteils auf die Haushalte (27 %). Die Analyse ergab einen mittleren Umsetzungswirkungsgrad über alle Energiesektoren von ca 46,5 %.

Global gesehen ist dieser Wert eher optimistisch, da der hohe industrielle Anteil Deutschlands mit relativ hohen Nutzungsgraden in den meisten Ländern dieser Erde nicht vorliegt. Andererseits ist der Abwärmeeinfall beim Übergang von Primär- zu Endenergie relativ hoch angesetzt. Dennoch deutet diese Abschätzung an, dass die verbrauchte Primärenergie in der Größenordnung von 50 % in die Aufheizung unserer Atmosphäre übergeht.

Es gibt andere Veröffentlichungen [10], in denen sogar die vollständige Umwandlung der Primärenergie in Wärme angenommen wird. Beispiel Verkehr: Nachdem die Abwärme des Antriebs in die Atmosphäre gegangen ist wird das Fahrzeug mit der restlichen Energie angetrieben. Jedoch geht auch diese Energie letztlich über die Fahrwiderstände als Reibungswärme in die Atmosphäre. Andererseits, nicht alle Energie benötigten Prozesse sind energierückgewinnend, wie z. B. chemische Umwandlungsprozesse oder thermische Umformprozesse. Der tatsächliche Umsetzungswirkungsgrad wird unter dem für diese Betrachtung konservativ angenommenen Wert liegen.

### 2.3 Klima-Erwärmungspotenziale für die Primärenergieverbräuche im Jahr 2015

Die auf Basis der weltweiten Primärenergieverbräuche von 2015 (Bild 2.4) errechneten atmosphärischen Temperaturerhöhungspotenziale sind in Bild 2.10 und Tabelle 2.1 quantifiziert. Die Daten beschreiben die durch die Abwärme zu erzielende Temperaturerhöhung der Atmosphäre bei rein adiabater Betrachtung. Die Darstellung erfolgt wie in Bild 2.9 parametrisch über dem Energieumsetzungswirkungsgrad  $\eta$  (eta). Zusätzlich sind die Berechnungen für unterschiedlichen Atmosphärendicken aufgeführt, über die sich die Abwärme ausbreiten könnte (5 km, 10 km, 20 km). Vergleichend hierzu ist auch die meteorologisch beobachtete Klimaerwärmung von 0,02 °C in Erdoberflächennähe aufgetragen.

Für den ermittelten Umsetzungswirkungsgrad von ca. 46,5 % fallen vom gesamten relevanten Primärenergieverbrauch ( $4,94 \cdot 10^{20}$  J) ca. 54 %, d.h. ca.  $2,6 \cdot 10^{20}$  J an Abwärme an. Hierfür liegt das Temperaturerhöhungspotenzial zwischen 0,058 °C p.a. und 0,092 °C p.a., je nach betrachteter Erdatmosphärenschichtdicke, über die die Temperaturerhöhung gemittelt wird. Da die Abwärme mit Ausnahme des Flugverkehrs eher im unteren Atmosphärenbereich abgegeben wird, erscheint der Bereich zwischen 5 km und 10 km mit 0,067 bis 0,092 °C p.a. angemessener.

Zur Abschätzung zukünftiger Tendenzen sind in Bild 2.11 Temperaturerhöhungspotenziale als Funk-

tion der jeweiligen Primärenergieverbräuche dargestellt.

Im Vergleich zu den meteorologisch beobachteten Klimaerwärmungen (0,02 °C p.a.) erscheint die anthropogene Abwärmeeinzufuhr in die Atmosphäre deutlich stärker. Für eine der Messung adäquaten atmosphärischen Temperaturerhöhung von 0,02 °C p.a. dürften bei dieser adiabaten Betrachtung die Abwärmemengen nicht größer als 20 % bis 30 % der hier für 2015 ermittelten Abwärmemengen sein. Statt  $2,6 \cdot 10^{20}$  J dürften höchstens  $1,0 \cdot 10^{20}$  J an Abwärme anfallen (Bild 2.12).

### 2.4 Abwärmeeinflüsse im Bereich der nördlichen Erdhalbkugel

Die Abschätzung des Abwärmeeinflusses wird auf die nördliche Halbkugel der Erde erweitert, zumal hier Verkehr, Industrie und Bevölkerung am höchsten konzentriert sind. Es wurde der Bereich zwischen dem 30. und 60. Breitengrad ausgewählt (Bild 2.13).

Die in diesem Bereich anfallenden Primärenergieverbräuche liegen zwischen 50 % und 60 % der Weltgesamtverbräuche [22]. Dabei wurden China nur zur Hälfte und Indien überhaupt nicht eingerechnet. Die Emission findet auf einer Erdoberfläche statt, die nur 20 % der gesamten Erdoberfläche (Landmasse) der Erde darstellt (Bild 2.13).

Die zugehörigen atmosphärischen Temperaturerhöhungspotenziale sind in Bild 2.14 gezeigt. Die atmosphärischen Temperaturerhöhungspotenziale bei einem mittleren Umsetzungswirkungsgrad von 46,5% steigen dadurch um den Faktor 2,5 von 0,058 bis 0,092 °C p.a. auf 0,14 bis 0,23 °C p.a. an. Gegenüber dem global beobachteten Mittelwert von 0,02 °C p.a. an der Erdoberfläche sogar um den Faktor 7 bis 11,5, je nach zuzuordnender Wärmeausbreitungshöhe (5 km, 10 km, 20 km).

In Tabelle 2.2 sind die Ergebnisse für den errechneten Umsetzungswirkungsgrad (46,5%) nochmals zusammengefasst. Als Ergänzung zu den Wärmemengen sind die in der Klimaforschung üblichen Wärmeübertragungsleistungen in ( $W/m^2$ ) aufgeführt.

Die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse deuten grundsätzlich darauf hin, dass die atmosphärische Klimaerwärmung durch die Abwärme aus Gewerbe, Industrie, Haushalt und Verkehr im Vergleich zu den publizierten 0,02 °C p.a. an der Erdoberfläche nicht zu unterschätzen ist – insbesondere auf der Nordhalbkugel.

### 3. KLIMABILANZ UNTER BERÜCKSICHTIGUNG ANTHROPOGENER ABWÄRME

#### 3.1 Atmosphärische Klimaerwärmung aus bisherigen Untersuchungen (IPCC)

Die Bedeutung der Abwärme wird derzeit im Allgemeinverständnis der Klimaexperten nicht wahrgenommen. Ihre geringe Bedeutsamkeit wird in der Regel damit begründet, dass die anthropogene Abwärme um mehrere Größenordnungen kleiner ist als der Strahlungseinfall aus dem Weltall. Entscheidend für den Abwärmebeitrag ist jedoch der Vergleich mit der Differenz zwischen Ein- und Abstrahlung (Imbalance) und diese ist um Größenordnungen geringer, zumal die Abstrahlung von der Erde ins Weltall von der gleichen Größenordnung ist wie die Einstrahlung.

Bild 3.1 zeigt dies anhand der Strahlungsbilanz nach IPCC. Vergleicht man für das in Bild 3.1 dargestellte Kontrollvolumen die ein- und abfließenden Energieströme, so ergibt sich folgende Bilanz:

• Einstrahlung:	+340 W/m <sup>2</sup>	(5,460 · 10 <sup>24</sup> J p.a.)	100,0 %
• Abstrahlung:	+339 W/m <sup>2</sup>	(5,444 · 10 <sup>24</sup> J p.a.)	99,7 %
• Imbalance:	-0,6 W/m <sup>2</sup>	(0,0096 · 10 <sup>24</sup> J p.a.)	0,176 %
• Bilanzlücke:	-0,4 W/m <sup>2</sup>	(0,0064 · 10 <sup>24</sup> J p.a.)	0,124 %

Die in Bild 3.1 dargestellte Imbalance Energie von 0,6 W/m<sup>2</sup> (0,176 %) ist nach offiziellem Verständnis die aus dem Strahlungsgaustausch verbleibende, in die Erdoberfläche eindringende Energie (die restliche Bilanzlücke von 0,4 W/m<sup>2</sup> (0,124 %) ist aus vorliegender Sicht eher ermittlungstechnischen Ungenauigkeiten zuzuordnen). Es wird davon ausgegangen, dass dies die Energie ist, die im Jahresmittel die Erde an der Oberfläche und auch in der nahen Atmosphäre erwärmt. Die Umsetzung dieser Energie erfolgt nach dem in Bild 3.2 dargestellten Schema.

Wohin fließt die globale Erwärmung?

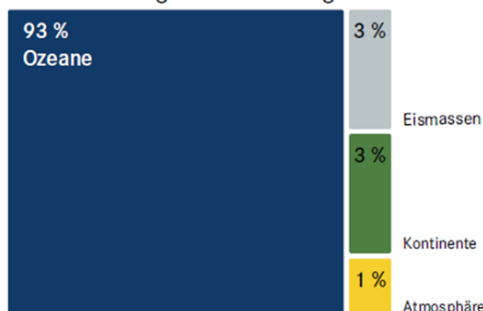


BILD 3.2 Umsetzung des Wärmeintrags in die Erde aus Strahlungs-Imbalance [24].

Dabei ist auffallend, dass nur 1% des Energieeintrags in atmosphärische Erwärmung umgewandelt wird (0,006 W/m<sup>2</sup>). Der Hauptanteil fließt in die Meere (93%).

Die 1% Imbalance Energie liefert eine atmosphärische Aufheizung von ca. 1 · 10<sup>20</sup> J p.a. Nach Bild 2.12 entspricht dies einem atmosphärischen Klimaerwärmungspotenzial von 0,02 °C p.a. bis 0,035 °C p.a., je nach betrachteter Atmosphärenschichtdicke. In Bild 3.3 sind diese Zusammenhänge visualisiert. Die Zuordnung Sonneneinstrahlung/Imbalance und daraus abgeleitete atmosphärische Aufheizung wäre damit mit der Messung von 0,02 °C p.a. größenordnungsmäßig vergleichbar.

#### 3.2 Zusatzeinfluss durch anthropogene Abwärme

Überlagert man dem Strahlungseintrag die vom Menschen produzierte Abwärme, so ergibt sich eine weitere Atmosphärenaufheizung. In Bild 3.4 ist das resultierende atmosphärische Erwärmungspotenzial dargestellt. Die Abwärme erhöht die potenzielle Erwärmung auf 0,078 °C p.a. bis 0,127 °C p.a. was einem Faktor 4 bis 6 der gemessenen Oberflächen-erwärmung (0,02 °C p.a.) entspricht. Umgekehrt lässt sich (spekulativ) daraus schließen, dass im globalen Mittel nur ein Viertel bis ein Sechstel der aus Strahlungsbilanz plus anthropogener Abwärme ermittelten Temperaturerhöhungspotenziale in die tatsächlich beobachtete Erhöhung der Erdoberflächentemperatur eingeflossen ist.

#### 3.3 Zusammenfassung und Diskussion

In Bild 3.5 sind Wärmeinträge und Temperaturerhöhungspotenziale für alle 3 Betrachtungsfälle graphisch zusammengefasst. Wie Bild 3.5 zeigt, übersteigt die anthropogene Abwärmemenge die aus der Strahlungsbilanz abgeleitete Erwärmung der Atmosphäre (0,006 W/m<sup>2</sup>) beträchtlich. Die Auswirkungen auf der dicht bevölkerten Nordhalbkugel sind besonders stark.

Die Potenziale zeigen, dass abhängig von der Ausbreitungshöhe der Abwärme, der atmosphärische Temperaturanstieg im Mittel bis zu 0,23 °C p.a. beitragen könnte. Extrapoliert auf lokale und regionale Bereiche können diese Effekte noch wesentlich ausgeprägter sein, je nach flächenmäßiger Ausbreitung der Abwärme. Die hierzu gezeigten Untersuchungen von Flanner (2005), Bild 1.4 zeigen lokale bzw. regionale Aufwärmungspotenziale um 0,2 W/m<sup>2</sup> bis 1,6 W/m<sup>2</sup> und mehr an, was im Vergleich zu den Mittelwerten von Bild 3.5 (0,017 W/m<sup>2</sup> bis 0,042 W/m<sup>2</sup>) nochmals signifikant stärker ist (Faktor 10 bis 40). Die anthropogene Abwärmefreisetzung und ihr Einfluss auf die Umwelt könnten damit regional bzw. lokal noch wesentlich spürbarer sein.

Im Hinblick auf die Diskrepanz zwischen Messung und analytischer Abschätzung der atmosphärischen

Erwärmung ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Abwärme zunächst von der Erde aufgenommen wird und dann über langwellige Strahlung in das Weltall abgestrahlt wird. Der Rest trägt unmittelbar zur atmosphärischen Erwärmung bei. In welchem Umfang diese Austauschvorgänge nicht nur das Klima selbst, sondern auch Fauna und Flora belasten und zu welchen Anteilen sie sich analog zur Imbalance Energie auf Meere, Kontinente, Eismassen und Atmosphäre aufteilen, erscheint aus vorliegender Sicht nicht geklärt.

Fazit: Vorliegende Untersuchungen deuten darauf hin, dass die atmosphärischen Einflüsse durch zivilisatorische Abwärme deutlich stärker sind als von der Klimawissenschaft anhand der Strahlungsaustauschvorgänge prognostiziert. Die Betrachtung der Erderwärmung anhand des Strahlungsaustausches zwischen Weltall und Erde alleine, scheint nach vorliegenden Abschätzungen die atmosphärische Klimaerwärmung nur unvollständig wiederzugeben

#### 4. POTENZIELLE KLIMAERWÄRMUNGSBEITRÄGE DURCH DIE EINFÜHRUNG SYNTHETISCHER BRENNSTOFFE

##### 4.1 Synthetische Brennstoffe

Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen zum Einfluss der Abwärme aus Industrie, Haushalten, Verkehr und Gewerbe kann der Zusatzeffekt durch Einführung synthetischer Brennstoffe bewertet werden. Als synthetischer Brennstoff wird stellvertretend für die in Frage kommenden Herstellprozesse das in Abschnitt 1 aufgeführte und derzeit für die Luftfahrt hochaktuelle LH2 in Ansatz gebracht. Die synthetische LH2 Brennstoffherstellung und die damit verbundene Abwärmeerzeugung in den einzelnen Herstellungsschritten ist in Bild 4.1 dargestellt und der Bereitstellung von fossilem Kerosin gegenübergestellt (in Bild 1.1 sind die zugrunde liegenden Literaturquellen aufgeführt).

Bei der LH2 Herstellung ergeben sich gegenüber Kerosin beträchtlich erhöhte Energieanforderungen und Abwärmemengen, vor allem durch die Elektrolyse, die Gasverflüssigung und den Brennstofftransport.

Bei der in Ansatz gebrachten PEM-Elektrolyse wird analog zu [8] angenommen, dass die Verluste nahezu vollständig als Abwärme anfallen. Der erhöhte Transportaufwand resultiert aus den um den Faktor 4 größeren Transportvolumina von LH2 gegenüber Kerosin. Die Anzahl der Transportvorgänge bzw. Förderaufwände (Pipelines) müssen entsprechend erhöht werden. Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Herstellung des H2 Brennstoffes die Energie für den Oberen Heizwert (HHV) aufzubringen ist, während bei der Verbrennung im Triebwerk zu Schub

nur der Untere Heizwert (LHV) zählt. Außerdem muss zur Vergasung von LH2 zusätzlich Verdampfungsenergie auf Umgebungszustand aufgebracht werden, was relativ hoch ist (ca. 4 MW / kg/s, ~ 3% des Heizwertes).

Wie Bild 4.1 im Vergleich von Energie- und Abwärmebilanz zeigt, ist bei gleicher Schubleistung der Primärenergiebedarf und der Abwärmeeinfall um den Faktor 2,6 bzw. 2,8 größer als bei fossiler Kerosinverbrennung.

Umsetzungseffekte, wie erhöhter Schubbedarf aufgrund erhöhten Tankvolumens bzw. reduzierter Payload Möglichkeiten, erhöhten LH2 Tankgewichts, Boil-Off Notwendigkeiten, etc. sind hierbei noch nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie die Herausforderungen zur Bereitstellung der recht hohen LH2 Verdampfungsenergie bei Verwendung im Triebwerk.

##### 4.2 Luftfahrt

Ausgangspunkt ist die Substitution von Kerosin durch flüssigen Wasserstoff LH2 für die Verbrauchswerte von 2015. Die zugehörigen Kerosinverbräuche hierfür liegen bei  $3,5 \cdot 10^{11}$  Liter. Die Substitution von Kerosin wurde anhand der Zusammenhänge von Bild 4.1 berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 4.2 und Bild 4.3 gezeigt. Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch flüssigen Wasserstoff LH2 steigt der globale anthropogene Abwärmeeinfall von 3 % auf 10 % an. Das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial steigt von 0,0021 °C p.a. auf 0,007 °C p.a., weil der Abwärmeeinfall dieser Prozesse etwa um den Faktor 3 größer ist.

Betrachtet man die Nordhalbkugel, wo vorrangig die synthetische Brennstoffherzeugung erfolgen wird (Bild 4.3), so ergibt sich ein noch stärkerer Effekt. Das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial steigt gegenüber Kerosin um bis zu 0,013 °C p.a. zusätzlich an (30. bis 60. Breitengrad). Dabei wurde angenommen, dass die Abwärmeausbreitung sich auf eine Höhe von 10 km beschränkt, zumal die meiste Abwärme bei der synthetischen Herstellung am Boden erzeugt wird.

Es werden also Größenordnungen erreicht, die vermuten lassen, dass die vollständige LH2-Einführung in der Luftfahrt vom Potenzial her lokal bzw. regional die atmosphärische Erwärmung gegenüber dem bisher beobachteten Oberflächentemperaturanstieg (0,02 °C p.a.) verdoppeln oder sogar vervielfachen könnte.

Der zukünftige Einsatz von LH2-Flugzeugen ist derzeit noch unklar. Bis 2050 soll gemäß EU-Vorgabe Kerosin zu 35 % durch SAF als E-Fuel ersetzt wer-

den (plus noch einmal 35 % durch SAF als Bio-Fuel; insgesamt also durch 70 % SAF). Die Auswirkungen auf den Energiebedarf hierfür und die anthropogene Aufheizung der Atmosphäre sind dann entsprechend anzupassen an den niedrigeren Umsetzungsgrad des SAF und um die thermischen Anforderungen von Bio-Fuel-Herstellung zu erweitern.

### 4.3 Straßenverkehr

Im Falle der hier betrachteten synthetischen Wasserstoffzufuhr für den Straßenverkehr ist zu berücksichtigen, dass bei Kraftfahrzeugen die Speicherung von Wasserstoff vorwiegend in Hochdrucktanks mit 400 bar bis 700 bar erfolgt. Wegen der damit verbundenen hohen Verdichtungsarbeit des Wasserstoffs mit anschließender Abkühlung auf Umgebungstemperatur ist ebenfalls mit hohen thermischen Umweltbelastungen zu rechnen, ähnlich wie bei der Wasserstoffverflüssigung für die Luftfahrt. In vorliegender Abschätzung wurden deshalb beide Verfahren zur Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf Energieaufwand und Abwärme in erster Näherung vergleichbar angenommen. Bild 4.1 ist für beide Fälle relevant

Bild 4.4 zeigt, dass der Energieverbrauch im Straßenverkehr um den Faktor 6,5 (39% / 6%) grösser ist als in der Luftfahrt. Das Temperaturerhöhungspotential durch die Herstellung synthetischer Brennstoffe alleine wird dann bei vollständiger Substitution im Mittel bei etwa 0,03 °C p.a. liegen:  $6,5 \cdot (0,007 - 0,0021)$ . Im Bereich der Nordhalbkugel kann dieser Wert auf 0,08 °C p.a. steigen. Umgekehrt hätte eine nur 15%-ige (1/6,5) Einführung von Wasserstoff in den Straßenverkehr den gleich hohen Abwärmebeitrag, wie die vollständige Substitution von Kerosin in der Luftfahrt. Für den Straßenverkehr ist deshalb bei der Auswahl und Einführung synthetischer Brennstoffe noch deutlich höhere Aufmerksamkeit dem Abwärmeeinfall und dem Energiebedarf bei der Herstellung zu widmen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die hier errechneten globalen Abwärmeeinflüsse stellen einen bisher unterschätzten Zusatzbeitrag zur atmosphärischen Klimaerwärmung dar, aufgrund der hohen anthropogenen Abwärmemengen, die konvektiv in die Atmosphäre eingeführt werden.

Bisher wurden diese Aspekte in der Klimabeschreibung nicht wiedergegeben. Die gegenwärtige Bewertung der Klimaerwärmung basiert nach vorliegender Erfahrung ausschließlich auf dem Strahlungsaustausch mit dem Weltall.

Die hier aus den Primärenergieverbräuchen für 2015 errechneten Abwärmemengen sind um den Faktor 2 bis 6 höher als das, was der Strahlungsaustausch

an atmosphärischer Klimaerwärmung nahe der Erdoberfläche erwarten lässt. Statt der beobachteten 0,02 °C p.a. wurden Potenziale für 0,06 °C p.a. bis 0,09 °C p.a. Erwärmung im globalen Durchschnitt ermittelt. Besonders stark sind die Effekte auf der Nordhalbkugel der Erde, wo die größten Umweltbelastungen und Energieverbräuche stattfinden. Im betrachteten Bereich zwischen 30. und 60. Breitengrad steigen die Abwärmepotenziale im Mittel auf bis zu 0,23 °C p.a. an.

Auch bezüglich der Luftfahrt und der Substitution herkömmlicher fossiler Brennstoffe durch synthetische Brennstoffe (SAF) scheinen neben den hohen Energiebedarfen zur Herstellung die hier errechneten Abwärmeeinflüsse nicht vernachlässigbar zu sein. Energiebedarf und Abwärmeeinfall sind im Schnitt um den Faktor 3 höher als bei Kerosin.

Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch SAF hat die zusätzliche Abwärmefreisetzung bei der Brennstoffherstellung das Potenzial, die atmosphärische Klimaerwärmung um 5 % bis 7 % zu beschleunigen. Bezieht man den Straßenverkehr mit ein, so steigt durch den Straßenverkehr alleine dieser Beitrag gegenüber den 5 % bis 7 % der Luftfahrt um den Faktor 6,5 an. Umgekehrt, haben bereits 15 % H<sub>2</sub>-Einführung für den Straßenverkehr näherungsweise die gleiche Abwärmewirkung wie eine LH<sub>2</sub> Einführung in der gesamten Luftfahrt. Dies Ausmaße reduzieren sich entsprechend dem tatsächlichen bzw. vorgesehenen SAF Einführungsgrad.

Zu klären ist,

- wie sehr die beträchtlichen anthropogenen Abwärmebeiträge das atmosphärische Klima beeinflussen wird (Wolkenbildung, etc.).
- ob und auf welchem Wege die Abwärme ins Weltall entweicht oder in der Erde verbleibt, bzw. zu welchen Anteilen die Abwärme die Atmosphäre mit aufheizt.
- wie lange die Abwärme in der erdnahen Atmosphäre verbleibt, und ob auf diesem Weg diese konvektive Abwärme nicht direkt auch zum Abschmelzen von Gletschern und Polen beiträgt. Die Windsysteme der Erde könnten diese Vermutung untermauern.
- ob und in welchem Umfang die Abwärme die lokale Fauna und Flora beeinflusst.
- wie bedeutsam im Hinblick auf den Luftverkehr die Flughöhe bei der Freisetzung der Abwärme ist.

Die finale Antwort zu diesen Fragen obliegt den Spezialisten der Klimaforschung und Meteorologie. Vor allem sollte die gesamte Atmosphäre und nicht



nur der erdoberflächennahe Bereich in diese Betrachtungen einbezogen werden.

Im Hinblick auf die Einführung synthetischer Brennstoffe für Luftfahrt und Verkehr sollte neben den hohen Energiebedarfen die dabei entstehende anthropogene Abwärme auf keinen Fall unberücksichtigt bleiben.

## BEZEICHNUNGEN

$\eta$ bzw. $\epsilon$	Umsetzungs-Wirkungsgrad
$A$	in Arbeit umgesetzte Energie
$C_p$	spezifische Wärmekapazität der Luft
Grd	Grad C
$\Delta H$	Änderung der Enthalpie
$H$	Höhe der Atmosphäre
$HHV$	Oberer Heizwert
$J$	Joule
$LHV$	Unterer Heizwert
$LH_2$	Liquid Hydrogen
$M$	Luftmasse
p.a.	per annum (pro Jahr)
$Q$	zugeführte Wärme
$Q_{zu}$	zugeführte Primärenergie;
$Q_{ab}$	Abwärme
$\Delta T$	Temperaturerhöhung
$W$	Watt

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] WIKIPEDIA, 2024. *Übertragungsverluste*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Übertragungsverlust>.
- [2] HEPERLE, Martin, 2012. *Electric Flight – Potential and Limitations*. Energy Efficient Technologies and Concepts of Operation, 2012-10-22 to 2012-10-24, Lisbon, Portugal. <https://elib.dlr.de/78726>.
- [3] FELDER, James L., KIM, Hyun Dae, BROWN, Gerald V., 2009. *Turboelectric Distributed Propulsion Engine Cycle Analysis for Hybrid-Wing-Body Aircraft*. AIAA Aerospace Science Meeting (Orlando, FL, USA, 5th-8th January 2009). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20130010780>.
- [4] SIZMANN, Andreas, 2019. *Renewable Jet Fuel: Upcoming Technology Options*. 4th Bauhaus Luftfahrt Symposium, Ottobrunn 7th-8th May 2019.
- [5] ARNOLD, Karin, KOBIELA, Georg, PAS-TOWSKI, Andreas, 2018. *Technologiebericht 4.3 Power-to-Liquids / Power-to-Chemicals*. Wuppertal Institute für Klima, Umwelt Energie GmbH, Technologiebericht innerhalb des Forschungsprojektes TF-Energiewende. <https://www.researchgate.net/publication/334895845>
- [6] SCHMIDT, Patrick, BATTEIGER, Valentin, ROTH, Arne, WEINDORF, Werner, RAKSHA, Tetyana, 2018. Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 90, no 1-2, pp. 127-140. <https://doi.org/10.1002/cite.201700129>.
- [7] WIKIPEDIA, 2024. Well to Tank. <https://de.wikipedia.org/wiki/Well-to-Tank>.
- [8] FALTER, Christoph, PITZ-PAAL, Robert, 2018. Energy Analysis of Solar Thermochemical Fuel Production Pathway with a Focus on Waste Heat Recuperation and Vacuum Generation. *Solar Energy*, vol. 176, pp. 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.042>, <https://elib.dlr.de/124272>.
- [9] RUDDIMAN, William F., 2013. *Earth's Climate: Past and Future*. USA: W. H. Freeman and Company. <https://www.amazon.com/dp/1429255250>.
- [10] FLANNER, Mark G., 2009. Integrating Anthropogenic Heat Flux with Global Climate Models. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 2. <https://doi.org/10.1029/2008GL036465>.
- [11] BUCHANAN, Mark, 2023. *Deep Warming: Even If We Solve Global Warming, We Face an Older, Slower Problem. Waste Heat Could Radically Alter Earth's Future*. Essay. Aeon.co, June, 2023. <https://aeon.co/essays/theres-a-deeper-problem-hiding-beneath-global-warming>.
- [12] WIKIPEDIA, 2024. *Erdatmosphäre*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosphäre>.
- [13] STUDYFLIX, 2024. Luftdichte. <https://studyflix.de/chemie/luftdichte-3009>.
- [14] IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- [15] USGCRP, 2017: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>.
- [16] STATISTA, 2024. Weltweiter Primärenergieverbrauch in ausgewählten Jahren von 1980

bis 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/42226/umfrage/welt-insgesamt-verbrauch-an-primarenergie-in-millionen-tonnen-oelaequivalent>.

- [17] AntroWiki, 2024. Fossile Energie – Weltweiter Energieverbrauch nach Energiearten 2015. [https://anthrowiki.at/Fossile\\_Energie](https://anthrowiki.at/Fossile_Energie).
- [18] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZ, 2018. Endenergieverbrauch nach Sektoren in Deutschland, 2018. In: SI-SHK, 2020. Endenergieverbrauch in Deutschland. 2020-01-29. <https://www.si-shk.de/endenergieverbrauch-in-deutschland-67382>.
- [19] HIRZEL, Simon, SONTAG, Benjamin, ROHDE, Clemens, 2013. Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie. Fraunhofer ISI. [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Kurzstudie\\_Abwaermenutzung.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Kurzstudie_Abwaermenutzung.pdf)
- [20] BMWI, 2008. Wer verbraucht in Deutschland die meiste Energie. In: BAULINKS.DE. <https://www.baulinks.de/webplugin/2008/0993.php4>.
- [21] WIKIPEDIA, 2024. Energiebilanz (Energiewirtschaft). [https://de.wikipedia.org/wiki/Energiebilanz\\_\(Energiewirtschaft\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Energiebilanz_(Energiewirtschaft)).
- [22] WIKIPEDIA, 2024. Liste der Länder mit dem höchsten Energieverbrauch. [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Länder\\_mit\\_dem\\_höchsten\\_Energieverbrauch](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Länder_mit_dem_höchsten_Energieverbrauch).
- [23] IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physi-

cal Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>.

- [24] Deutsche Klimakonsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz Klimainitiative, Klimafakten.de, 2021. Was wir heute übers Klima wissen: Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle\\_meldungen/210609/basisfakten-zum-klimawandel\\_dkk.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210609/basisfakten-zum-klimawandel_dkk.html).
- [25] BAW, 2019. Beitrag des Hamburger Verkehrsflughafens an der Klimalast Hamburgs. <https://www.baw-fluglaerm.de/files/PDFs/Klimalast-Hamburg-Anteil-Luftverkehr-1912.pdf>.
- [26] OPEC, IEA, BUKOLD (Energy Comment / energiepolitik.de), 2012. Ölnachfrage Welt nach Sektoren. <https://www.energycomment.de/olnachfrage-welt-nach-sektoren>.

**Kontaktadresse:** [klauspeterrued@gmail.com](mailto:klauspeterrued@gmail.com)

ANHANG

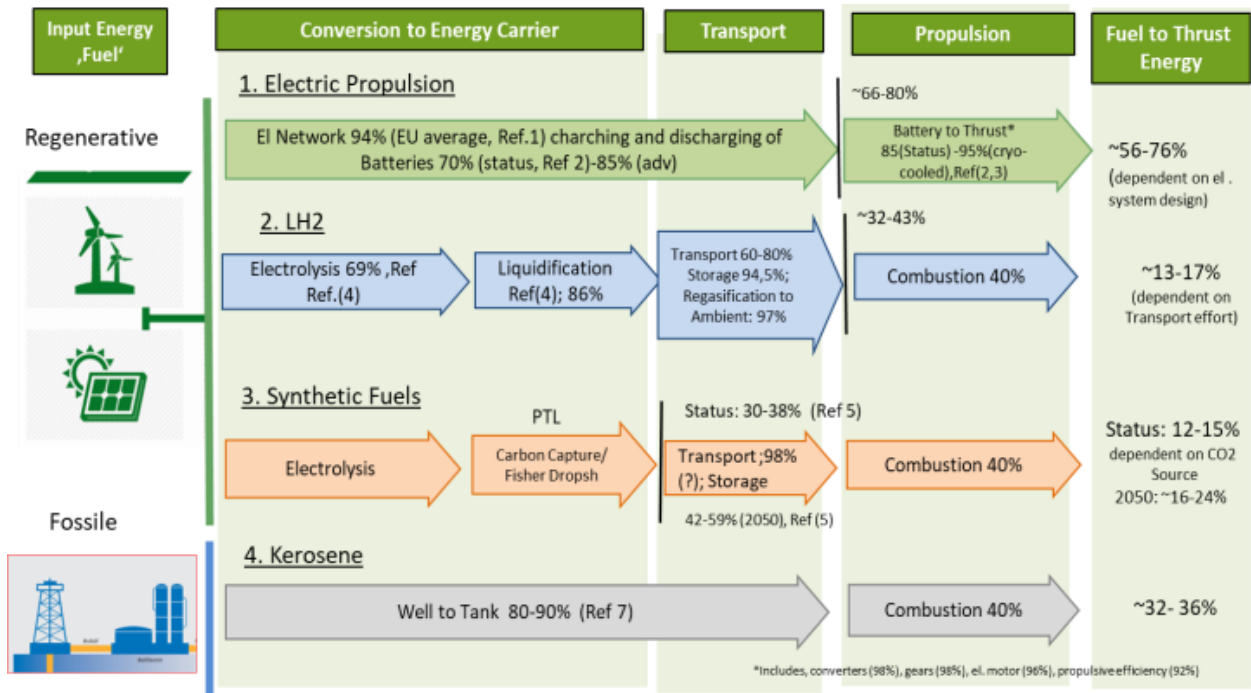


BILD 1.1 Alternative Brennstoffe für Luftfahrtantriebe.

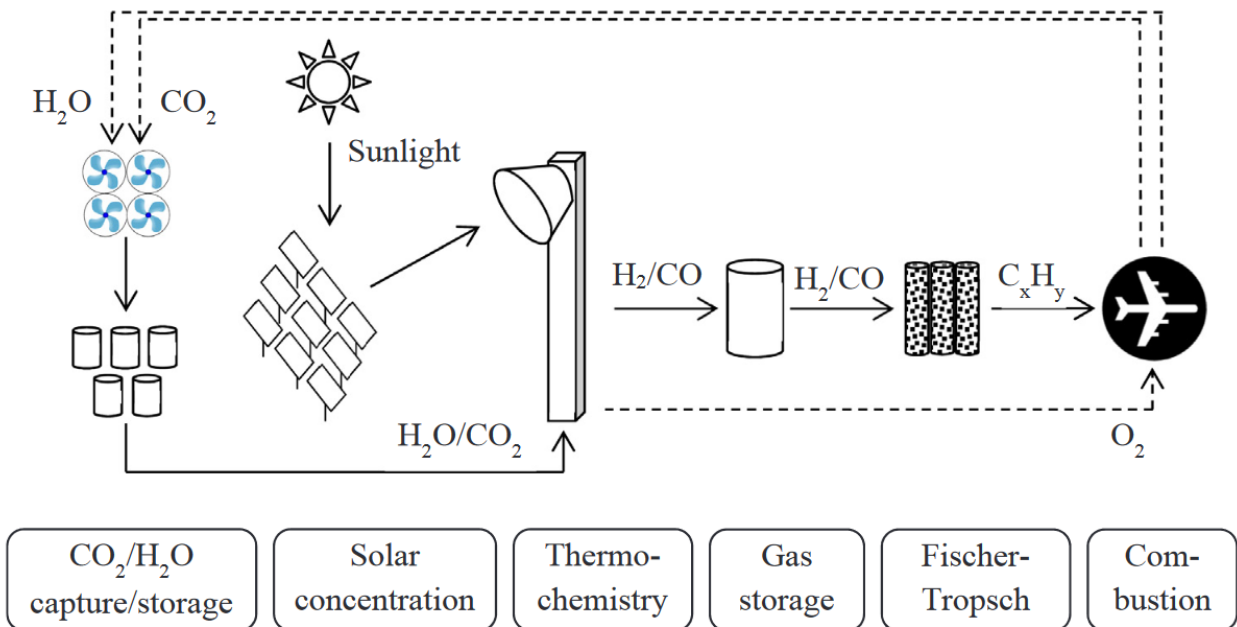


BILD 1.2 Synthetische Brennstoffherzeugung über Solarthermie [8].

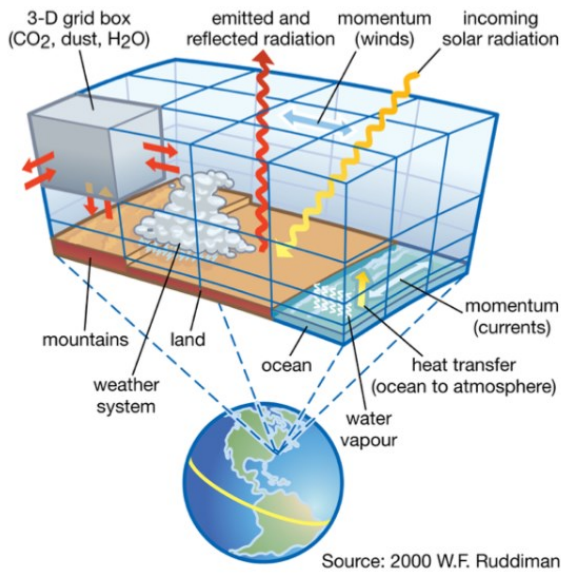


BILD 1.3 Prinzipielle Darstellung der Klimaberechnung [9].

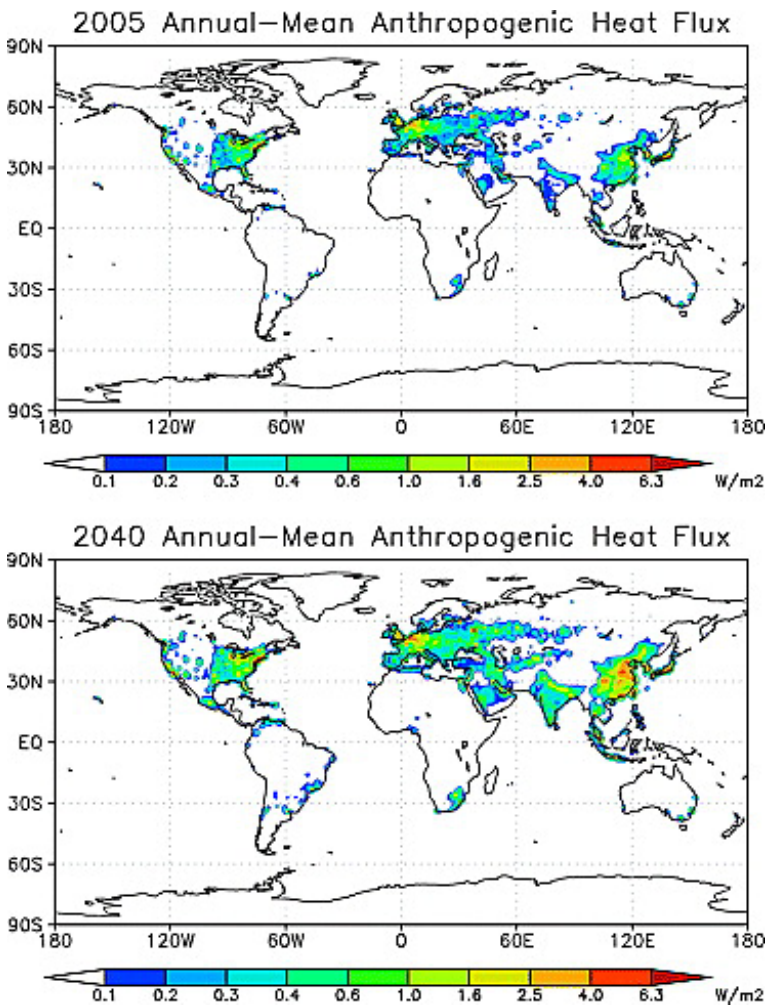


BILD 1.4 Anthropogene Wärmeausbreitung (Flanner) [10].

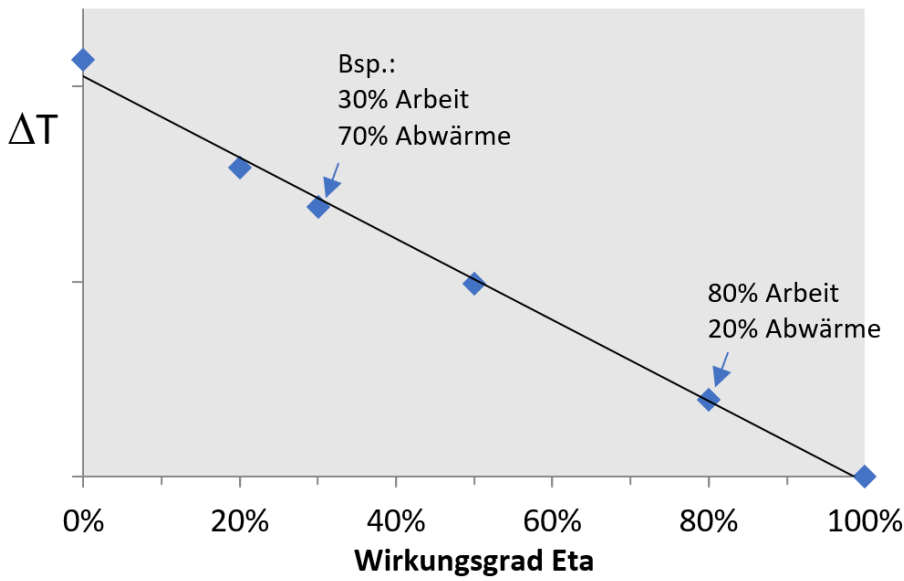


BILD 2.1 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale durch Abwärme (Prinzipielle Darstellung).

(b) Änderung der globalen Oberflächentemperatur (Jahresmittel) wie beobachtet und auf Basis **menschlicher & natürlicher** beziehungsweise **nur natürlicher** Faktoren simuliert (jeweils 1850–2020)

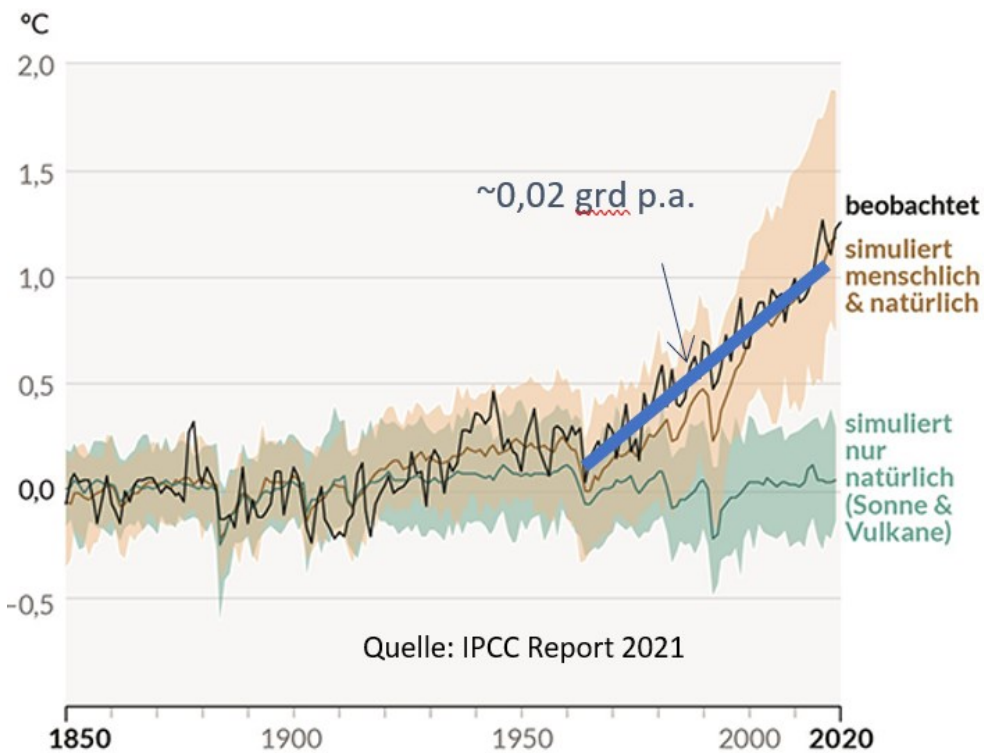


BILD 2.2a Beobachtete Klimaerwärmung in Erdoberflächennähe (IPCC-Report) [14].

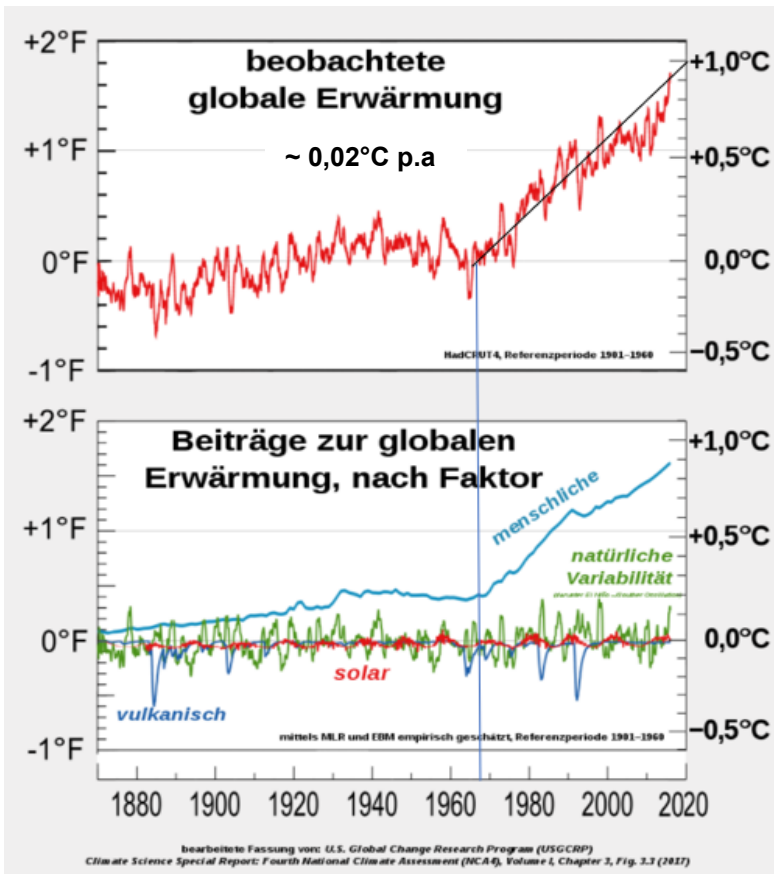


BILD 2.2b Beobachtete Klimaerwärmung in Erdoberflächennähe [15].

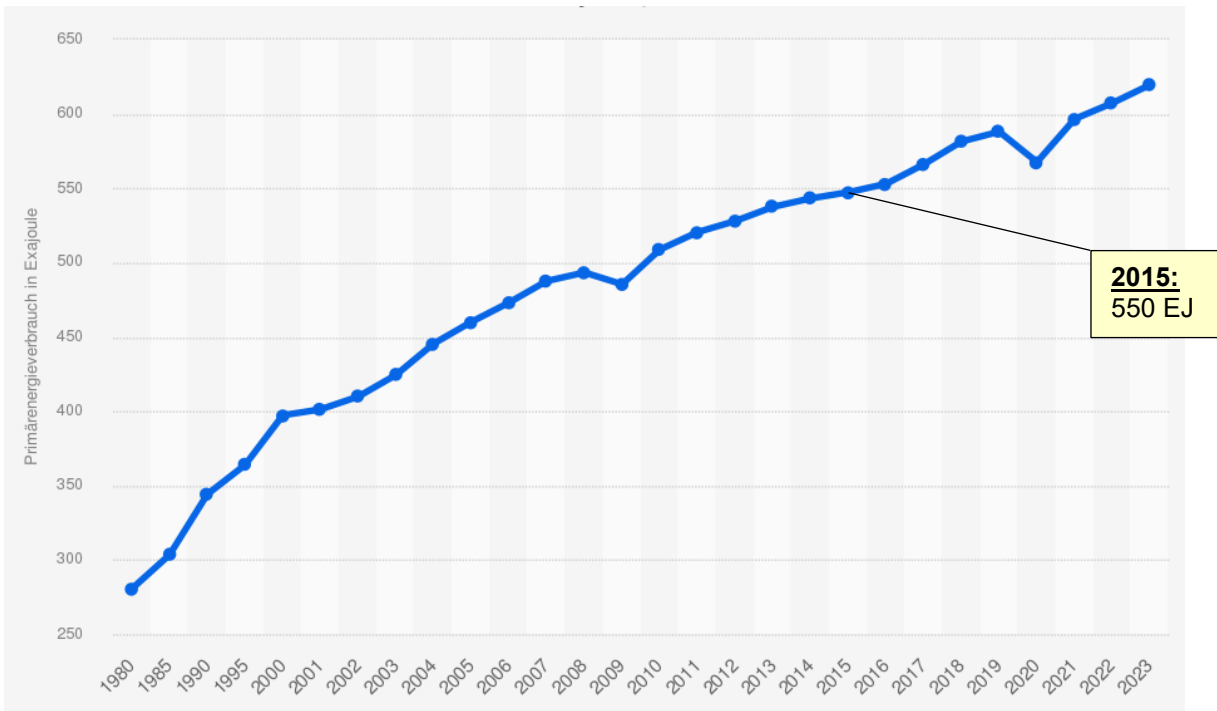
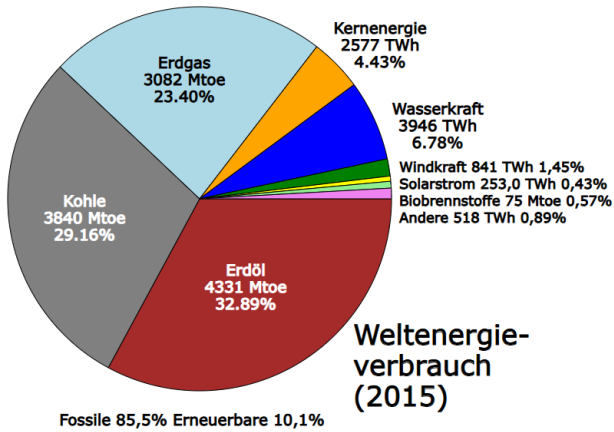


BILD 2.3 Weltweiter Primärenergieverbrauch seit 1980 weltweit in EJ (1 ExaJoule =  $10^{18}$  J) [16].



**Primärenergieverbrauch 2015**

	Anteil, %	Energieverbrauch TWh
Kohle	29,16	44615
Wasserkraft	6,78	10373 <i>n.relevant</i>
Wind+Solar	1,88	2876 <i>n.relevant</i>
Erdgas	23,4	35802
Erdöl/Benzin	32,89	50322
Kernenergie	4,43	6778
Bio	0,57	872 <i>n.relevant</i>
Andere	0,89	1362 <i>n.relevant</i>
Summe	100 %	153000 TWh
		551 Exajoule
<b>Abwärme-relevant</b>	<b>89,88 %</b>	<b>137516,4 TWh</b>
		<b>495 Exajoule</b>

BILD 2.4 Abwärme relevanter Primärenergieverbräuche weltweit im Jahr 2015 [17].

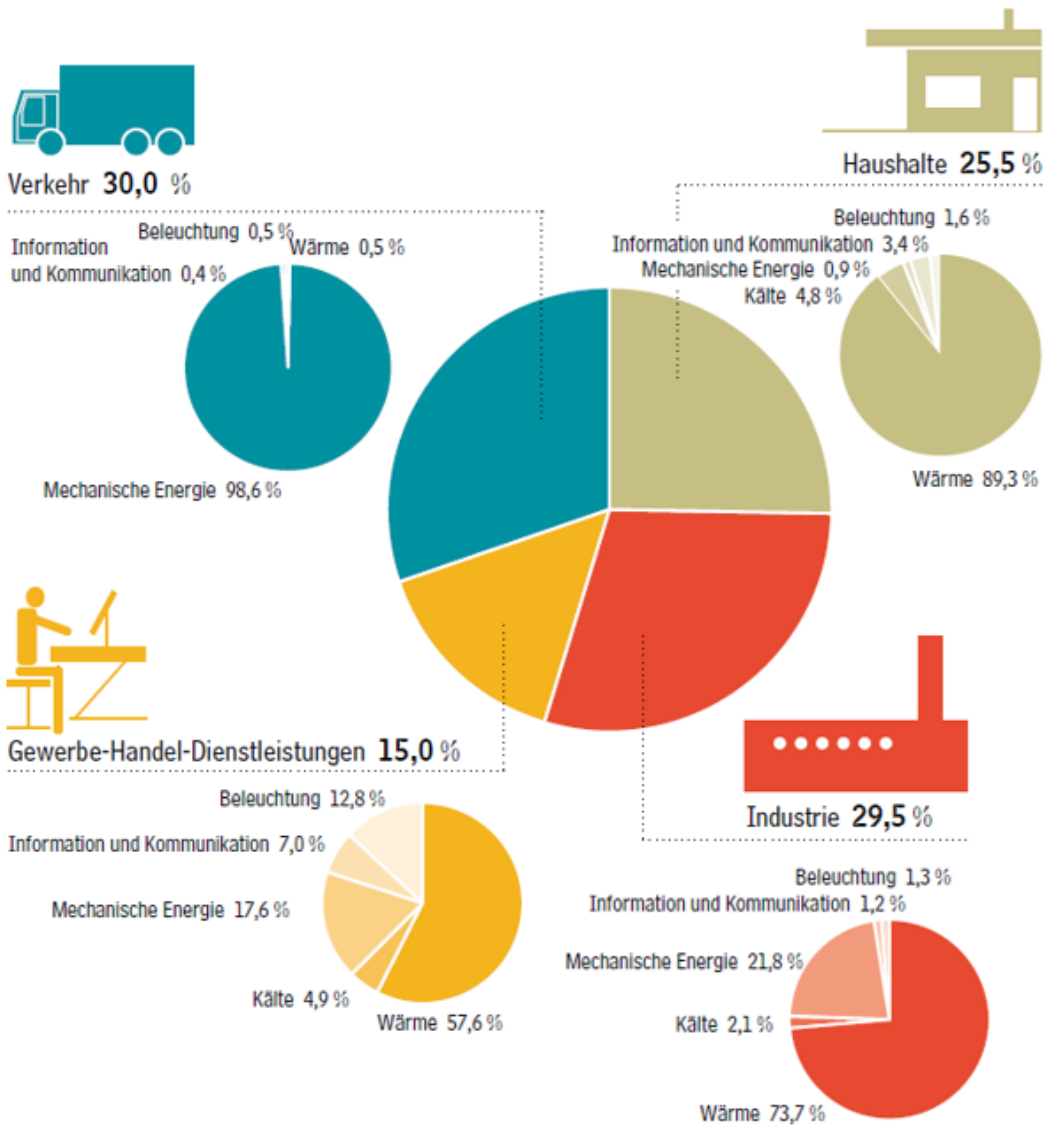


BILD 2.5 Endenergie: Aufbruch nach Sektoren [18].

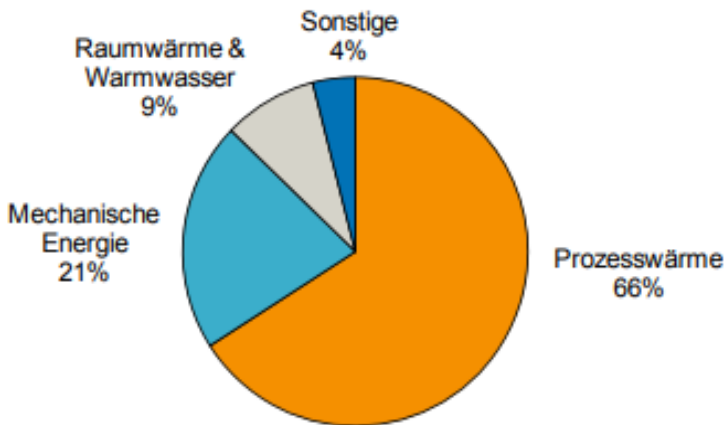


BILD 2.6 Energiebedarf der deutschen Industrie [19].

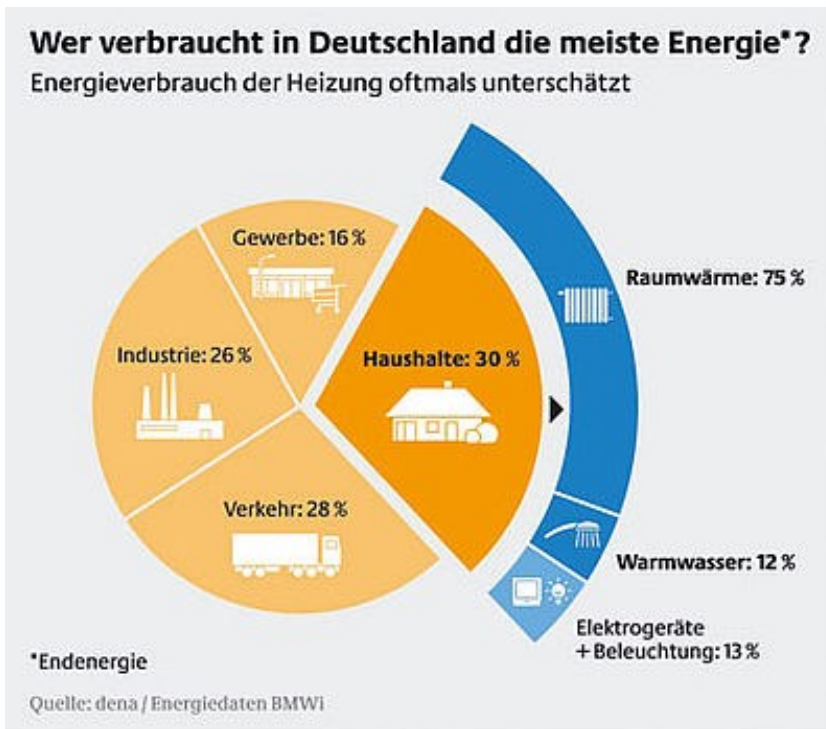


BILD 2.7 Wärmeerzeugung in Haushalten [20].



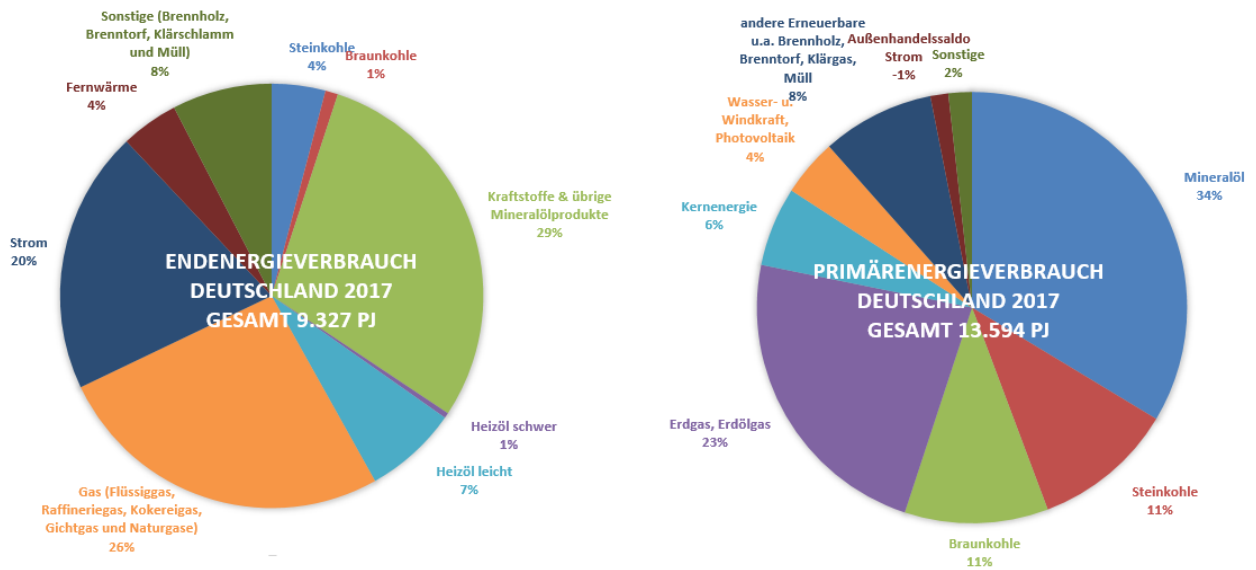


BILD 2.8 Beim Übergang von Primärenergie zur Endenergie tritt ein Verlust von ca. 31 % auf [21].

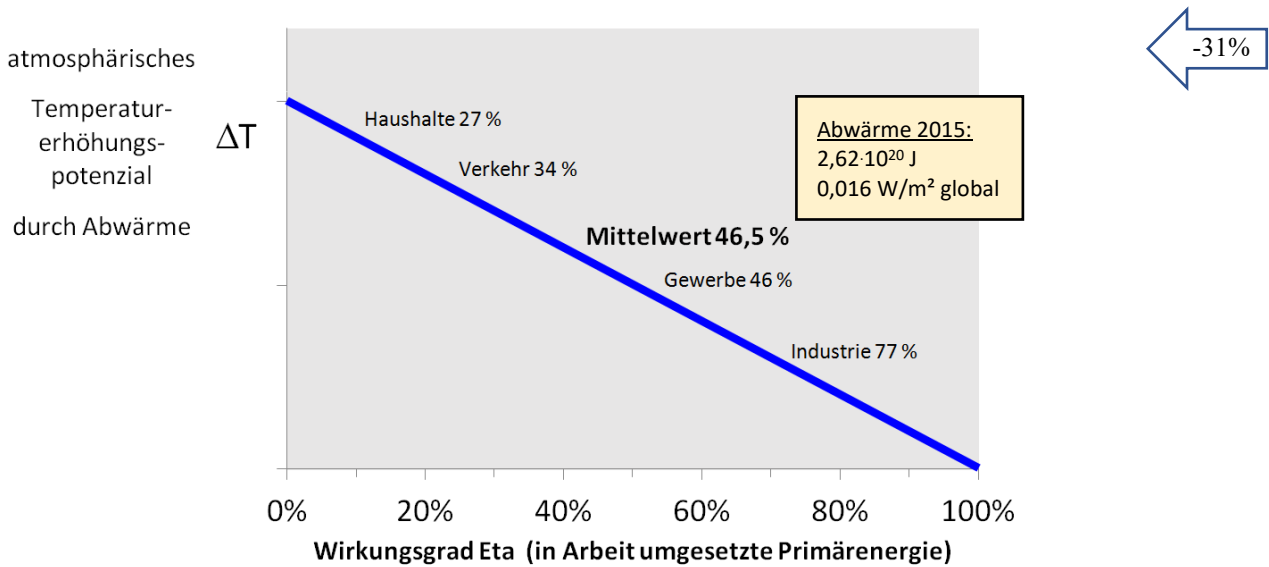


BILD 2.9 Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade nach Energiesektoren.

**Abwärmepotenzial, global**

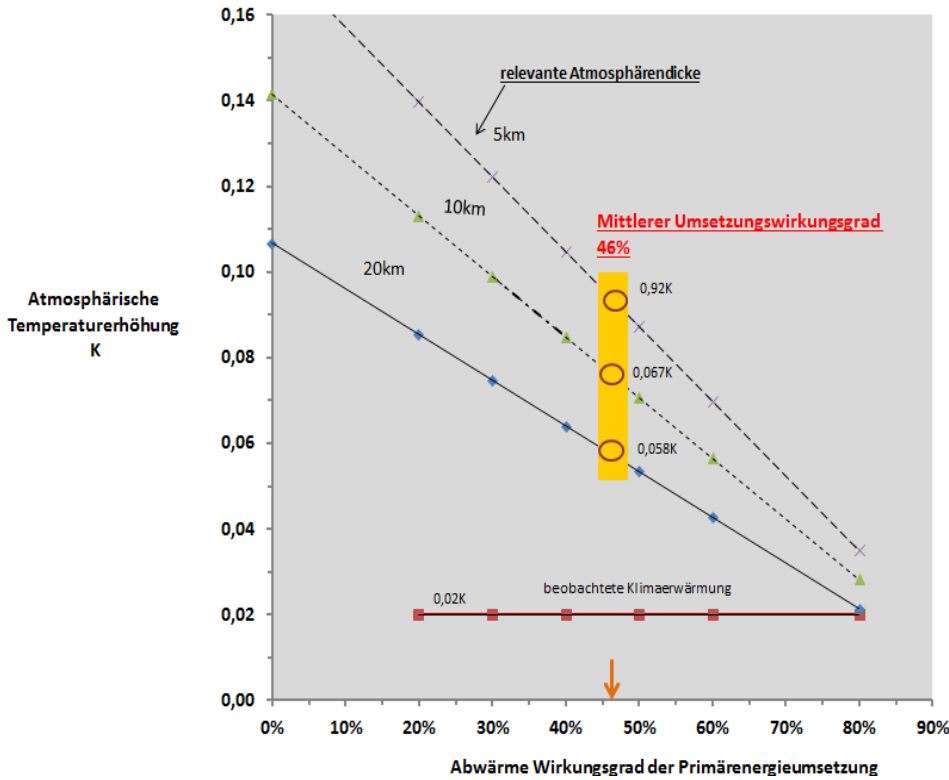


BILD 2.10 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale für variierende Primärenergie- Umsetzungswirkungsgrade und unterschiedliche Wärmeausbreitungshöhen (Mittelwerte über die jeweilige Atmosphärendicke)

TAB. 2.1 Abwärmepotenziale für unterschiedliche Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade und Wärmeausbreitungshöhen.

<b>Mittlere Aufwärmung der Atmosphäre für unerschiedliche Atmosphärendicken</b>								
(Parametrische Betrachtung)								
<b>1. Primärenergieverbrauch 2015 gesamt</b>	153000 TWh 5,50E+20 J							
<b>1.a Primärenergieverbrauch ohne regenerativer Anteile</b>	4,94E+20 J							
<b>2. Umsetzungswirkungsgrade (nicht in Wärme umgesetzt)</b>		Umsetzungswirkungsgrade						
<i>In Wärme umgesetzte Primärenergie</i>		0% 100%	20% 80%	30% 70%	40% 60%	50% 50%	60% 40%	80% 20%
<b>3. Resultierende Abwärme = Umweltbelastung</b>	J	4,94E+20	3,95E+20	3,46E+20	2,97E+20	2,47E+20	1,98E+20	9,89E+19
<b>4. Mittlere Aufwärmungspotenziale der Atmosphäre für versch. Atmosphärendicken</b>		Temperaturerhöhungspotenziale, K						
<b>a Atmosphärendicke 20 km</b>								
Masse der Atmosphäre (90% der Gesamtmasse)	4,64E+18 kg							
<i>Atmosphäre gesamt</i>	5,15E+18 kg							
Aufwärmung durch Abwärme ( $\Delta T = Q/m \cdot cp$ )	K	0,107	0,085	0,075	0,064	0,053	0,043	0,021
<b>b Atmosphärendicke 10 km</b>								
Masse der Atmosphäre	3,5E+18 kg							
Aufwärmung durch Abwärme ( $\Delta T = Q/m \cdot cp$ )	K	0,141	0,113	0,099	0,085	0,071	0,057	0,028
<b>c Atmosphärendicke 5 km</b>								
Masse der Atmosphäre	2,83E+18 kg							
Aufwärmung durch Abwärme ( $\Delta T = Q/m \cdot cp$ )	K	0,175	0,140	0,122	0,105	0,087	0,070	0,035

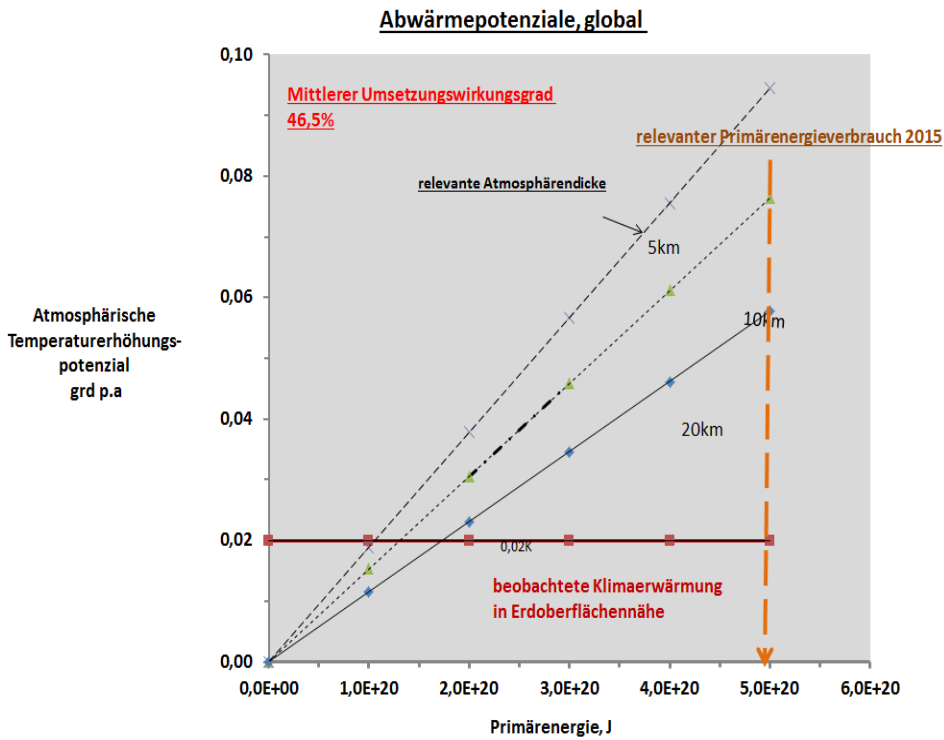


BILD 2.11 Potenzielle atmosphärische Klimaerwärmung als Funktion von Primärenergieverbräuchen, bei einem Umsetzungswirkungsgrad von 46,5 %.

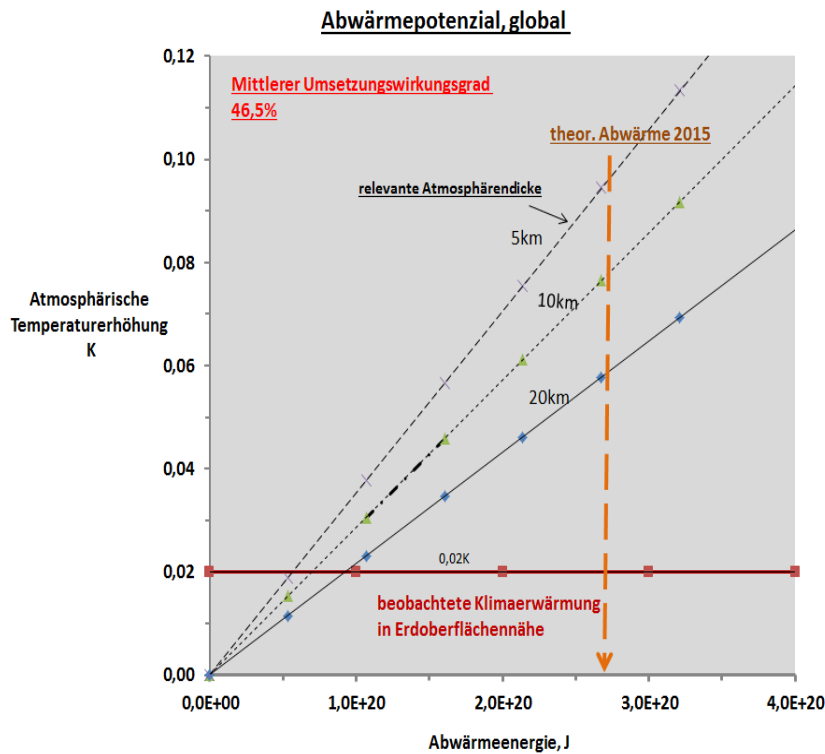


BILD 2.12 Potenzielle globale atmosphärische Klimaerwärmung als Funktion der Abwärmemengen.

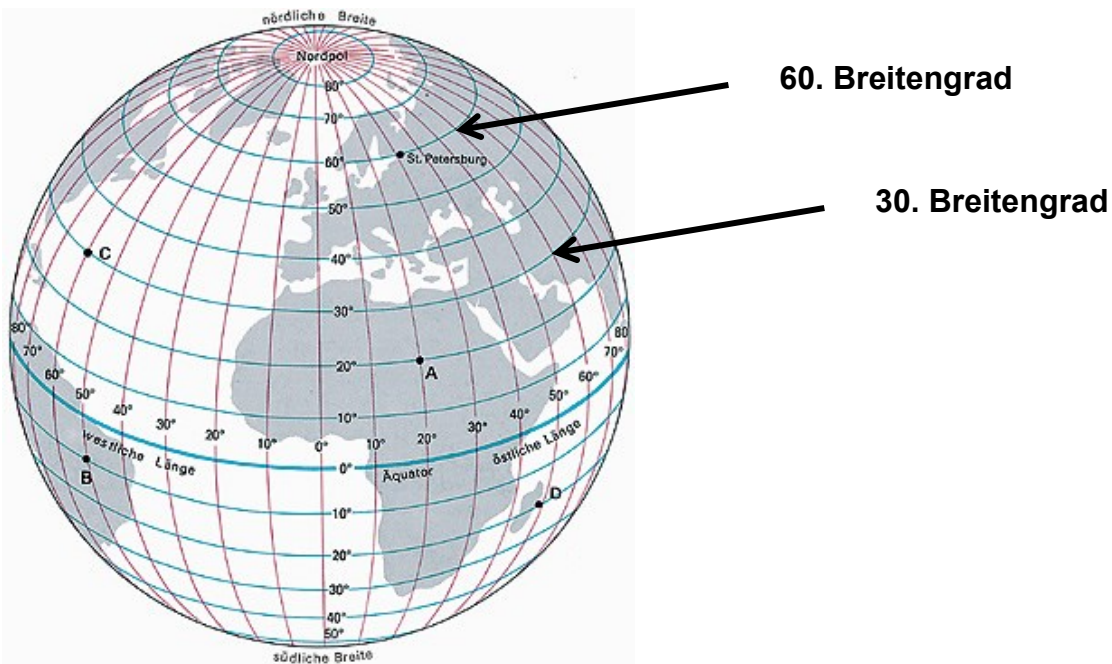


BILD 2.13 Bereich der nördlichen Halbkugel zwischen dem 30. und 60. Breitengrad ([www.klett.de](http://www.klett.de)).

**Abwärmepotenziale f. 30.-60. Breitengrad**

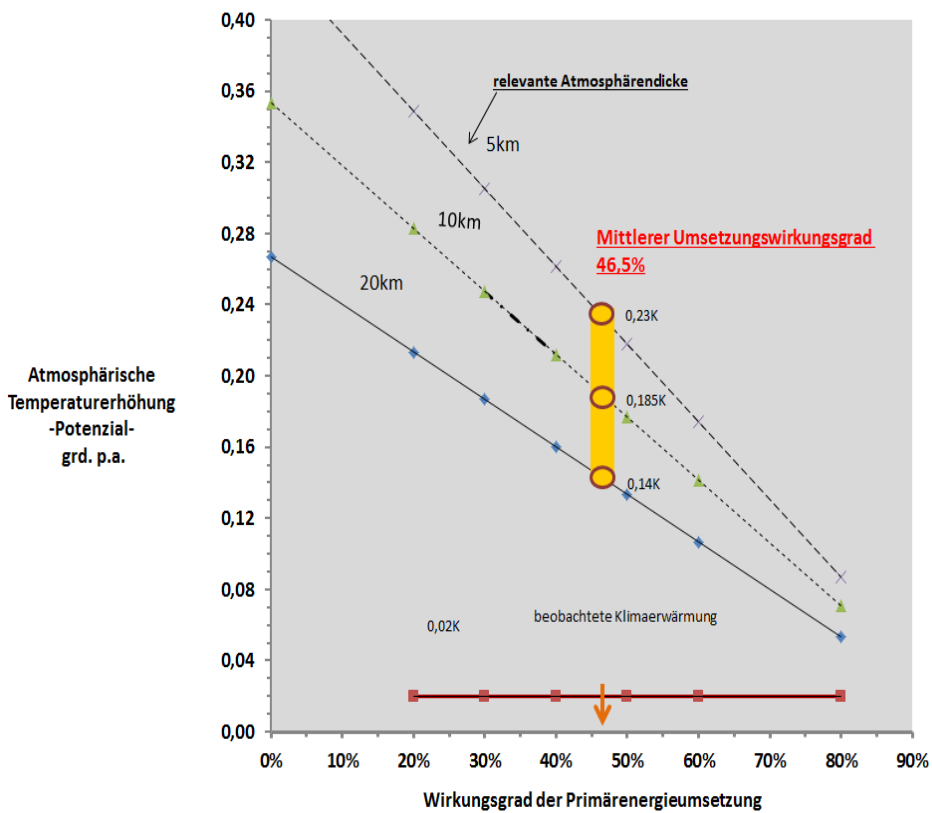


BILD 2.14 Abwärme- und atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale für den Bereich 30. bis 60. Breitengrad. Mittelwerte über die jeweilige Atmosphärendicke. Abwärme:  $1,32 \cdot 10^{20}$  J p.a. bei 46,5 % Umsetzungswirkungsgrad.

TAB. 2.2 Atmosphärische Klimaerwärmungspotenziale durch anthropogene Abwärme. Die Erdoberfläche hat ca.  $510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  insgesamt. Davon liegen ca.  $100 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  zwischen dem 30. und 60. Breitengrad.

	Wärmemenge p.a.	atmosphärisches Temperaturerhöhungspotenzial p.a. bei Ausbreitung über ...	
		20 km	5 km
Abwärme global	0,53 MJ/m <sup>2</sup> (0,017 W/m <sup>2</sup> )	0,058 °C	0,092 °C
Abwärme Nordhalbkugel (30. bis 60. Breitengrad)	1,30 MJ/m <sup>2</sup> (0,042 W/m <sup>2</sup> )	0,140 °C	0,230 °C
Gemessene Klimaerwärmung (in der Nähe der Erdoberfläche)			0,020 °C

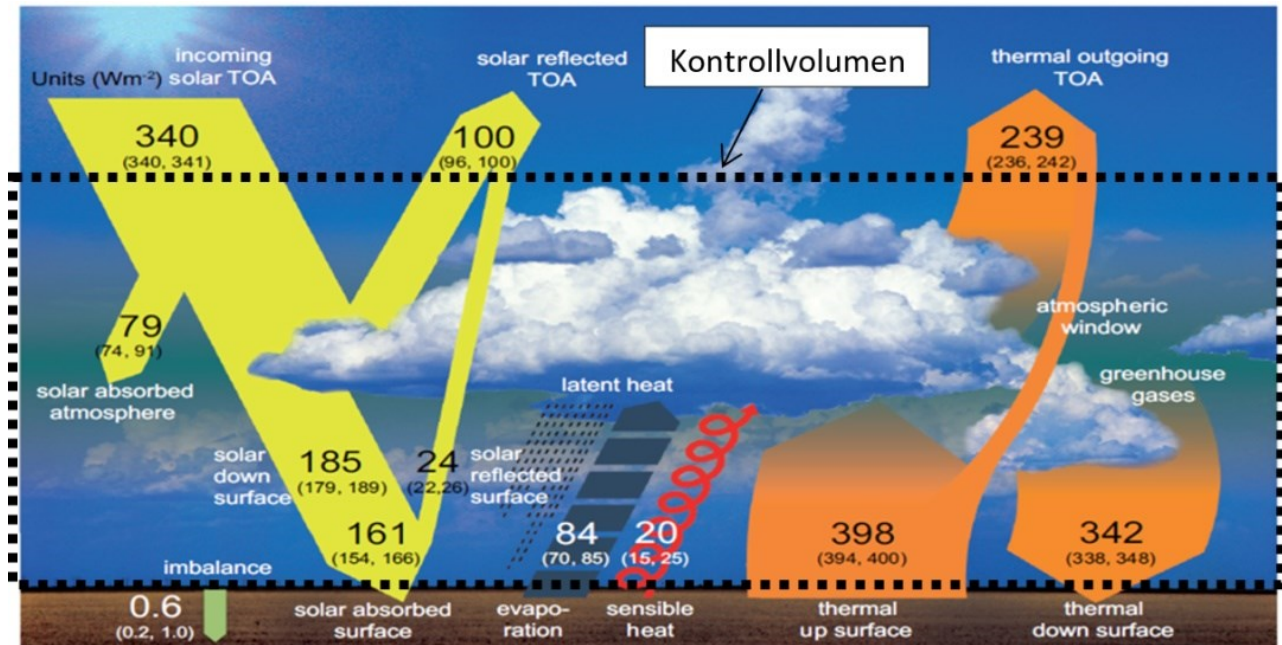


BILD 3.1 Strahlungsbilanz nach IPCC 2013 [23].

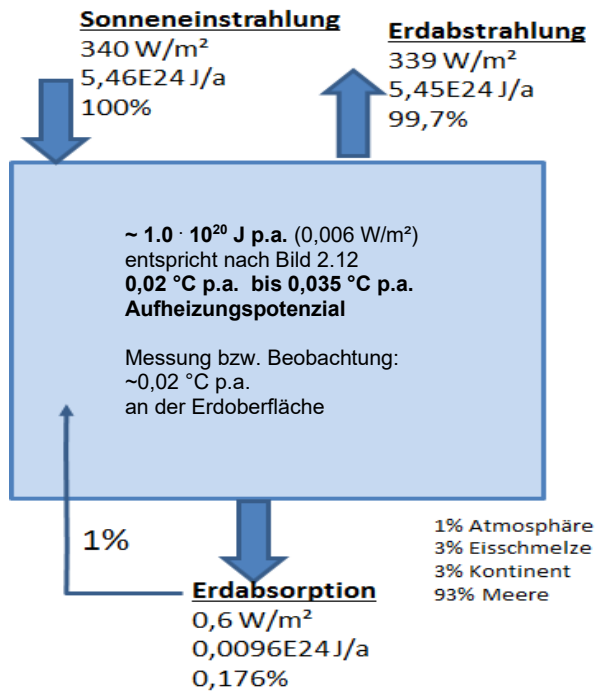


BILD 3.3 Klimaerwärmung in der Atmosphäre aufgrund der Strahlungs-Imbalance (0,6 W/m<sup>2</sup>).

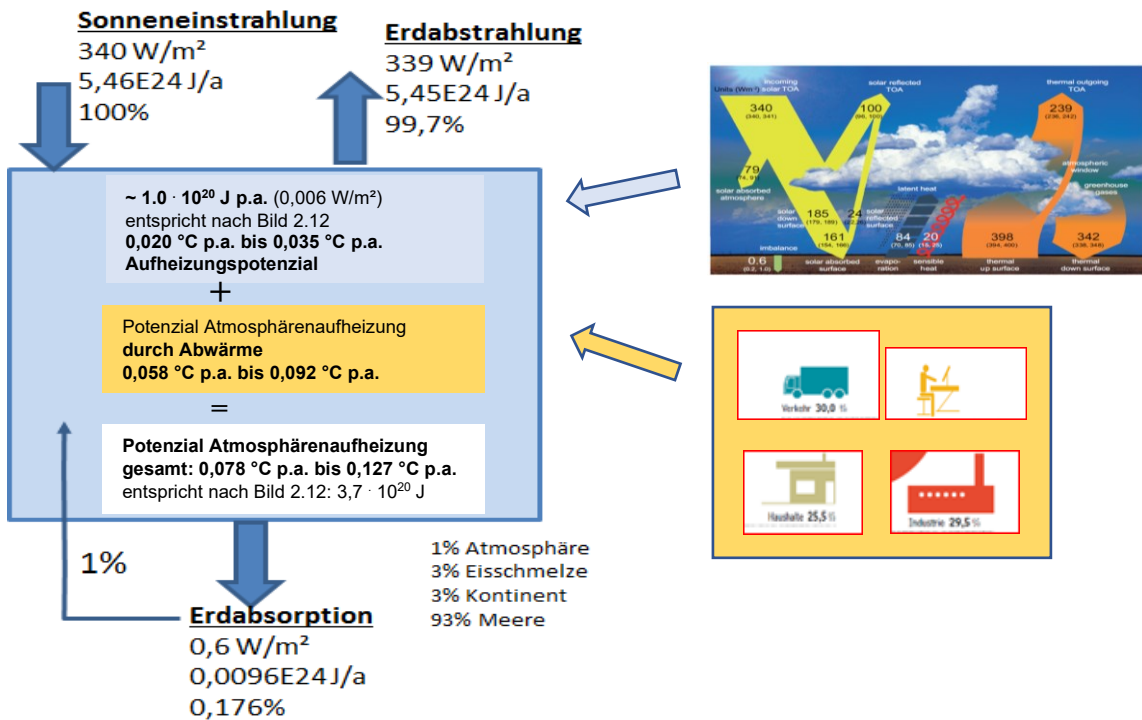


BILD 3.4 Atmosphärische Klimaerwärmungspotenziale aufgrund von Strahlungseinträgen plus anthropogener Abwärmeproduktionen (globale Betrachtung).

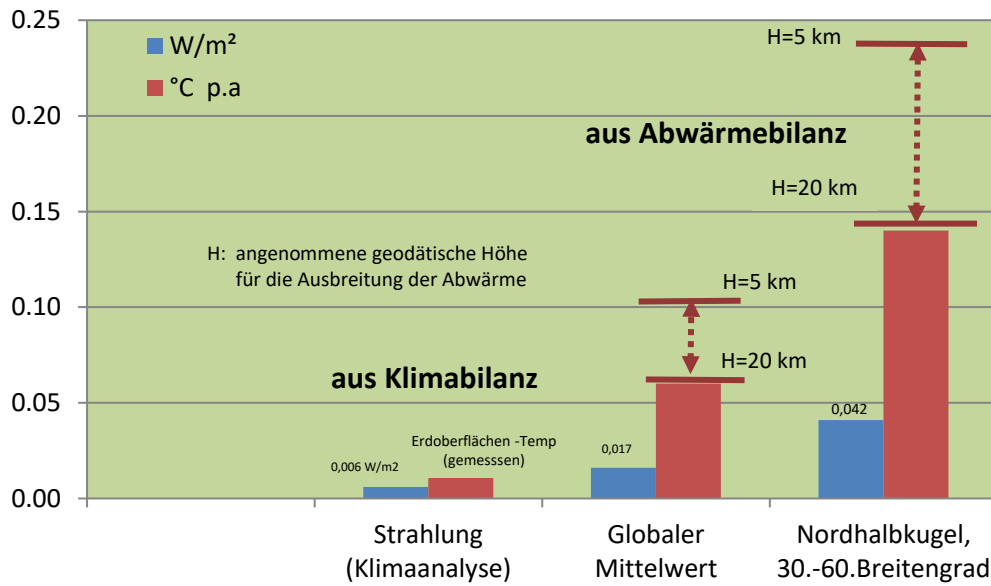


BILD 3.5 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale durch anthropogene Abwärme im Vergleich zur gemessenen Oberflächentemperatur-Zunahme von 0,02°C p.a.

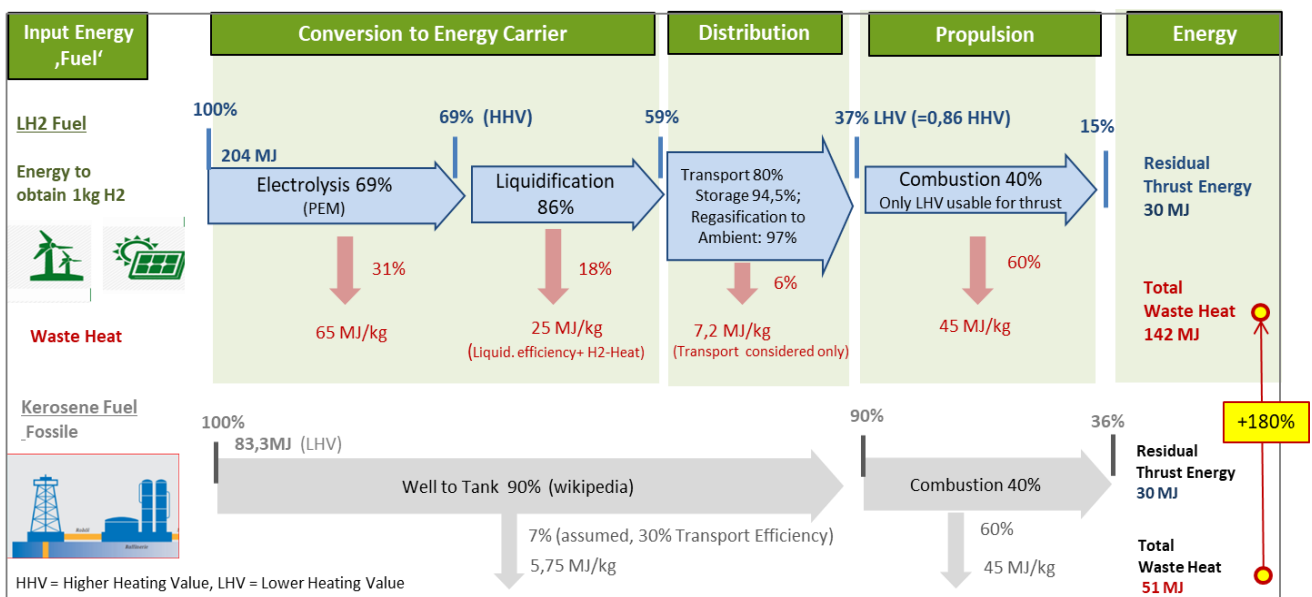


BILD 4.1 Energie- und Abwärmebilanz bei der synthetischen LH2 Brennstoffherstellung für die Luftfahrtanwendung (HHV = 141 MJ/kg; LHV = 120 MJ/kg).

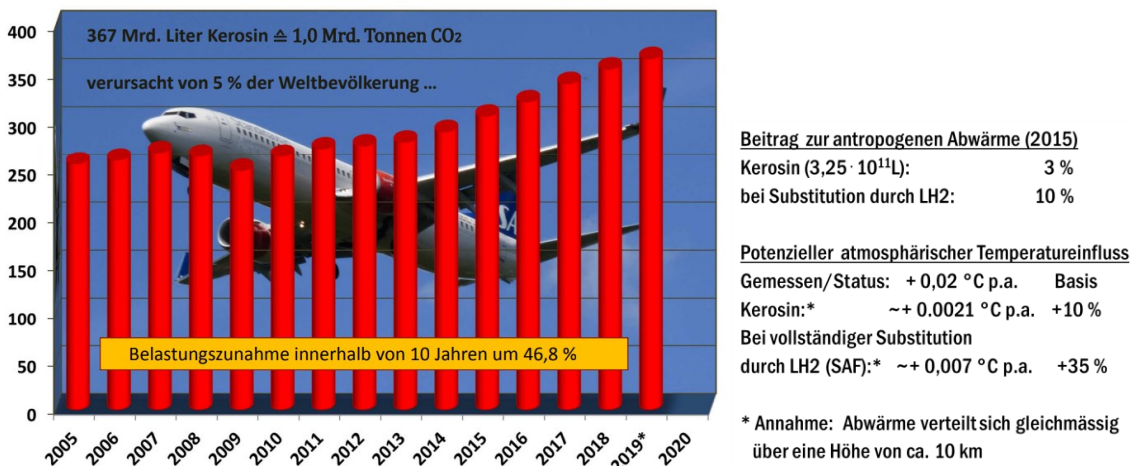


BILD 4.2 Kerosinverbrauch im kommerziellen Luftverkehr (IATA, ICAO, Statista 2022) [25].

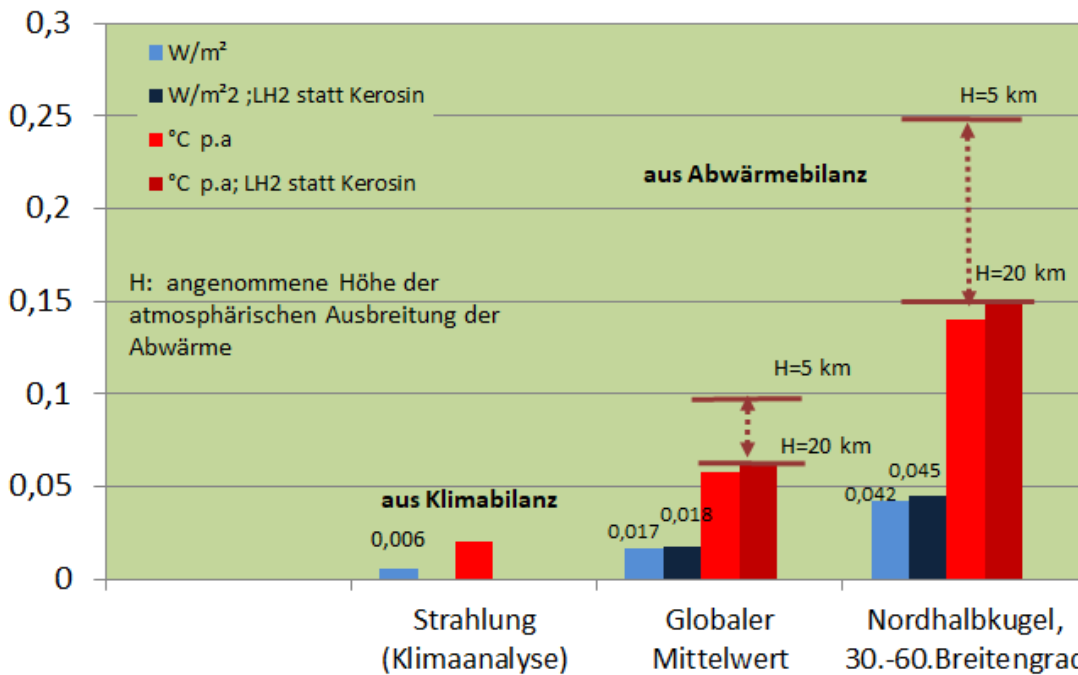


BILD 4.3 Einfluss der vollständigen Substitution von Kerosin durch LH2 im Luftfahrtbereich.



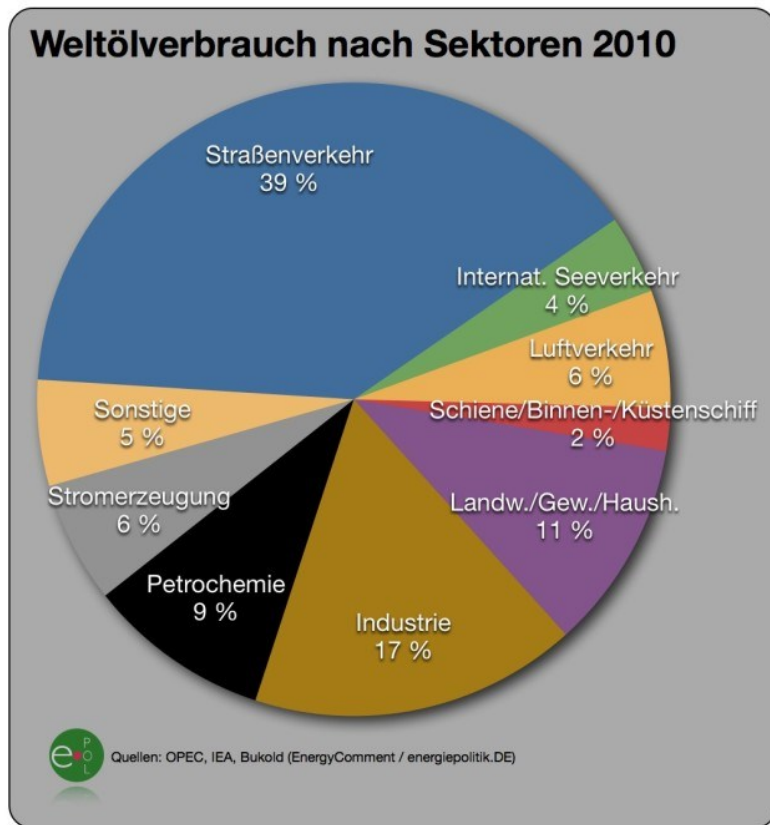


BILD 4.4 Luftfahrt im Vergleich zum Straßenverkehr anhand der Erdölverbräuche [26].