



Zum Einfluss anthropogener Abwärme auf die Klimaerwärmung der Atmosphäre

Beitrag zur Klimaerwärmung durch Abwärme aus Haushalt, Industrie, Gewerbe und
Verkehr

Dr.-Ing. Klaus Rüd

Consulting Propulsion and Technology

Munich, Germany

Dr.-Ing. K. Rüd

München, Update Sept 2023



Abstract

Auf der Basis grundlegender thermodynamischer Analysen werden Abschätzungen zum potenziellen Einfluss von Abwärme aus Industrie, Heizung, Gewerbe und Verkehr auf die globale Temperaturerhöhung der Atmosphäre durchgeführt. Die Bedeutung der anthropogenen Abwärme scheint nach vorliegender Erkenntnis nur wenig beachtet worden zu sein.

Hintergrund ist die Einschätzung der klimarelevanten Auswirkung zukünftiger synthetischer Brennstoffe als Ersatz für bisherige fossile Brennstoffe, insbesondere für Luftfahrt und Straßenverkehr. Synthetische Brennstoffe sind gekennzeichnet durch sehr hohe Energiebedarfe zur Herstellung mit dementsprechend sehr hohem Abwärmeeinfall.

Die Untersuchung der Klimaerwärmungspotenziale durch Haushalt, Verkehr, Industrie und Gewerbe, erfolgt anhand der dazu abgeleiteten Umsetzungswirkungsgrade von verbrauchter Primärenergie in Nutzarbeit und Abwärme. Dabei stellt sich heraus, dass im weltweiten Mittel mehr als 50% der verbrauchten Primärenergie in Abwärme bzw. in die direkte konvektive Aufheizung der Atmosphäre übergeht.

Ausgehend von der in den vergangenen Jahrzehnten meteorologisch beobachteten Klimaerwärmung von im Mittel 0,02 grd pro Jahr weltweit, werden aufgrund von Abwärme zusätzliche Temperaturerhöhungspotenziale der Atmosphäre in der gleichen Größenordnung und höher identifiziert. Berücksichtigt man, dass ca. 50-60% des Primärenergieverbrauchs auf der Nordhalbkugel zwischen dem 30. und 60. Breitengrad stattfindet, so steigt das Temperaturerhöhungspotenzial durch Abwärme in diesem Bereich auf mehr als 0,1 grd p.a. an.

Bisherige Analysen zur Klimaerwärmung beruhen nach den hier gewonnenen Erkenntnissen hauptsächlich auf der Modellierung und Bilanzierung des Strahlungsaustausches zwischen Weltall und Erde unter Berücksichtigung CO₂ äquivalenter Abgasverunreinigungen und deren Interaktion mit der Atmosphäre. Die Berücksichtigung der konvektiven Abwärme aus Heizung, Industrie und Verkehr konnte in gängigen Umweltberichten nicht identifiziert werden (z.Bsp. IPCC Report 2021). Dies liegt in der Begründung oft daran, dass die kurzwelligen Strahlungswärmeströme der Sonne auf die Erde und die reflektierten langwelligen Wärmestrahlung zurück ins Weltall um den Faktor 10⁴ grösser sind als die zu betrachtenden konvektiven anthropogenen Abwärmemengen.

Relativ zur Differenz zwischen Einstrahlung und Abstrahlung inklusive Berücksichtigung der Wärmeströme, die dabei in atmosphärische Lufterwärmung



umgewandelt werden, ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Die anthropogene Abwärme zeigt sogar ein höheres Luftaufheizungspotenzial als aus dem Strahlungsaustausch zwischen Sonne und Erde für den erdoberflächennahen Bereich vorhergesagt und auch beobachtet wird. Hinzu kommt eine Erhöhung Feuchtigkeitsaufnahmefähigkeit der Luft (Sättigungsdruck), was in seiner Klimaauswirkung bezüglich Austrocknung der Erdoberfläche nicht unbedenklich erscheint.

Auch bezüglich Luftfahrt und Substitution herkömmlicher fossiler Brennstoffe durch synthetische Brennstoffe (SAF) erscheinen die hier errechneten Abwärmeeinflüsse nicht vernachlässigbar. Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch SAF hat die zusätzliche Abwärmefreisetzung bei der Brennstoffherstellung das Potenzial, die atmosphärische Klimaerwärmung um 5-17% zu beschleunigen, je nach Betrachtungsweise. Bezieht man den Straßenverkehr mit ein, so kann bei vollständiger Substitution durch SAF die atmosphärische Klimaaufheizung auf das Doppelte und mehr beschleunigt werden. Bei den vorgesehenen niedrigen Einführungsgeschwindigkeiten bleiben diese SAF- Effekte allerdings vorerst noch gering

Die anthropogene Abwärme erweist sich als weiterer, nicht zu vernachlässigender Parameter zum Klimawandel. Vielleicht kann die vorliegende Untersuchung hierzu einen Anstoß liefern und auch helfen zu erklären, weshalb die Klimaerwärmung stärker ausgeprägt ist, als vorhergesagt und vermutet wird.

Die ermittelten anthropogenen Abwärmeeffekte beschreiben im Prinzip nur theoretische Potenziale und Größenordnungen zum Klimaeinfluss. Inwieweit diese Wärme die Atmosphäre nach außen verlässt, in die Erde eindringt und tatsächlich zur finalen Lufterwärmung beiträgt, bedarf weiterer Klärung durch klimatechnische Fachexperten.



Zum Einfluss anthropogener Abwärme auf die Klimaerwärmung der Atmosphäre

Gliederung

1. Hintergrund und Problemstellung
 - *Klimarelevante Einflüsse synthetischer Brennstoffe im Hinblick auf Energieverbrauch und Abwärmeerzeugung*
 - *Einfluss anthropogener Abwärme auf die Temperaturerhöhung in der Atmosphäre*
2. Atmosphärische Klimaerwärmungspotenziale aufgrund fossiler Primärenergie-Verbrennung
 - *Vorgehensweise und Berechnungsmethoden*
 - *Parametrische Ermittlung relevanter Primärenergie- Umsetzungwirkungsgrade*
 - *Quantitative Klima-Erwärmungspotenziale anhand globaler Primärenergieverbräuche*
 - *Abwärme Effekte im Bereich der nördlichen Erd-Halbkugel*
3. Die ermittelten Klimaerwärmungspotenziale durch Abwärme in Relation zu Ergebnissen aus veröffentlichten Klimaberichten
 - *Atmosphärischen Klimaerwärmung aus Klimaberichten (IPCC)*
 - *Zusatzeinfluss aufgrund anthropogener Abwärme*
 - *Bewertung und Diskussion*
4. Potenzielle Klimaerwärmungsbeiträge durch Einführung synthetischer Brennstoffe
 - *Luftfahrt*
 - *Verkehrswesen insgesamt*
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung
6. Anhang
7. Literatur
8. Author's Biography



1. Hintergrund und Problemstellung

Klimarelevante Einflüsse synthetischer Brennstoffe im Hinblick auf Energieverbrauch und Abwärmeerzeugung

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 klimaneutral hergestellt werden. Typische Vertreter sind der derzeit hochaktuelle LH2 Brennstoff oder die synthetischen Benzin-, Diesel oder Kerosinbrennstoffe, die mittels H2-Elektrolyse, Carbon Capture und Fischer Tropsch Synthese erzeugt werden, wie in Abb. 1.1 und 1.2 dargestellt. Die angeführten Umsetzungswirkungsgrade in den einzelnen Prozessschritten kennzeichnen die Effizienz der Herstellung.

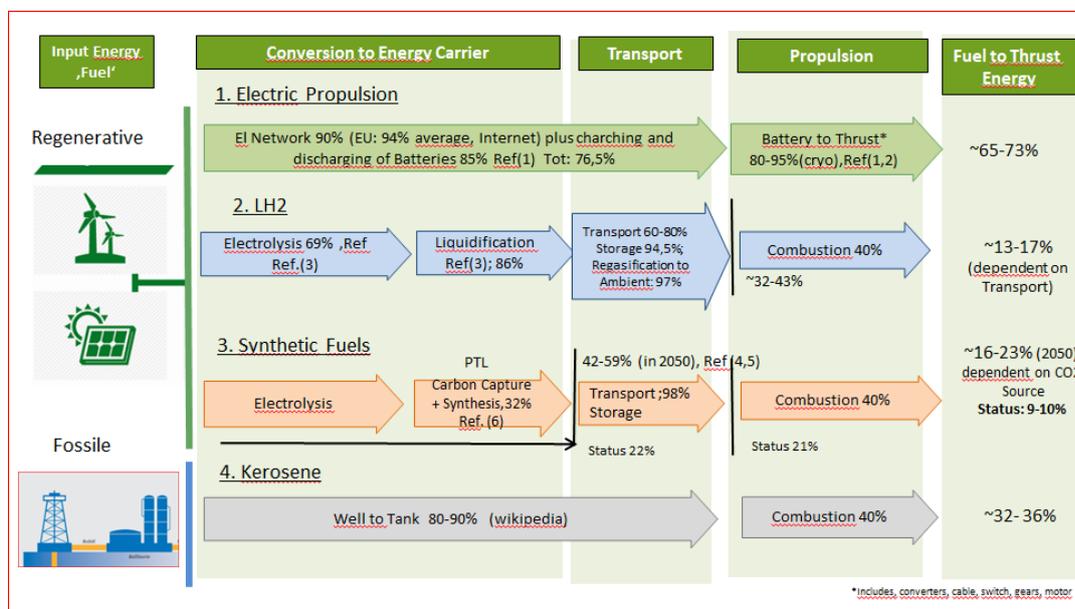


Abb. 1.1 Alternative Brennstoffe für Luftfahrtantriebe

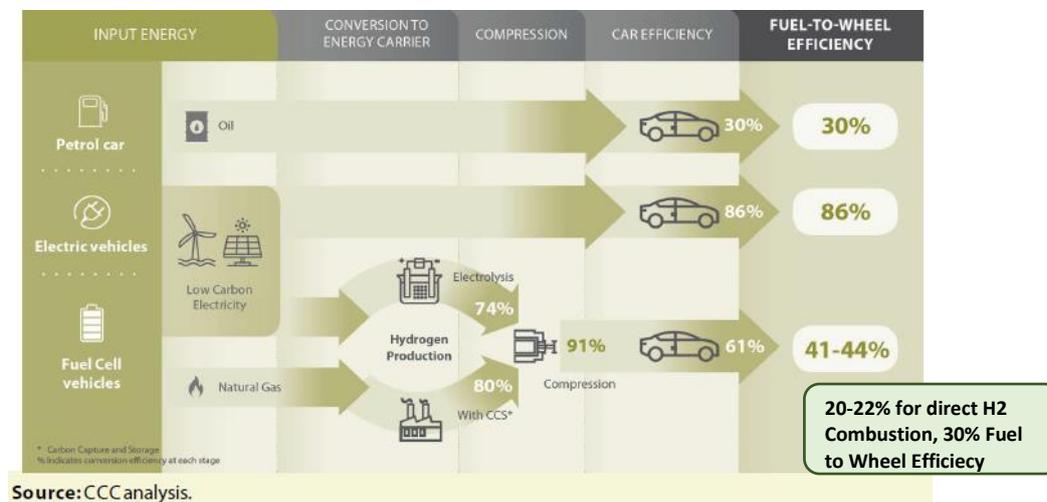


Abb. 1.2 Alternative H2-Brennstoffe für Automobilantriebe, Ref 7 (CCS= Carbon Capture System)



Beide Beispiele zeigen, dass es unterschiedliche Möglichkeiten zur Generierung alternativer Brennstoffe gibt, und im Schnitt ein um den Faktor 3-5 höherer Energieaufwand benötigt wird, als bei herkömmlichen fossilen Brennstoffen. Die hohen Energieaufwände zur Brennstoffherstellung können trotz der prognostizierten Prozessverbesserungen (Abb.1.1) nur durch den Übergang zu elektrischen Antrieben eingedämmt werden. Elektrisch Antriebe sind nach vorliegendem Ermessen die effizienteste Form der Umsetzung regenerativer Energien. Es können bei gleicher Energieverfügbarkeit mehr als 3-mal so viele Antriebe bedient werden, als durch Einführung synthetische Brennstoffe, inkl. H2.

Zur Verdeutlichung der mit der Synthetischen Brennstoffherstellung verbundenen Abwärmebelastung der Umwelt sind in Abb. 1.3-1.5 zwei Beispiele gezeigt. Bei der LH2 Bereitstellung mittels Elektrolyse, Abb.1.3, ergeben sich gegenüber Kerosin beträchtlich erhöhte Abwärmemengen, vor allem durch die Elektrolyse, die Gasverflüssigung und die Brennstoffverteilung bzw. den Brennstofftransport. Bei der in Ansatz gebrachten PEM Elektrolyse wird analog zu Ref. 8 angenommen, dass die Verluste nahezu vollständig als Abwärme anfallen. Der erhöhte Transportaufwand resultiert aus den um den Faktor 10-11 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.

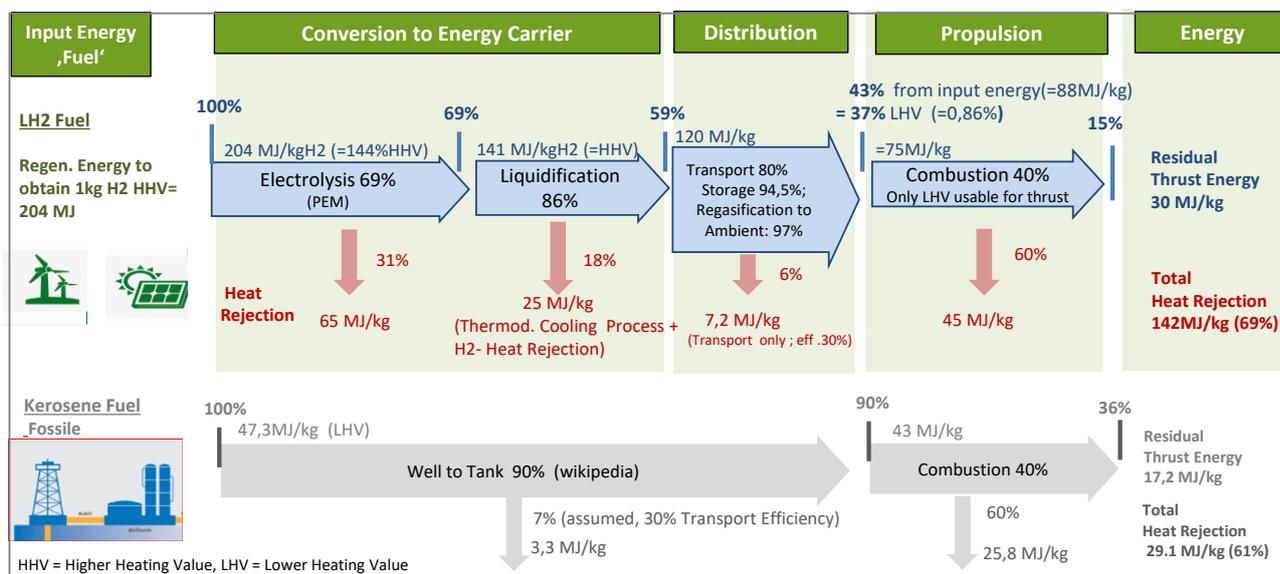


Abb. 1.3 : Energie- und Abwärmebilanz bei der synthetischen LH2 Brennstoff Herstellung für die Luftfahrtanwendung (HHV =141 MJ/kg; LHV= 120 MJ/kg)

Zur weiteren Verdeutlichung der Unterschiede ist in Abb. 1.3.1 der Vergleich von Energiebedarf und Abwärme bei gleicher Schubenergie gezeigt.

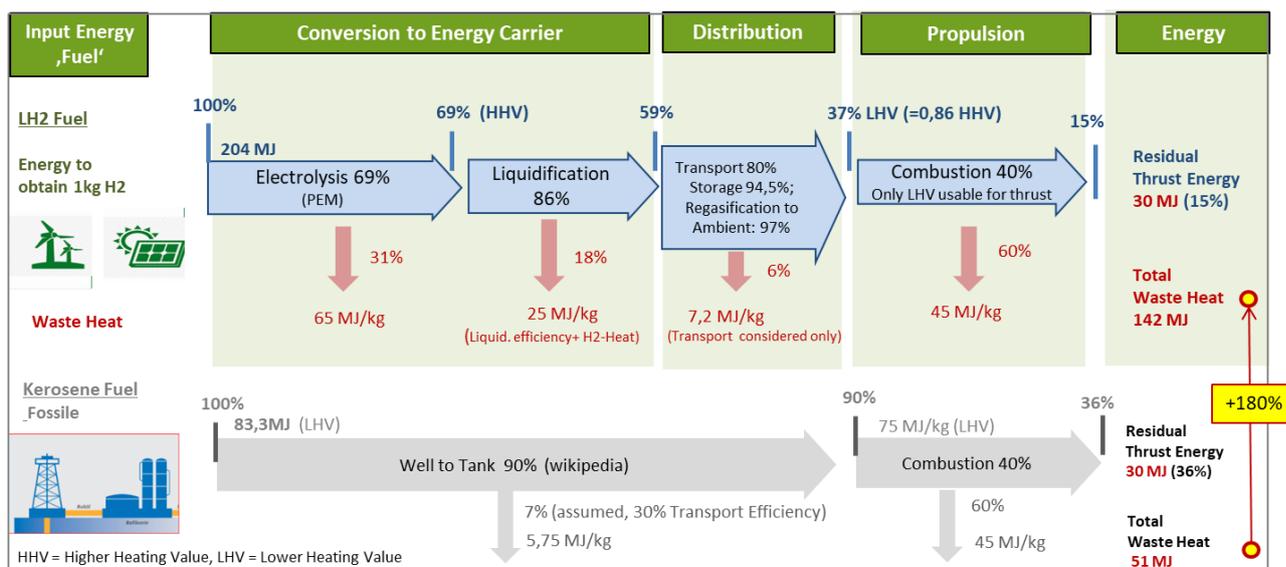


Abb. 1.3.1 Energie- und Abwärmebilanz bei LH2-Brennstoffherstellung für die Luftfahrtanwendung – im Vergleich zu Kerosin bei gleicher Schubleistung

Die Darstellung von Abb. 1.3 zeigt, dass für die Herstellung von 1 kg H₂ ca. 204 MJ an Energie benötigt werden, und dass am Flieger von dieser Herstellenergie nur noch 30 MJ an Schubenergie übrig bleiben. Die dabei anfallenden Abwärmeverluste liegen bei insgesamt 142 MJ bzw. 69% der eingesetzten Herstellenergie.

Die aus dem Vergleich mit Kerosin erzielten Ergebnisse sind in Tab 1.1 zusammengefasst. Das Verhältnis von notwendiger Primär-/Herstellenergie zur Schub-Energie verdoppelt sich vom Faktor 2,75 auf 6,8 bei LH₂-Verbrennung. Das Verhältnis Abwärme- zu Energiebedarf ist ungefähr gleich (61 bzw 69%). Das Verhältnis Abwärme zu Schubenergie ist um beträchtliche ~170% größer.

Für eine vergleichbare Flugzeuganwendung (gleiche Payload) ist davon auszugehen, dass LH₂ betriebene Flugzeuge wegen der erheblich größeren und schwereren Tankanlagen einen um min. 20% höheren Schubbedarf haben werden. Gegenüber Kerosinbetrieb steigen der Energiebedarf zur Herstellung der benötigten Treibstoffmenge und die dabei anfallende Abwärme um +197 bzw. 217% an (der höhere Heizwert von LH₂ ist berücksichtigt).

	Synthet. LH2 Fuel	Kerosene	LH2 rel Kerosene
• Input-/Thrust Energy	6,8	2,75	+150%
• Waste Heat/ Input Energy,	69%	61%	+ 8 %
• Waste Heat/Thrust Energy	4,7	1,62	+170%
• Thrust energy for same aircraft category*	120%	100%	+20%
• Input energy for same aircraft category*	297%	100%	+197%
• Waste Heat for same aircraft category*	317%	100%	+217%
• includes +20% thrust due to bigger aircraft from larger and much heavier LH2 fuel tank			

Tab 1.1 Energie- und Abwärmebilanz für LH₂ Brennstoff gegenüber Kerosin



Gegenüber der LH2 Treibstoffherstellung ist die in Abb. 1.1. ebenfalls dargestellte synthetische Kerosinherstellung über Elektrolyse, Carbon Capture und Fischer Tropsch deutlich komplexer und gegenwärtig um ca. 30-40% energieintensiver. Es wird prognostiziert, dass langfristig diese synthetische Kerosinherstellung vom Energiebedarf her gleichwertig oder sogar etwas effizienter als die LH2 Herstellung gestaltet werden könnte. Bezüglich Abwärme wird für eine erste Abschätzung angenommen, dass beide Brennstoffherstellprozesse vergleichbar sind. Dies impliziert, dass der Wärmanfall durch LH2 Verflüssigung und LH2 Transport mit dem Wärmanfall für Carbon Capture und der anschließenden Synthesegasaufbereitung vergleichbar werden könnte. Präzisere Angaben hierzu waren nicht zu finden.

Ein drittes, noch prägnanteres Beispiel zur Verdeutlichung der mit synthetischer Brennstoffherstellung verbundenen Umweltbelastung wird in Abb. 1.4 und Abb. 1.5 beschrieben, vgl. Ref.9. Bei diesem Sun-To-Liquid (STL) Prozess wird Solarenergie thermisch konzentriert und über thermochemische Hochtemperatur- Prozesse synthetisches Kerosin und Naphtha (Beiprodukt) hergestellt.

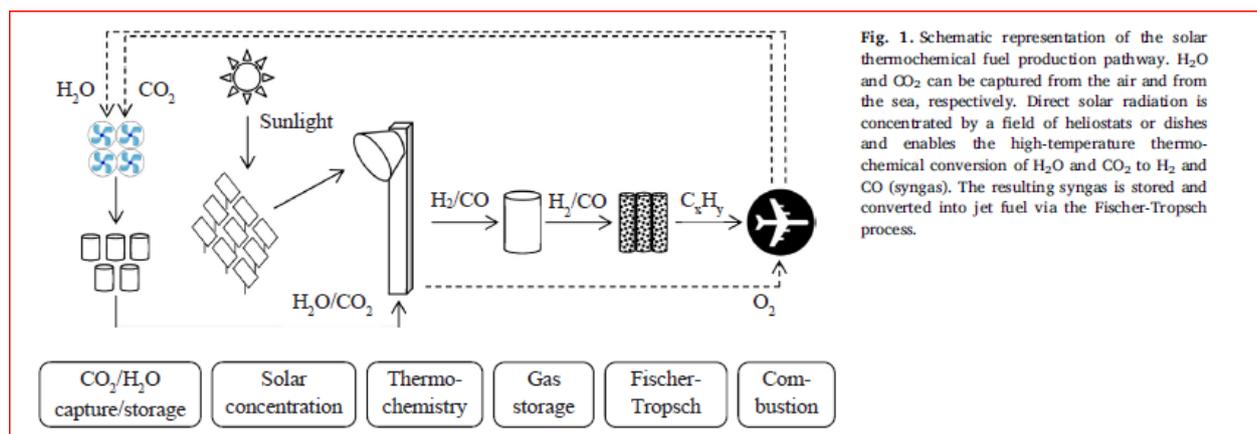


Abb 1.4 Synthetische Brennstoffherzeugung über Solarthermie , Ref 9

Im Gegensatz zur Herstellung über H₂ Elektrolyse werden hier aufbereitetes H₂O und über Carbon Capture aufgefangenes CO₂ thermisch zu H₂ und CO als Synthesegase umgewandelt, und daraus anschließend über Fischer -Tropsch und Hydro- Cracking künstliches Kerosin hergestellt. Dazu werden aus der solaren Primärenergie für die erforderlich hohen Prozesstemperaturen (1900K) sehr hohe Mengen an thermischer und el. Energie benötigt und erzeugt.

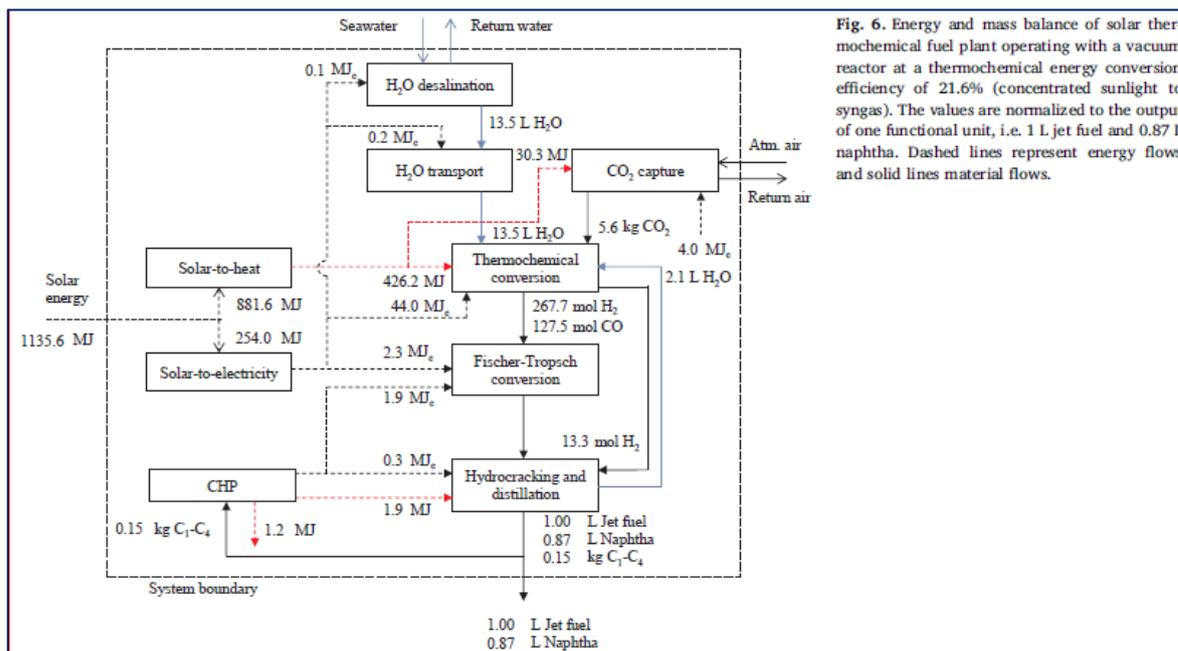


Fig. 6. Energy and mass balance of solar thermochemical fuel plant operating with a vacuum reactor at a thermochemical conversion efficiency of 21.6% (concentrated sunlight to syngas). The values are normalized to the output of one functional unit, i.e. 1 L jet fuel and 0.87 L naphtha. Dashed lines represent energy flows and solid lines material flows.

Abb. 1.5 Energie- und Wärmebedarfe bei solarthermischer Brennstoffsynthese (Heizwert Kerosin=34MJ/l) nach Ref. 9

Der Gesamtwirkungsgrad ((Kerosin- + Naphtha-)/ Primärenergie) liegt bei lediglich ca. 5-8 % . Die direkten Wärmeverluste dieses Prozesses konnten anhand der in /9/ aufgeführten Energiebilanzen identifiziert werden. Bezogen auf die Endprodukte Kerosin und Naphtha ergeben sich sehr hohe Wärmeverluste, die das 7-8 fache des Energieinhalts (Heizwert) der Endprodukte erreichen, hauptsächlich aufgrund der aufwendigen CO2 Capture- und Synthesegasherstellprozesse. Bei der Herstellung von synthetischem LH2 liegt zum Vergleich die Abwärmeproduktion lediglich beim 1,3 - fachen des Brennstoff- Energieinhalts (s. Abb.1.2)

Fazit: Die Einführung von synthetischen Brennstoffen in der Luftfahrt und im Verkehr führt nicht nur zu stark erhöhtem Energiebedarf, sondern auch zu stark erhöhten Abwärmelasten für die Umwelt. Noch signifikanter wird dieser Effekt, wenn der dafür notwendige Strom nicht zu 100% regenerativ bereitgestellt werden kann, sondern teilweise auch über thermische Kraftwerke erfolgen muss (wovon derzeit auszugehen ist).

Um das Ausmaß dieser Abwärmelasten durch synthetische Brennstoffe für den gesamten Luftfahrt- und Straßenverkehr adäquat bewerten zu können, werden in einem ersten Schritt die insgesamt global anfallenden Abwärmemengen ermittelt und dann zu den Ergebnissen für die Bereitstellung synthetischer Brennstoffe ins Verhältnis gesetzt.

Anmerkung: die regenerativ erzeugte Energie ist nicht umweltneutral. Die aus Windkraft und Sonnenenergie entnommene Energie wird über Umwandlung in Strom (PTL) und anschließende Prozesswärme-/Arbeitsumsetzung oder direkt über thermische Energie (STL) auf ein erhöhtes Temperatur Niveau gebracht, was neben



zwischen Weltall und Erde, die anthropogenen Abwärmemengen um Größenordnungen kleiner sind.

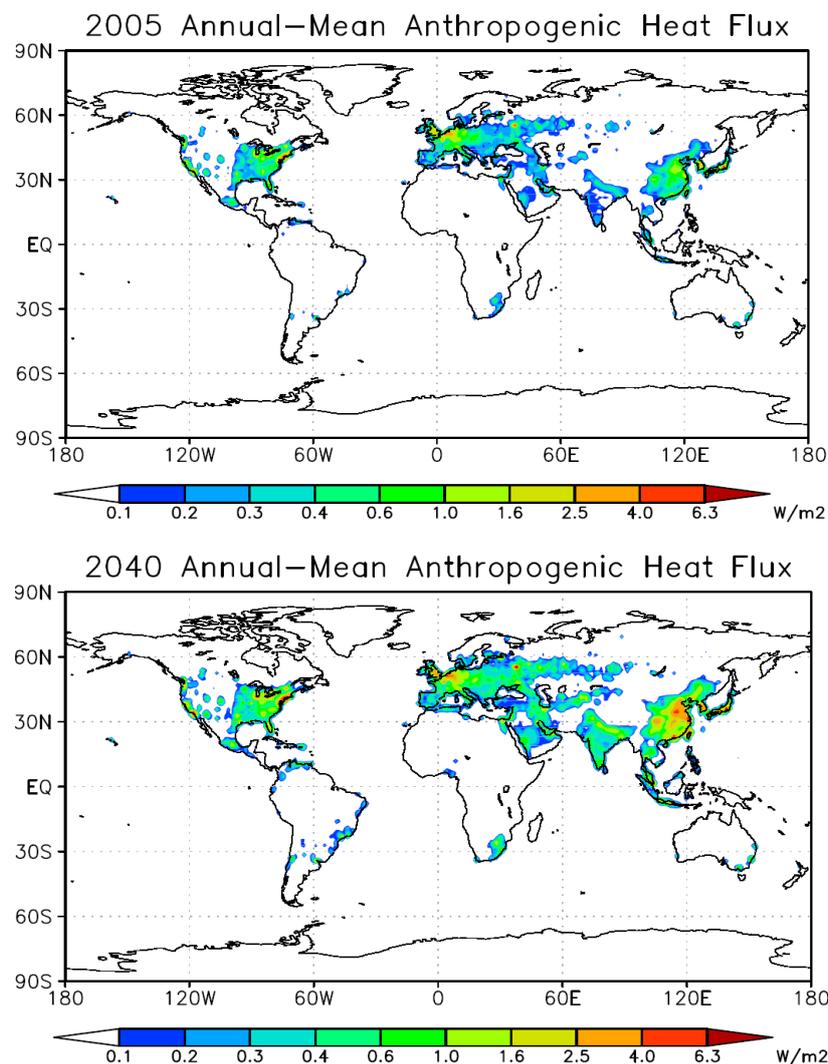


Abb. 1.7 Anthropogene Wärmeausbreitung nach Flanner 2009, Ref /13/

Auf der Basis des 1. Und 2. Hauptsatzes der Thermodynamik werden aus den bekannten Verbräuchen an Primärenergie die daraus resultierenden Abwärmemengen zur atmosphärischen Temperaturerhöhung abgeleitet und den Ergebnissen aus terrestrischen Strahlungsbilanzen der Klimaexperten gegenübergestellt.

Es können hier anhand der ermittelten Abwärmemengen nur potenzielle Ausmaße zur atmosphärischen Klimaerwärmung angegeben werden. Die Umsetzung in tatsächliche atmosphärische Temperaturerhöhung kann aufgrund fehlender Kenntnisse nur spekulativ, aber dennoch mit Plausibilität versehen, erklärt werden. Die für eine präzisere Aussage erforderliche strömungs- und strahlungstechnische Expertise erfordert eine Unterstützung durch Klimaexperten.



2. Atmosphärische Klimaerwärmungspotenziale aufgrund fossiler Primärenergie-Verbrennung

Vorgehensweise und Berechnungsmethoden

Zur Einschätzung der Bedeutung von Abwärme aus neuer synthetischer Brennstoffproduktion wird in diesem Abschnitt die Kritikalität der weltweit aus Industrie, Haushalten, Gewerbe und Verkehr bereits anfallenden Abwärmemengen ermittelt. Zunehmende Einflüsse aus Vulkanausbrüchen, Waldbränden oder Sahara-Wind ähnlichen Phänomenen werden nicht berücksichtigt.

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

$$\eta = A/Q_{zu} \quad (1)$$

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

Mit: η = Wirkungsgrad ; A = in Arbeit umgesetzte Energie; Q_{zu} = zugeführte Primärenergie; Q_{ab} = Abwärme

Die Umsetzung der Primärenergie in Arbeit und Abwärme erfolgt nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$Q_{zu} - A = Q_{ab} \quad (3)$$

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

Mit ΔH = Änderung der Enthalpie (der Atmosphäre); M = Luftmasse (der Atmosphäre); c_p = spez Wärmekapazität bei konst. Druck (da in der Atmosphäre die Luft sich ungehindert ausdehnen kann, gilt hier c_p , vgl. Ref10; ΔT = Temperaturerhöhung (der Atmosphäre)

Aus den Gleichungen (1)-(4) lässt sich für vorgegebene Primärenergiezufuhr Q_{zu} und realistisch angenommenem Umsetzungswirkungsgrade η die resultierende potenzielle Aufheizung der Atmosphäre berechnen:

$$\Delta T = Q_{ab} / (M \cdot c_p). \quad (5)$$

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

90 % der Atmosphäre liegen unter 20 km Höhe.

70 % der Atmosphäre liegen unter 10 km Höhe.

55 % der Atmosphäre liegen unter 5 km Höhe.

(Quelle: Wikipedia)



Das Ergebnis folgt dem in Abb 2.4 gezeigten Schema, wobei ein repräsentativer Umsetzungswirkungsgrad ETA aus Primärenergie - Verbrauchsstatistiken noch abzuleiten ist. Je geringer der Umsetzungswirkungsgrad, desto grösser die Abwärmeerzeugung und das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial.

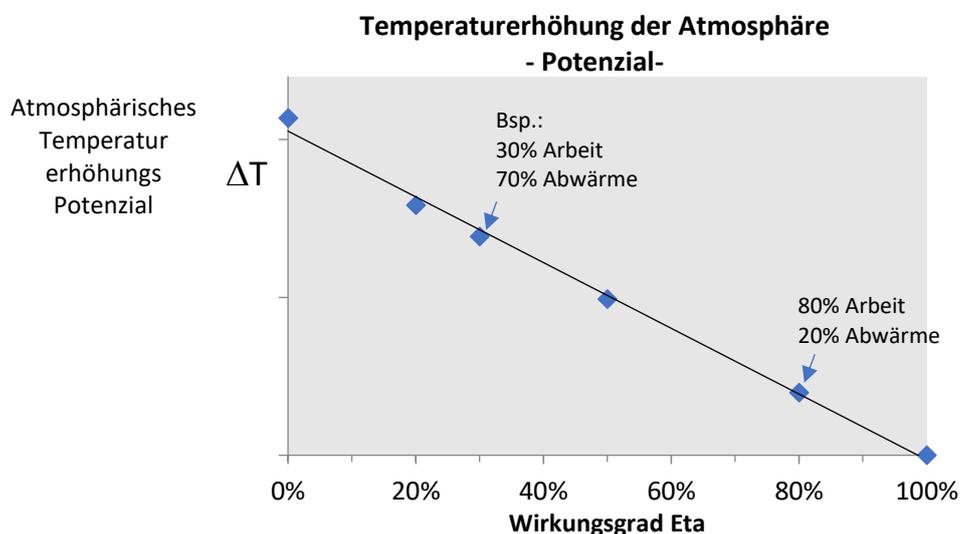


Abb. 2.1 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale durch Abwärme (Prinzipielle Darstellung)

Die aus der konvektiven Abwärme berechneten Temperaturerhöhungspotenziale der Atmosphäre werden den beobachteten Werten gegenübergestellt:

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

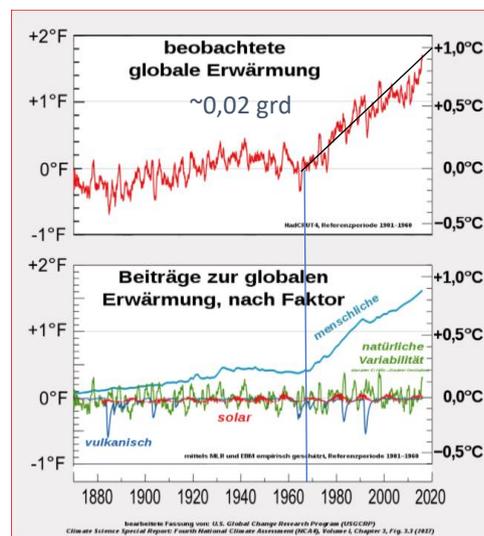
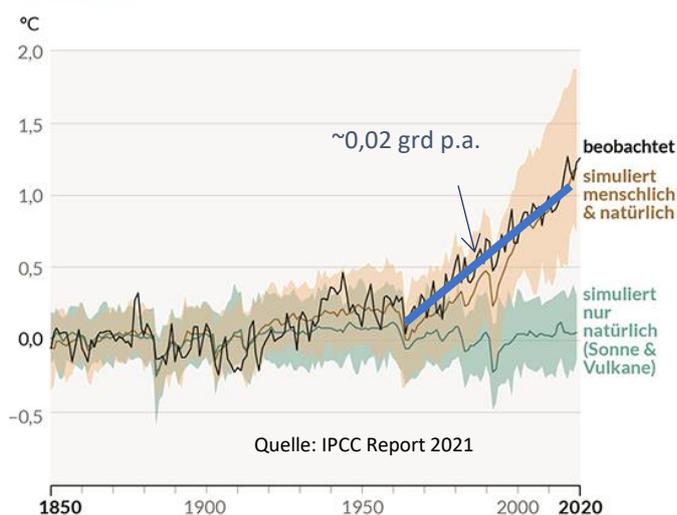


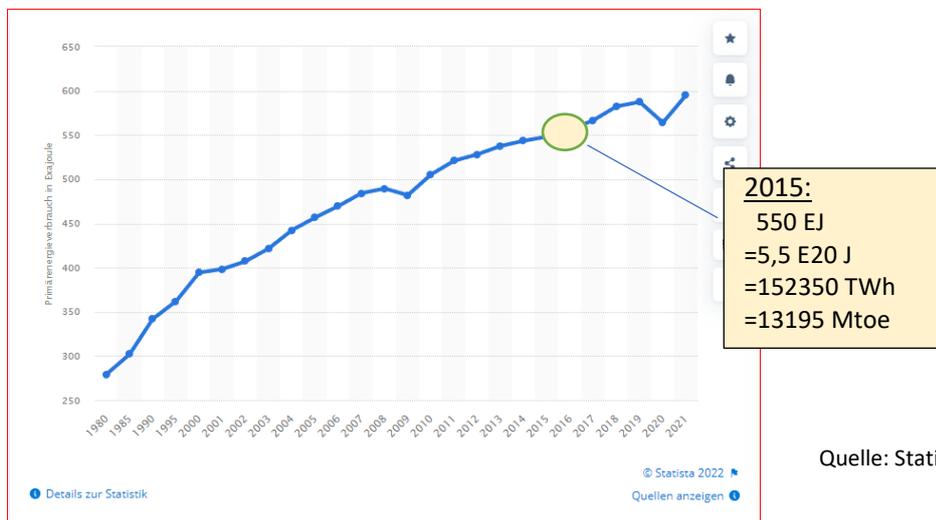
Abb. 2.2 Beobachtete Klimaerwärmung in Erdoberflächennähe

Die gemessenen Erwärmungen der vergangenen 50 Jahre liegen im Schnitt bei etwa 0,02grd p.a. an der Oberfläche bzw. in unmittelbarer Oberflächennähe. Leider ist der hierfür relevante Oberflächenabstand, über den sich dieser Bereich erstreckt, nicht näher definiert. In vorliegendem Fall wird die Erwärmung der Atmosphäre



durch Abwärme für 5, 10 und 20km Höhe berechnet und diesen 0,02 grd p.a. gegenübergestellt. Dabei werden vereinfachend Temperatur- Mittelwerte über die jeweilige Atmosphärenschichtdicke angegeben.

Klimarelevante Abwärme aus dem Verbrauch fossiler Primärenergie



Quelle: Statista 2022;Internet

Abb. 2.3 Weltweiter Primärenergieverbrauch seit 1980 weltweit (in Exajoule)

Abb 2.3 zeigt den zugrunde gelegten Primärenergieverbrauch. Als Referenz für vorliegende Untersuchungen wurde das Jahr 2015 gewählt, da hierfür eine detailliertere Aufgliederung nach Energieträger gefunden werden konnte (Abb.2.4) und die Aufwärmung im besagten Trend von 0,02 grd p.a. liegt, vergl. Abb.2.2.

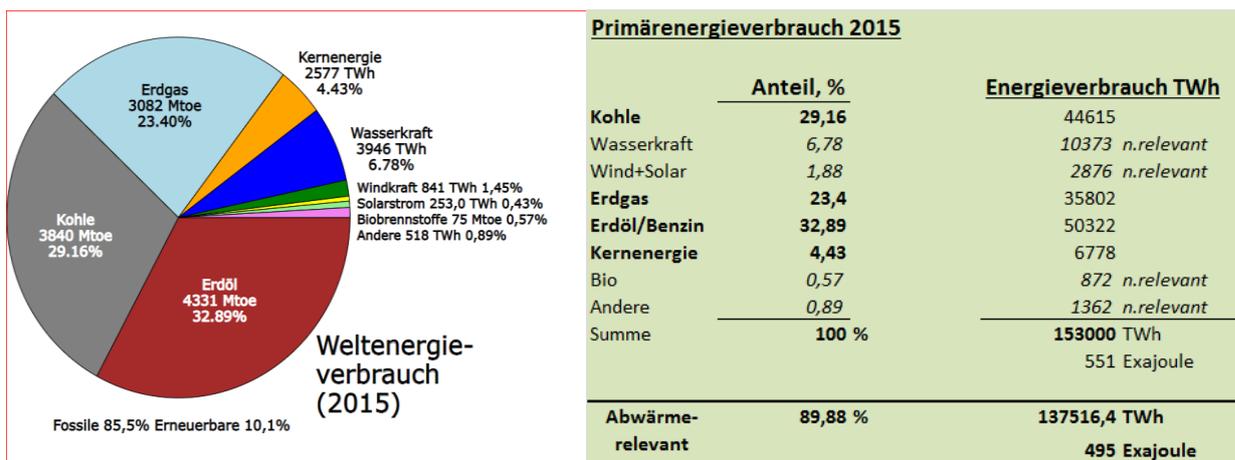


Abb. 2.4 Abwärme relevanter Primärenergieverbrauch weltweit (2015)

In die für die Abwärme relevanten Energieträger wurden neben Kohle, Erdgas, Erdöl auch die Kernenergie (KKW Abwärme) einbezogen. Damit reduziert sich nach Abzug der erneuerbaren Energien (Wasser-, Windkraft, etc) der Abwärme - relevante Primärenergieverbrauch um ca. 10%, von 550 auf ~495 ExaJoule. Kernkraft ist im Hinblick auf Abwärme nicht klimaneutral.



Parametrische Ermittlung relevanter 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 aufgrund zum Großteil nicht verfügbarer Daten und Angaben hierzu, auch was die Weiterverwendung der Abwärmeenergie betrifft).

Ausschlaggebend hierfür ist der Umsetzungswirkungsgrad der Primärenergie, wobei die hier spezifizierte Definition angibt, in welchem Umfang die Primärenergie in Abwärme oder in Arbeit umgewandelt wird. Da diese Verluste nur den Abwärmeanteil berücksichtigen, sind die Wirkungsgrade stets höher als die üblicherweise verwendeten Prozess-Wirkungsgrade basierend auf Gesamtverlusten (Verlust-Arbeit+Verlust-Abwärme).

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

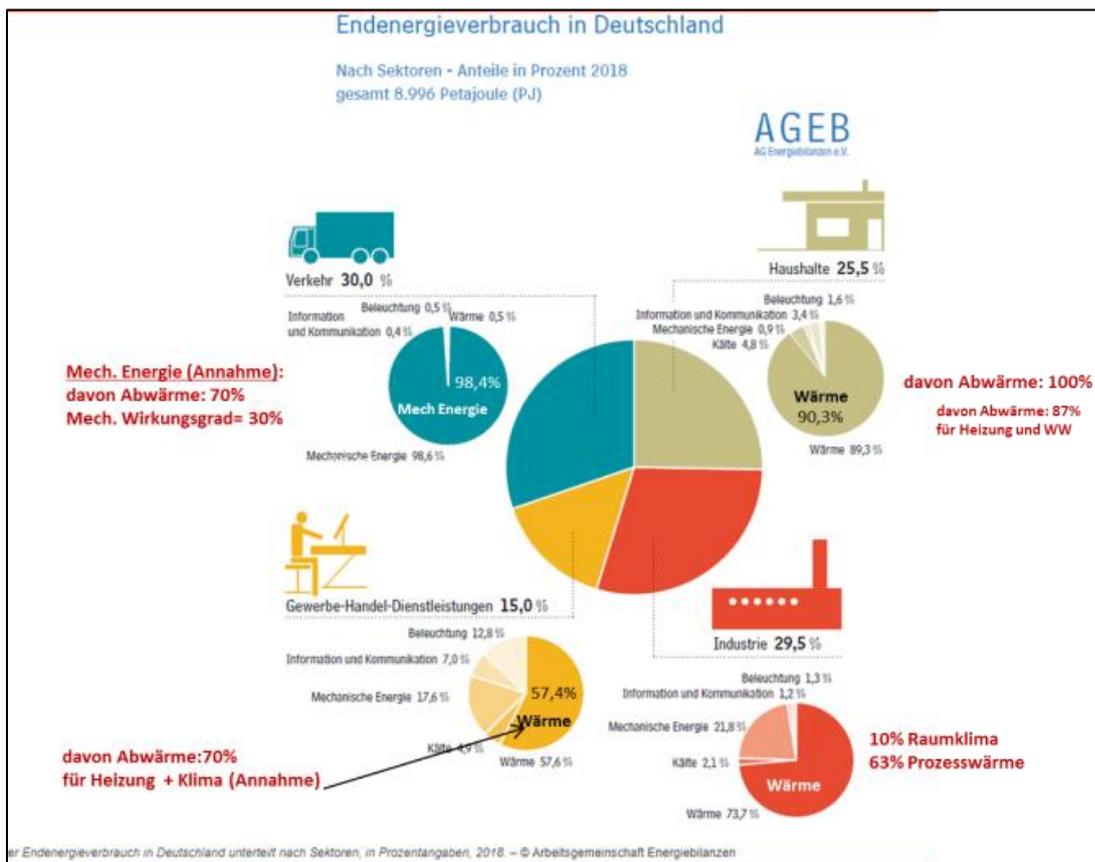


Abb. 2.5 Endenergie: Aufbruch nach Sektoren(Quelle AGEB)

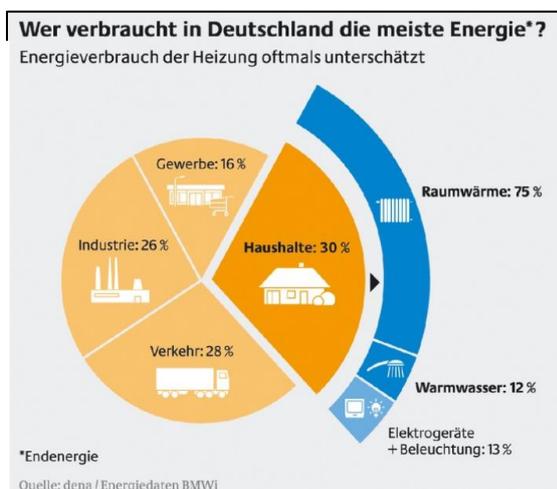


Abb. 2.6 Wärmeerzeugung in Haushalten (Quelle BMWi)

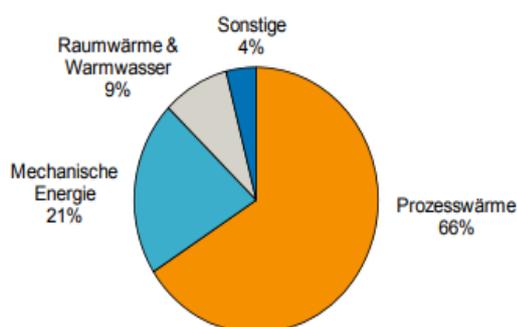




Abb. 2.7 Energiebedarf der deutschen Industrie nach Rhode /10/

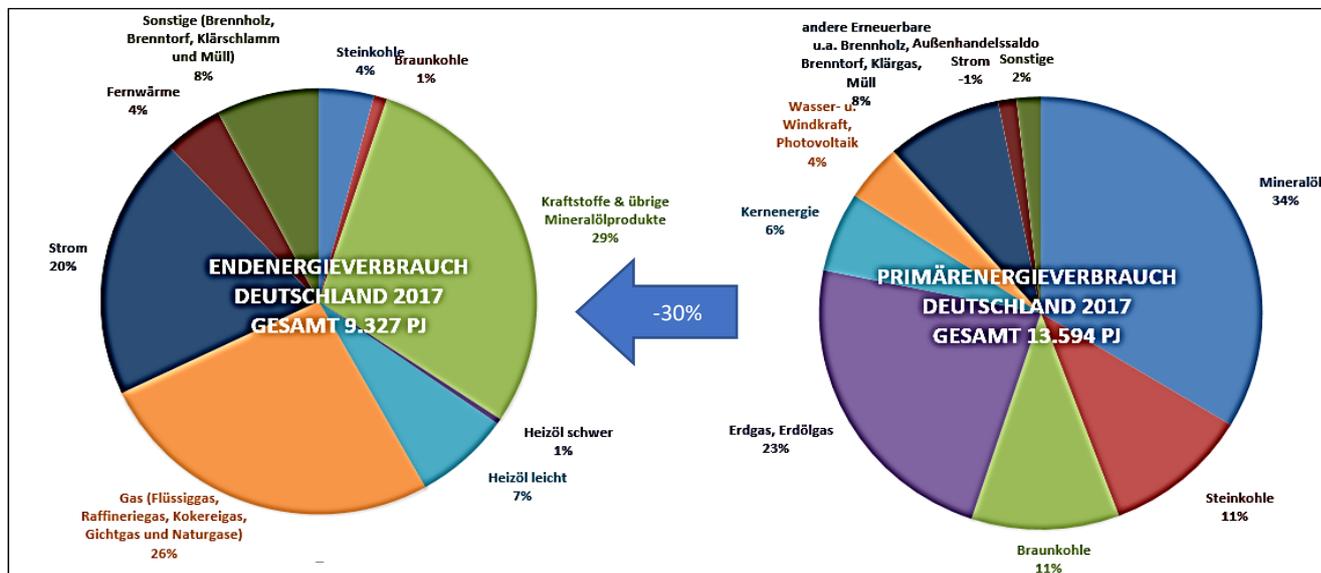


Abb.2.8 Übergang Primärenergie - Endenergie

Da für die Abwärmebilanz der Wirkungsgrad bezogen auf die Primärenergie zählt, werden in Tab. 2.1 in einem 2. Schritt die Endenergieverbräuche von Abb. 2.5 auf Primärenergieverbräuche umgerechnet. Zwischen Primärenergie und Endenergie liegt ein Faktor 0,7 aufgrund der damit verbundenen Energieaufwände für: Umwandlung in Strom, Rohstoffförderung und Aufbereitung, Mineralölherstellung (well to tank), Transport, etc. Da präzisere Angaben nicht verfügbar waren, wurden diese Umsetzungswirkungsgrade an den Wirkungsgraden für Kraftwerksprozesse (35%) und Mineralölförderung (85%, s. Abb. 1.1) angelehnt und vorerst pauschal auf 40% festgelegt. Damit werden 60% des Energieverbrauchs beim Übergang von Primär- zu Endenergie als frei werdende Abwärme in Ansatz gebracht.

In Abb. 2.5 und Tab. 2.1 sind für die Sektoren Verkehr, Haushalte, Industrie, Handel und Gewerbe die jeweiligen Energieaufbrüche gezeigt. Die mit Wärmeerzeugung und Abwärme verbundenen Anteile sind jeweils ausgewiesen. Bei den Annahmen für einige Abwärme - Anteile wurden gängige Erfahrungswerte verwendet.

Die höchsten Umsetzungswirkungsgrade bezogen auf den Primärenergieverbrauch ergeben sich aufgrund höchster Wirtschaftlichkeitsanforderungen für die Industrie (77%); die geringsten 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 Abwärmeeinbruch beim Übergang von Primär- zu



Endenergie rel hoch angesetzt. Dennoch zeigt diese Abschätzung, dass in der Größenordnung von 50% und mehr die verbrauchte Primärenergie in die Aufheizung unserer Atmosphäre übergeht – ein wohl nicht zu verdrängender Effekt.

Endenergie Verbrauch 2018 Deutschland:							Primärenergie Verbrauch 2018			
Endenergie Verbrauch 2018 Deutschland: 8996 Petajoule, s. Abb 2.5	Anteil am Endenergieverbrauch s. Abb 2.5	Endenergieverbrauch Petajoule	davon Anteil Wärme/Thermisch Prozesse	davon Anteil Abwärme	resultierende Abwärme am Gesamt-Endenergieverbrauch	Abwärme, absolut Petajoule	Abwärme Wirkungsgrad bezogen auf Endenergie	Primärenergie Verbrauch Petajoule	Abwärme inkl Primärenergieverluste Petajoule	Abwärme Wirkungsgrad bezogen auf Primärenergie
Verkehr	30,0%	2699	98,6%	70,0%	69,0%	1863	31%	3855	2557	34%
Gewerbe+...	15,0%	1349	57,6%	90,0%	51,8%	700	48%	1928	1046	46%
Industrie	29,5%	2654	73,7%	10,0%	7,4%	196	93%	3791	878	77%
Haushalte	25,5%	2294	90,3%	87,0%	78,6%	1802	21,4%	3277	2392	27,0%
Summe Abwärme, PJ						4560		12851	6873	46,5%
Ges Endenergiebedarf, PJ						8996				
Mittlerer Wirkungsgrad bezügl. Endenergie- Verbrauch										49%
Energieverbrauch für die Umwandlung Primärenergie->Endenergie							Abwärme absolut Petajoule			
Anteil am Primärenergieverbrauch	Energieverbrauch Petajoule	davon Anteil Therm+Mechnisch Prozesse	davon in Abwärme (Annahme)	resultierende Abwärme am Energieverbrauch			2313			
Primärenergieverbrauch gesamt = 12851 Petajoule	30%	3855,0	100%	60%	70%					
Summe Abwärme						6873				
Ges Primärenergieverbrauch, PJ						12851				
Mittlerer Wirkungsgrad bezügl. Primärenergie- Verbrauch										46,5%

Tab. 2.1 Umsetzungswirkungsgrade der einzelnen Energiesektoren, Deutschland 2018; abgeleitet aus Abb 2.5 bis 2.8

In Abb 2.9 sind die Ergebnisse graphisch zusammengefasst. Die insgesamt relativ hohen Wirkungsgrade resultieren daraus, dass nur der Abwärmeanteil berücksichtigt wird. Die Tatsache, dass bei Haushalt und Verkehr beim Übergang von Endenergie auf Primärenergie der Wirkungsgrad steigt (z.Bsp Haushalte, Verkehr) liegt daran, dass der Abwärmeanteil weniger stark ansteigt, als die Primärenergie gegenüber der Endenergie.

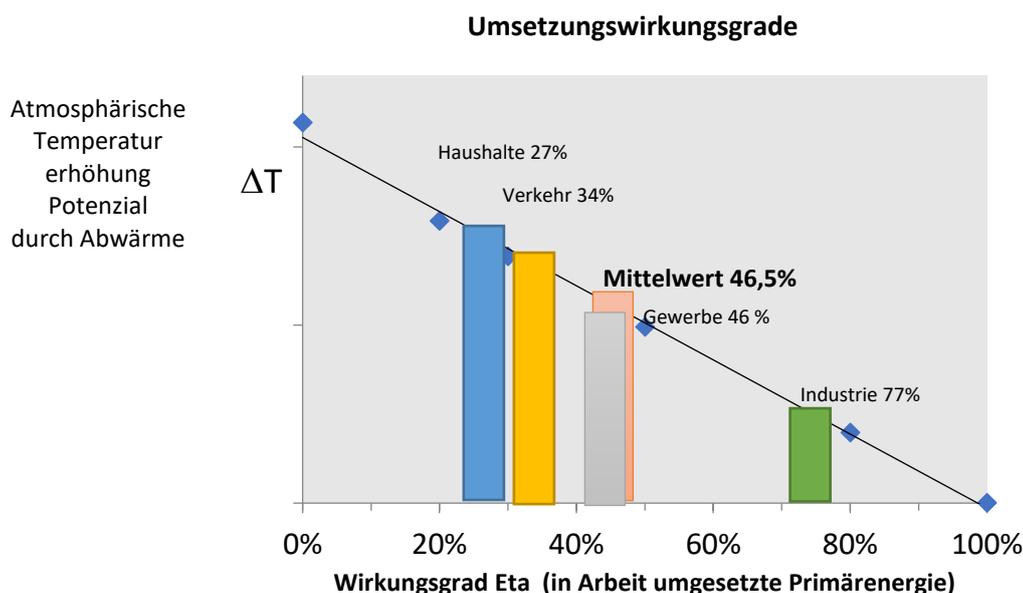


Abb 2.9 Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade nach Energiesektoren



Quantitative Klima-Erwärmungspotenziale anhand der globalen Primärenergieverbräuche 2015

Die auf Basis der weltweiten Primärenergieverbräuche in 2015 (vgl. Abb. 2.4) mit den in Abb. 2.9 dargestellten Umsetzungswirkungsgraden errechneten atmosphärischen Temperaturerhöhungspotenziale sind Abb. 2.10 und Tab 2.2 zusammengefasst. Die Daten beschreiben die durch die Abwärme erzielbare Temperaturerhöhung der Atmosphäre bei rein adiabater Betrachtung. Die Darstellung erfolgt wie in Abb 2.9 parametrisch über dem Energieumsetzungswirkungsgrad Eta. Zusätzlich sind die Berechnungen für unterschiedliche Atmosphärendicken aufgeführt, über die sich die Abwärme ausbreitet (5,10,20km). Vergleichend hierzu ist auch die meteorologisch beobachtete Klimaerwärmung von 0,02 grd in Erdoberflächennähe aufgeführt.

Potenzielle Temperaturerwärmung der Atmosphäre durch Abwärme, global

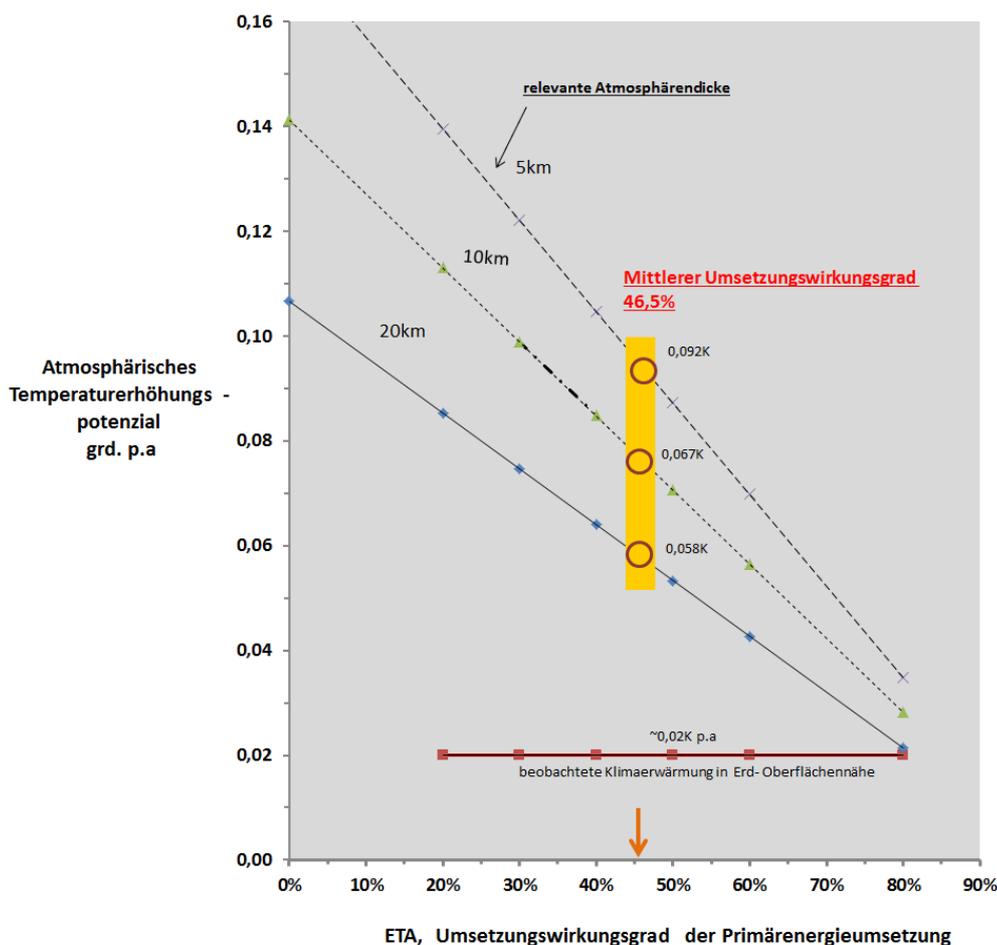


Abb. 2.10 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale für variierende Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade und unterschiedliche Wärmeausbreitungshöhen (Mittelwerte über die jeweilige Atmosphärendicke)



Die errechneten Potenziale liegen deutlich über den gemessenen jährlichen Oberflächentemperaturerhöhungen der Erde. Für den ermittelten Umsetzungswirkungsgrad von ca 46,5% fallen vom gesamten Primärenergieverbrauch (4,94E+20J) ca. 54% d.h. ca (2,7E+20J) an Abwärme an. Hierfür liegt das Temperaturerhöhungspotenzial zwischen 0,058 und 0,092 grd 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 und 10km mit 0,067 bis 0,092 grd p.a. angemessener als globaler Mittelwert.

Mittlere Aufwärmung der Atmosphäre für unterschiedliche Atmosphärendicken							
(Parametrische Betrachtung)							
1. Primärenergieverbrauch 2015 gesamt		153000 TWh					
		5,50E+20 J					
1.a Primärenergieverbrauch ohne regenerativer Anteile		4,94E+20 J					
2. Umsetzungswirkungsgrade (nicht in Wärme umgesetzt)				Umsetzungswirkungsgrade			
<i>In Wärme umgesetzte Primärenergie</i>				0%	20%	30%	40%
				100%	80%	70%	60%
				50%	40%	20%	
3. Resultierende Abwärme = Umweltbelastung		J		4,94E+20	3,95E+20	3,46E+20	2,97E+20
				2,47E+20	1,98E+20	9,89E+19	
4. Mittlere Aufwärmungspotenziale der Atmosphäre für versch. Atmosphärendicken							
a Atmosphärendicke		20 km		Temperaturerhöhungspotenziale, K			
Masse der Atmosphäre (90% der Gesamtmasse)		4,64E+18 kg					
Atmosphäre gesamt		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 Atmosphärendicke		10 km					
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	
c Atmosphärendicke		5 km					
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	
Beobachtete Globale Erwärmung, siehe Graphik unten		K		0,02	0,02	0,02	0,02

Tab. 2.2 Abwärmepotenziale für unterschiedliche Primärenergie Umsetzungswirkungsgrade und unterschiedliche Wärmeausbreitungshöhen

Ergänzend hierzu sind in Abb. 2.11 und 2.12 für den ermittelten Nutzungsgrad die Temperaturerhöhungspotenziale als Funktion der verbrauchten Primärenergie bzw. erzeugten Abwärme dargestellt.

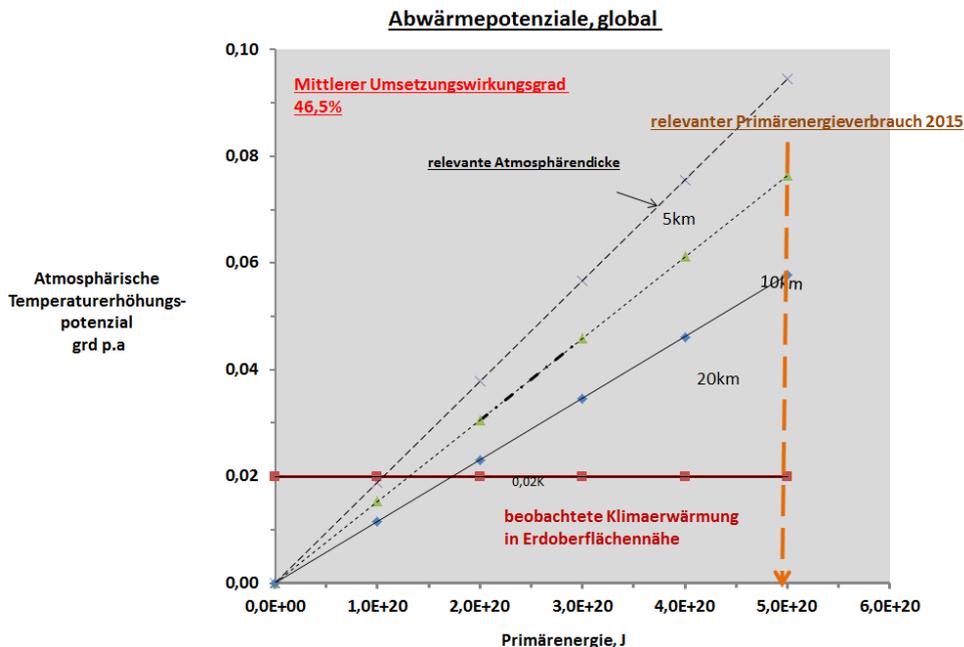


Abb. 2.11 Potenzielle globale atmosphärische Klimaerwärmung als Funktion von Primärenergieverbräuchen, bei eine Umsetzungswirkungsgrad von 46,5%

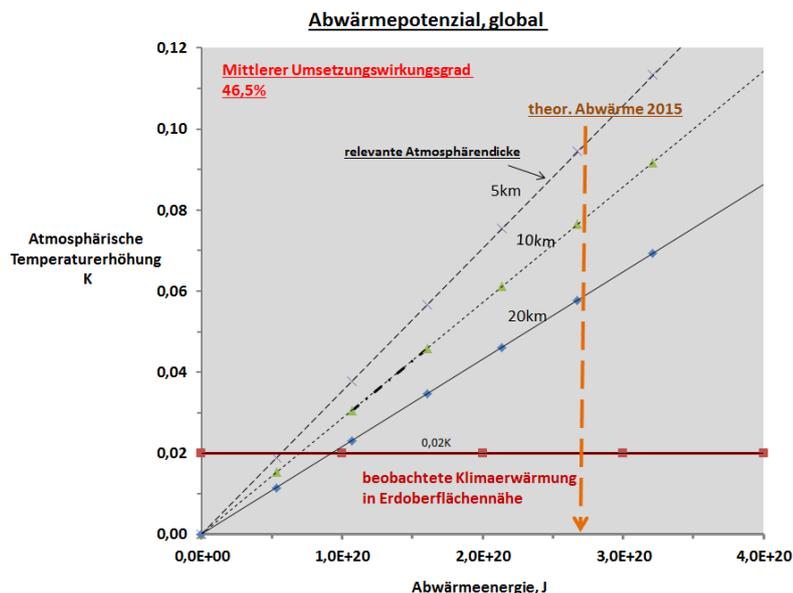


Abb. 2.12 Potenzielle globale atmosphärische Klimaerwärmung als Funktion der Abwärmemengen

Im Vergleich zu den meteorologisch beobachteten Klimaerwärmungen (0,02 grd p.a.) dürften die Energieverbräuche und Abwärmemengen nicht größer als 20-30% der hier ermittelten Abwärmewerte sein.

Eine weitere Diskussion hierzu erfolgt in Abschnitt 3.



Abwärmeeinflüsse im Bereich der nördlichen Erd- Halbkugel

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 30. und 60. Breitengrad ausgewählt

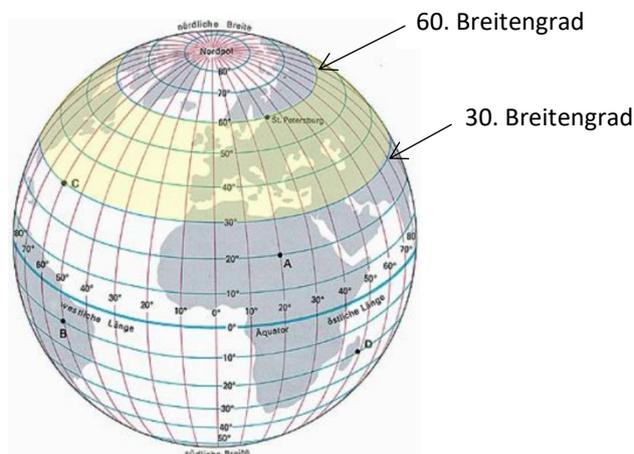


Abb 2.13 Bereich der Nördlichen Halbkugel zwischen 30. Und 60. Breitengrad

Die in diesem Bereich anfallenden Primärenergieverbräuche liegen zwischen 50- und 60 Prozent der Welt- Gesamtenergieverbräuche. Dabei wurden China nur zur Hälfte und Indien überhaupt nicht berücksichtigt.

Primärenergieverbrauch in Terawattstunden (TWh) 1970–2021:^[4]

Rang (2021)	Land	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2020	2021	Anteil in %
1.	Volksrepublik China	2.362	4.828	7.938	11.800	29.054	35.283	40.995	43.791	26,5
2.	Vereinigte Staaten	18.206	20.752	22.607	26.545	25.952	25.747	24.593	25.825	15,6
3.	Indien	764	1.219	2.301	3.729	6.269	8.030	8.942	9.841	6,0
4.	Russland	...	...	...	7.214	7.815	7.880	8.022	8.694	5,3
5.	Japan	3.271	4.264	5.219	6.242	5.908	5.297	4.759	4.928	3,0
6.	Kanada	1.869	2.712	3.009	3.647	3.755	4.041	3.840	3.871	2,3
7.	Deutschland	3.611	4.239	4.193	3.988	3.847	3.778	3.432	3.512	2,1
8.	Südkorea	167	454	1.066	2.246	3.045	3.333	3.330	3.493	2,1

Abb2.14 Die weltweit größten Primärenergieverbraucher (Wikipedia). Weitere Daten im Anhang



Die Emission findet auf einer Erdoberfläche statt, die nur 20% der Gesamtoberfläche darstellt. Damit entsteht ein deutliches Übergewicht an Wärmefall in diesen Breitenzonen. 50% Abwärme-Energie auf 20% Erdoberfläche verglichen mit 100% Abwärme auf 100% Erdoberfläche bei ganzheitlicher Betrachtung. In Abb.2.15 und Abb. 2.16 ist der Effekt in Temperaturerhöhungspotenzialen zusammengestellt.

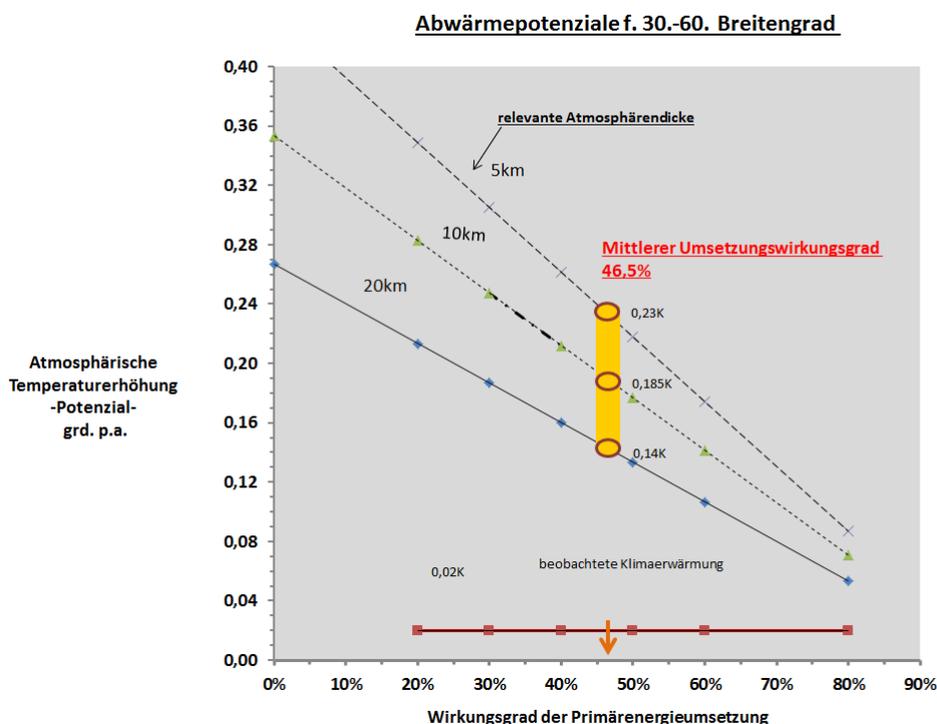


Abb. 2.15 Abwärme- und atm. Temperaturerhöhungspotenziale für den Bereich 30.-60. Breitengrad (Mittelwerte über die jeweilige Atmosphärendicke)

In Tab 2.3 sind die entsprechenden Analyse Ergebnisse zusammengefasst. Die Untersuchungen zeigen, daß der Klimaeffekt auf der Nordhalbkugel deutlich stärker ist. Gegenüber den in Abb 2.10-Abb 2.12 dargestellten globalen Mittelwerten steigen bei wiederum adiabater Betrachtung die jährlichen Temperaturerhöhungspotenziale für den ermittelten Umsetzungswirkungsgrad von 46,5% um den Faktor 2,5 von 0,058-0,092 grd auf 0,14 – 0,23 grd p.a. an. Gegenüber dem global beobachteten Mittelwert von 0,02 grd p.a. sogar bis um den Faktor 7-11. je nach zuzuordnender Wärmeausbreitungshöhe (5, 10, 20km).



Mittlere Aufwärmung der Atmosphäre Zwischen 30. und 60. Breitengrad für unterschiedliche Atmosphärendicken							
(Parametrische Betrachtung)							
1. Primärenergieverbrauch 2015 gesamt	7650 TWh 2,75E+20 J						
1.a Primärenergieverbrauch ohne regenerativer Anteile	2,47E+20 J						
2. Umsetzungswirkungsgrade (nicht in Wärme umgesetzt) <i>In Wärme umgesetzte Primärenergie</i>		Umsetzungswirkungsgrade					
		0%	20%	30%	40%	50%	60%
		100%	80%	70%	60%	50%	40%
3. Resultierende Abwärme = Umweltbelastung	J	2,47E+20	1,98E+20	1,73E+20	1,48E+20	1,24E+20	9,89E+19
4. Mittlere Aufwärmungspotenziale der Atmosphäre für versch. Atmosphärendicken							
a Atmosphärendicke	20 km	Temperaturerhöhungspotenziale, K					
Masse der Atmosphäre (20% der Gesamtmasse)	9,27E+17 kg						
Atmosphäre gesamt	5,15E+18 kg						
Aufwärmung durch Abwärme ($\Delta T = Q/m \cdot cp$)	K	0,267	0,213	0,187	0,160	0,133	0,107
b Atmosphärendicke	10 km						
Masse der Atmosphäre	7,0E+17 kg						
Aufwärmung durch Abwärme ($\Delta T = Q/m \cdot cp$)	K	0,353	0,283	0,247	0,212	0,177	0,141
c Atmosphärendicke	5 km						
Masse der Atmosphäre	5,67E+17 kg						
Aufwärmung durch Abwärme ($\Delta T = Q/m \cdot cp$)	K	0,436	0,349	0,305	0,262	0,218	0,175
Beobachtete Globale Erwärmung, :	K	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tab. 2.3 Atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale im Bereich des 30.-60. Breitengrades

In Tab 2.4 ist das Ergebnis zusammengefasst inkl. der zugehörigen pro m² Erdoberfläche pro Jahr anfallenden Abwärmemengen. Die mit eingetragene Abwärmemenge für die gemessene Temperaturerhöhung (0,02 grad) wurde nach Abb 2.12 abgeschätzt, wobei im Widerspruch zu den Aussagen der Klimaberichte die strahlungsbezogene Erwärmung ebenfalls auf die 5, 10, 20 km Atmosphärenschichtdicken übertragen wurde – Eine eher zu starke Einschätzung der beobachteten atmosphärischen Klimaerwärmung.

	Wärmemenge/m ² * (p.a.)	atm. Temperaturerhöhung (Potenzial) (p.a. Ausbreitung über H=20-5km)
Abwärme global	0,0049E+8 J/m ² (0,016W/m ²)	0,058 - 0,092 grad
Abwärme Nordhalbkugel (30.-60.Breitengrad)	0,013 E+8 J/m ² (0,041 W/m ²)	0,14 - 0,23 grad
Gemessene Klimaerwärmung (äquivalente Wärmemenge)	0,001-0,002 E+8 J/m ² (0,003- 0,006 W/m ²)	0,02 - 0,034 grad

Tab 2.4 Zusammenfassung der Atmosphärische Klimaerwärmungsergebnisse (Erdoberfläche ca. 510 Mio km² gesamt; ca.100 Mio km² für 30.-60. Breitengrad) .

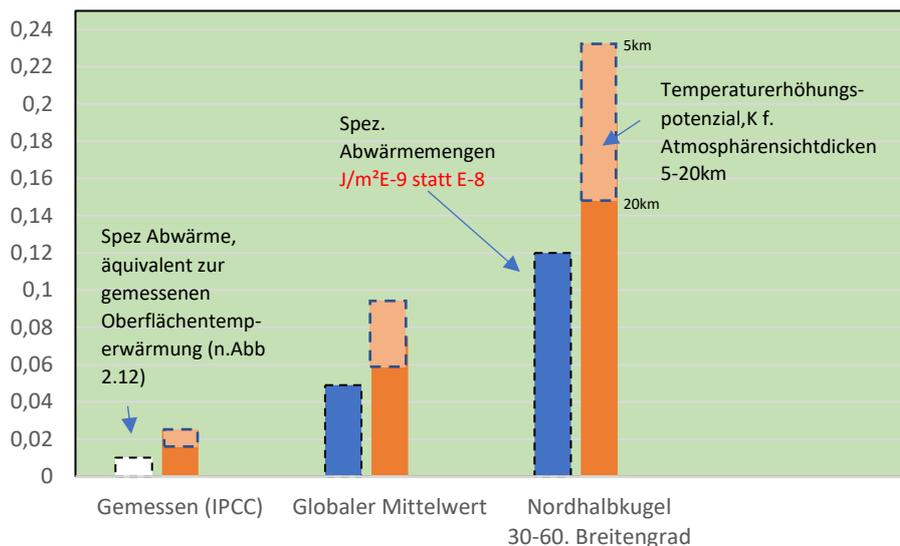


Abb. 2.16: Spez. Abwärme und Temperaturerhöhungspotentiale nach Tab 2.2; 2.3; Bild 2.10, 2.15 (p.a.).

Tab 2.4 enthält auch die zugehörigen Wärmeeintrag- Leistungen in W/m^2 p.a. Wie in Kap. 3 gezeigt wird, entsprechen die $0,006W/m^2$ auch dem von der Klimaforschung deklarierten atmosphärischen Wärmeeintrag aufgrund des Strahlungsaustausches zwischen Weltall und Erde. In Abb 2.17 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt

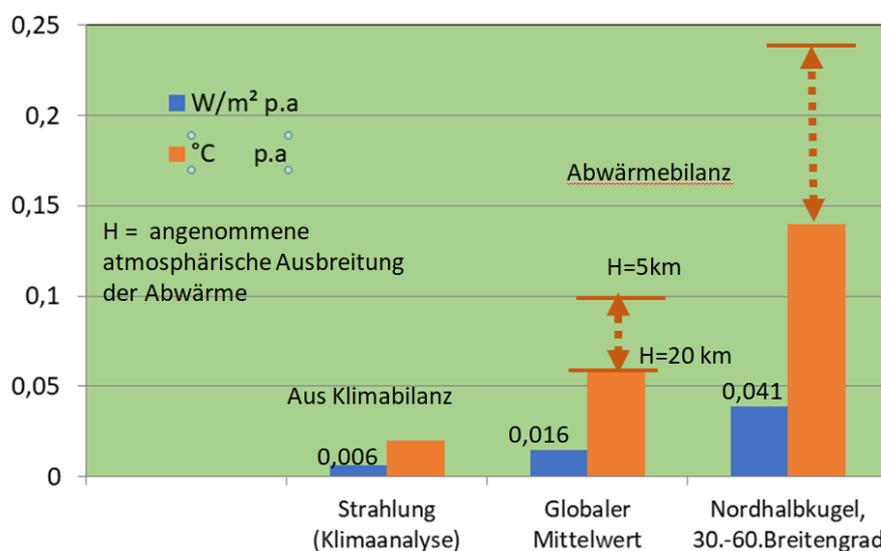


Abb 2.17: Atm Aufheizungspotenziale anhand der mittleren Wärmeleistungen (W/m^2)

Es ist trotz aller Vereinfachungen und Grobannahmen davon auszugehen, dass die errechneten Größenordnungen nicht unrealistisch sind. Im Gegenteil, da die Umsetzungswirkungsgrade auf der Basis der Situation in Deutschland festgelegt



wurde, ist anzunehmen, dass der tatsächliche weltweite Abwärmeanteil aufgrund des geringeren Industrieanteils mit hohem Umsetzungswirkungsgrad eher noch ausgeprägter ist. Außerdem sind sekundäre Abwärmeproduktionen bei der Umsetzung der Nutzenergie (z.Bsp. Reibungsverluste) nicht berücksichtigt

Anhand der gewonnenen Ergebnisse ist die atmosphärische Klimaerwärmung durch die Abwärme aus Gewerbe, Industrie, Haushalten und Verkehr nicht zu unterschätzen – insbesondere auf der Nordhalbkugel.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch die mit zunehmender Lufttemperatur verbundene Zunahme des Sättigungsdrucks für die Luftfeuchtigkeit erwähnt. Dadurch steigt die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft um ca 7-8% pro Grad Lufttemperatur an (Claudius Clapeyron bzw $/12/$), bevor eine Abscheidung durch Regen, Nebel, etc. erfolgt, was theoretisch auch zur Austrocknung der Erdoberfläche beitragen könnte. Da aber die Freisetzung von Abwärme aufgrund von Verbrennung, aufgrund von Kühlung in Kraftwerkprozessen, thermischen Prozessen in Chemie- und Metallindustrie etc. mit der Freisetzung von Wasserdampf verbunden ist, ist ein Nettoeffekt mit dem verfügbaren Datenmaterial und adäquatem Aufwand nur schwer zu bestimmen. Dieser Zusatzeffekt wurde hier nicht näher untersucht. Die Bedeutung dieser zusätzlichen Wasserdampfausscheidung in Zusammenhang mit Abwärme wäre ein Spezialthema für die Klimaforschung.



3. Die ermittelten Klimaerwärmungspotenziale durch Abwärme in Relation zu Ergebnissen aus veröffentlichten Klimaberichten

Atmosphärische Klimaerwärmung aus Klimaberichten (IPCC)

Die Bedeutung der Abwärme ist derzeit im Allgemeinverständnis rein spekulativ. Ihr geringe Bedeutsamkeit wurde damit begründet, daß die Abwärmeerzeugung um mehrere Größenordnungen ($\sim 10^{20}$ J p.a) kleiner ist, als der Strahlungsaustausch ($\sim 10^{24}$ J p.a.) mit dem Weltall. Dies ist zwar der Fall, die 10^{24} J p.a Größenordnung gilt aber auch für die Abstrahlung von der Erde weg. Entscheidend für den Abwärme-Beitrag ist der Vergleich mit der Differenz zwischen Ein- und Abstrahlung und diese ist um Größenordnungen geringer. Die konvektive anthropogene Abwärme-Produktion überlagert sich dieser Differenz.

Die in der Öffentlichkeit derzeit vorgestellte Strahlungssituation lt. IPCC wird in Abb. 3.1 dargestellt.

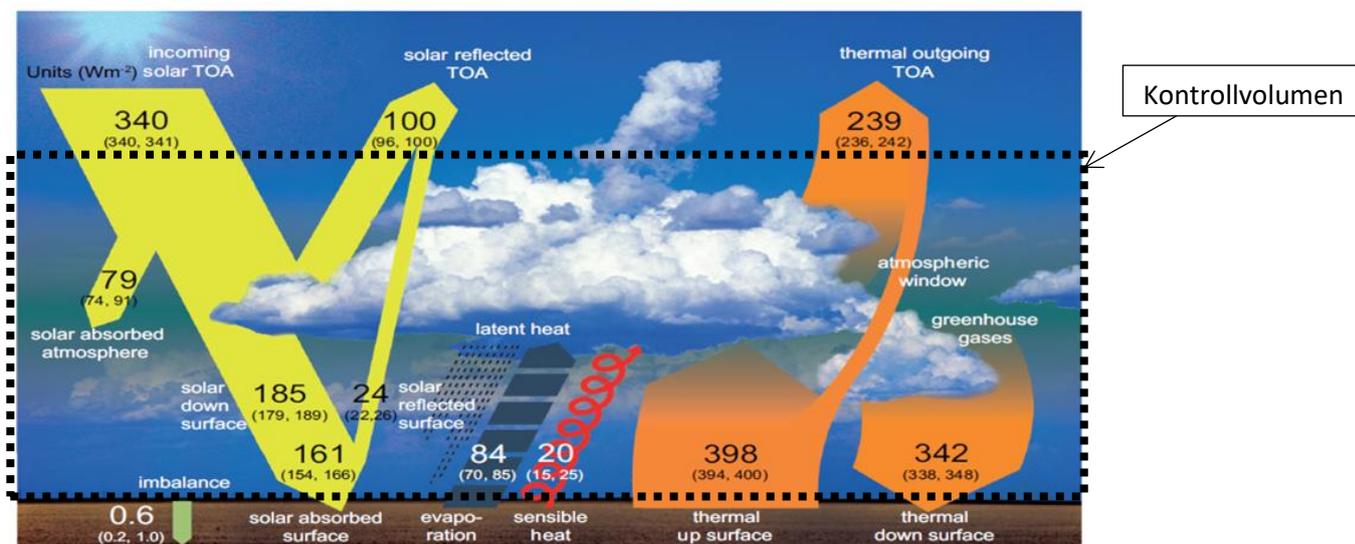


Abb.3.1 Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre lt. IPCC Bericht 2013

Vergleicht man die aus dem dargestellten Kontrollvolumen für die Atmosphäre ein- und abfließenden Energieströme, so ergibt sich folgende Bilanz

Einstrahlung:	+340 W/m ²	(5,46 E24 J p.a.)	100%
Abstrahlung:	-339 W/m ²	(5,45 E24 J p.a)	99,7%
<u>Imbalance:</u>	<u>-0,6 W/m²</u>	<u>(0,0096 E24 J p.a)</u>	<u>0,176%</u>
Summe/Differenz:	+ 0,4 W/m ²	(0,004 E24 J p.a)	0,1176%



Die Differenz von $0,4\text{W}/\text{m}^2$ entspricht $4\text{E}20\text{ J p.a.}$, um die die Erdatmosphäre durch Strahlungseinflüsse aufgeheizt werden müsste. Aus Tab 2.1 und Abb. 2.12 ergäbe sich daraus eine atmosphärische Erwärmung von $0,085$ bis $0,14$ grad und höher, je nach betrachteter Atmosphärenschichtdicke (5-20km). Diese Aufheizung wäre signifikant höher als die aus Abb. 2.2 bekannten $0,02$ grad p.a.

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der um den Faktor 10^4 unterschiedlichen Größenordnungen zwischen Strahlungseinfluss und Atmosphärischer Aufheizung sehr große Ungenauigkeiten in dieser Bilanzierung entstehen. Deshalb ist die Bilanz in der Tendenz zwar richtig, aber quantitativ als nicht präzise genug anzusehen.

Deshalb wird zur weiteren Erklärung der Atmosphärischen Aufheizung aus der Strahlungsbilanz die in Abb. 3.1 dargestellte Imbalance Energie von $0,6\text{ W}/\text{m}^2$, die lt. Bild 3.1 unmittelbar in die Erdoberfläche eindringt, als ursächlich in Ansatz gebracht. 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 /11/ nach dem in Bild 3.2 dargestellten Schema.

Wohin fließt die globale Erwärmung?

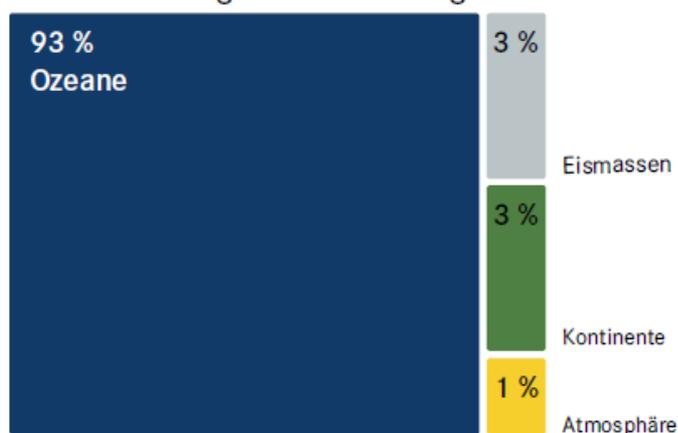


Abb 3.2 Umsetzung des Wärmeintrags durch Strahlung und Klima

Dabei ist auffallend, dass nur 1% des Energieeintrags in atmosphärische Erwärmung umgewandelt wird ($0,006\text{W}/\text{m}^2$). Der Hauptanteil fließt in die Meere.

Die resultierende Bilanz in Abb3.3 liefert eine atmosphärische Aufheizung von $1\text{E}+20\text{ J/a}$. In Verbindung mit Tab2.2 bzw. Abb. 2.12 bestätigt die an der Erdoberfläche beobachtete Klimaerwärmung in der Größenordnung $0,02$ - $0,035$ grad, wobei im Hinblick auf Erdoberflächennähe die $0,035$ grad für die 5km Atmosphärenschichtdicke zutreffender erscheint. Die Zuordnung



Sonneneinstrahlung und daraus abgeleitete bzw. beobachtete atmosphärische Aufheizung wäre damit in erster Näherung nachvollziehbar.

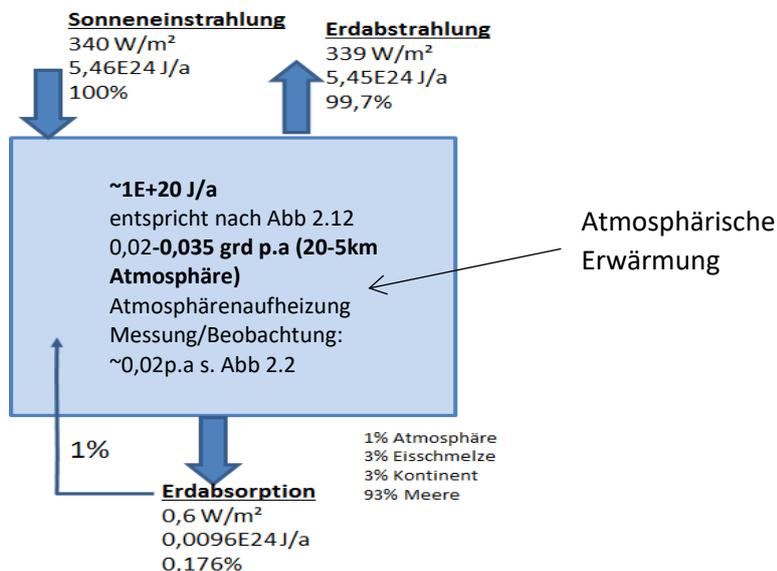


Abb. 3.3: Klimaerwärmung in der erdnahen Atmosphäre aufgrund des Imbalance Strahlungswärmeeintrags von $0,6 \text{ W/m}^2$ in die Erdoberfläche

Zusatzeinfluss aufgrund anthropogener Abwärme

Überlagert man diesem Strahlungseintrag die vom Menschen produzierte Abwärme, so ergibt sich bei adiabater Betrachtung eine Atmosphärenaufheizung von $0,08\text{-}0,126 \text{ grd p.a}$ im globalen Mittel, s. Abb. 3.4.

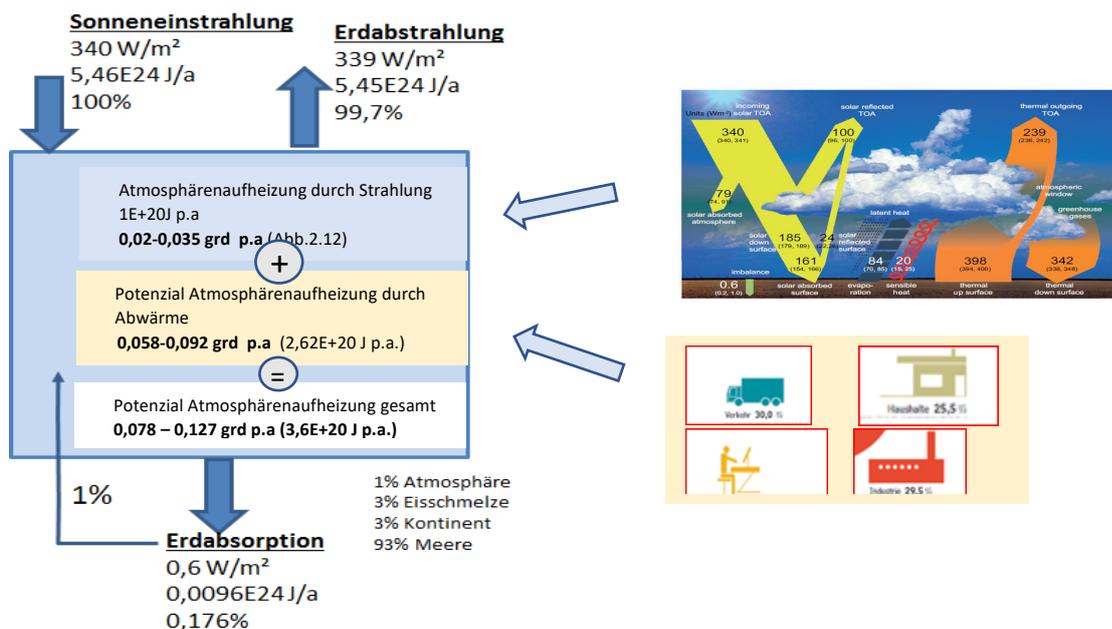


Abb. 3.4 Atmosphärische Klimaerwärmungspotenziale aufgrund von Strahlungseinträgen plus treibhausfördernden anthropogenen Abwärmeproduktionen (globale Betrachtung)

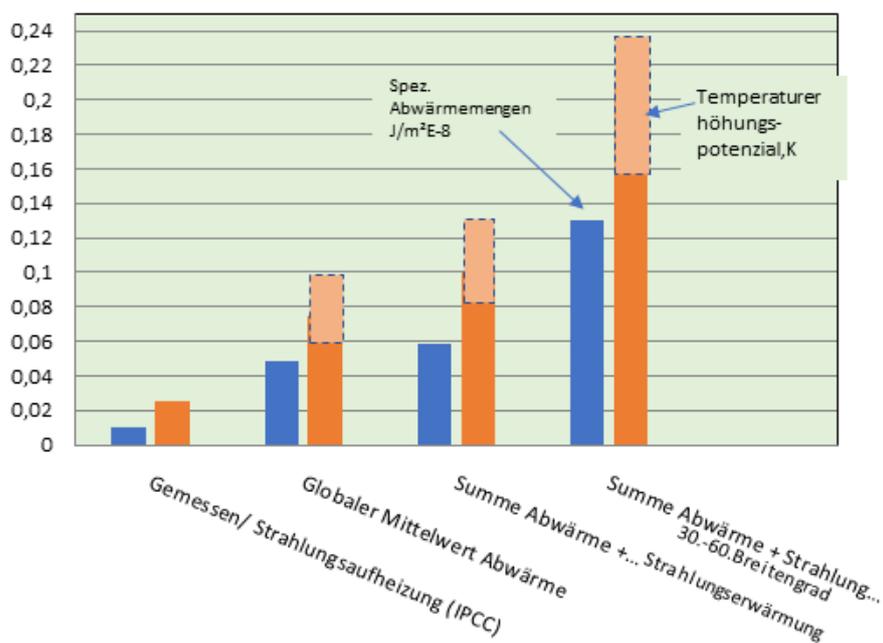


Abb. 3.5 Strahlungseinflüsse und Abwärme

Die offensichtliche Diskrepanz bei den Temperaturen im Vergleich zu den Messungen bzw. Beobachtungen lässt zunächst vermuten, dass ein Hauptteil der Abwärme über Wärmeübertragung an die Erdoberfläche und anschließende langwellige Abstrahlung ins Weltall entweicht.

Ein zweiter Teil wird möglicherweise direkt ins Weltall abgestrahlt, da die Abwärme zum Großteil mit dem Ausstoß von CO₂, CO, Wasserdampf und anderen strahlenden Abgasanteilen versehen ist.

Eine 3. Interpretation wäre, dass die Abwärme über den geodätischen Temperaturgradient der Atmosphäre nach außen transportiert wird und in unmittelbarer Erdoberflächennähe deshalb nicht bzw. kaum spürbar ist. Dies trifft vor allem bei Wärmefreisetzung in größeren Höhen zu, z. Bsp. im Luftverkehr, s. Abb. 3.6. Ein typischer Grenzschichteffekt, der auch für die Erdoberfläche zutreffen mag.

Eine weitere 4. Erklärung ergibt sich aus der Relation der Größenordnung der konvektiven Abwärme zum Strahlungsaustausch Weltall-Erde. Die Abwärme ist um den Faktor 10^4 kleiner als die Strahlungsvorgänge und fallen für die Erwärmung der referenzierten Erdoberfläche nicht messbar ins Gewicht (zumal die Wärmekapazität der Erde um den Faktor 1000+ höher ist als die von Luft). Hinzu kommt, dass der konvektive Wärmeübergang gegenüber Strahlungswärmeaustausch deutlich geringer ist, ebenso wie nach der Mischung mit Umgebungsluft die den



Wärmeübergang treibende Temperaturdifferenz zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche.

Die atmosphärische Aufheizung durch Abwärme ist aber dennoch vorhanden. Sie konzentriert sich nach dieser Vorstellung hauptsächlich auf die (erdnahe) Atmosphäre selbst, mit nur wenig Austausch mit der Erdoberfläche.

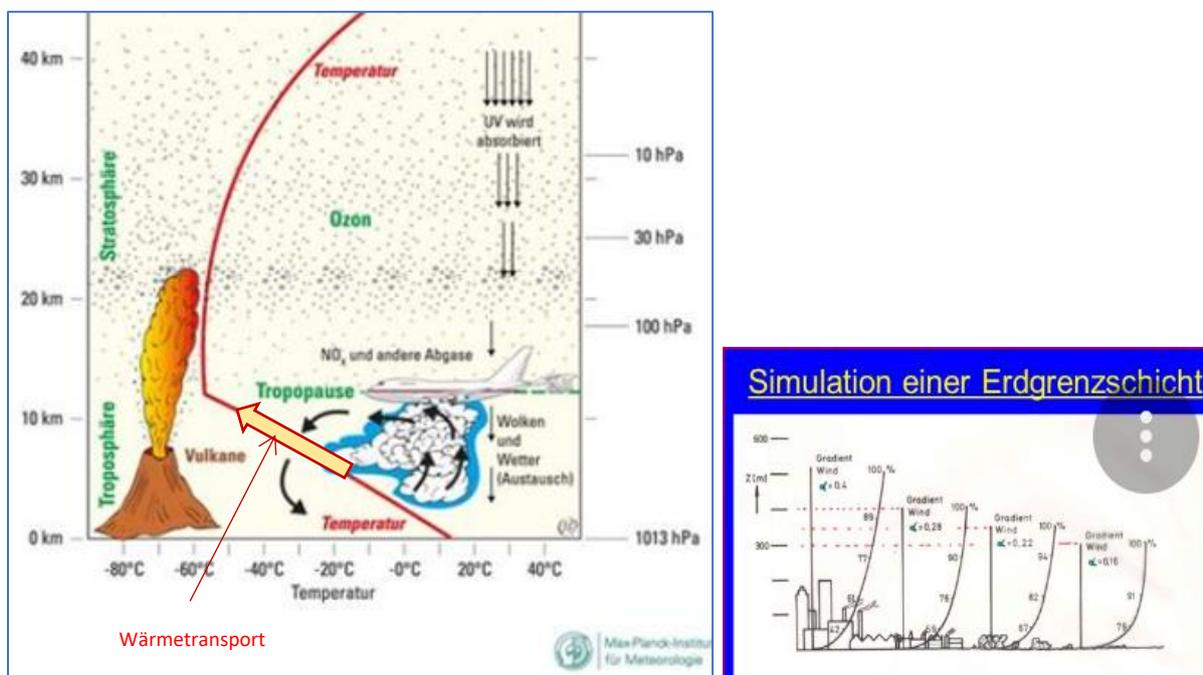


Abb 3.6 Wärmetransport in der Atmosphäre durch Temperaturgradienten

Die Frage ist, wie sehr die doch beträchtlichen atmosphärischen, anthropogenen Abwärmeeinträge letztlich

- das Klima direkt beeinflussen (z.Bsp durch veränderte Wolkenbildung, etc)
- ob und auf welchem Wege diese Abwärme ins Weltall entweicht
- wie lange die Abwärme nach diesen Vorstellungen in der erdnahe Atmosphäre verbleibt und ob auf diesem Weg diese konvektive Abwärme im Zuge ihrer Ausbreitung nicht auch zur Abschmelze von Gletschern und Polen beiträgt. Die Windsysteme der Erde Abb. 3.7, könnten diese Vermutung untermauern. Dies adressiert vor allem die Wärmeabgabe in größeren Höhen, wie z. Bsp. im Luftverkehr.

Diese spekulativen Abwärmeeffekte sind aufgrund der höheren Abwärmemengen für die Nordhalbkugel (30.-60. Breitengrad) noch wesentlich ausgeprägter einzustufen. Eine damit zusammenhängende Beschleunigung von Schmelzvorgängen an Gletschern und Polen ist aus gegenwärtiger Sicht nicht ausschließbar. Vielleicht wäre dies auch eine zusätzliche Erklärung für den schneller als erwartet stattfindenden Klimawandel.



Eine genauere und kompetentere Bewertung sei den Klimaexperten vorbehalten.

Windsysteme auf der Erde

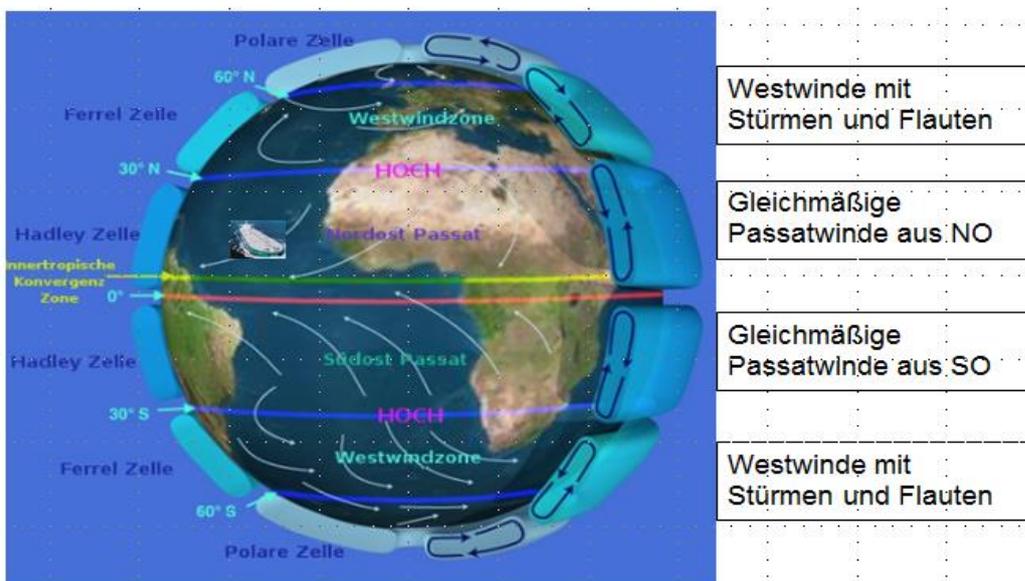


Abb.3.7 Windsysteme der Erde transportieren Abwärme in Richtung Nordpol (Internet)



4. Potenzielle Klimaerwärmungsbeiträge durch die Einführung synthetischer Brennstoffe

Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen zum Einfluss der Abwärme aus Industrie Haushalten, Verkehr und Gewerbe auf das atmosphärische Klima, kann der Zusatzeffekt durch Einführung synthetischer Brennstoffe bewertet werden. Als synthetischer Brennstoff wird das in Abb. 1.1 und 1.3 dargestellte und derzeit für die Luftfahrt hochaktuelle LH2 in Ansatz gebracht.

Wie Kap. 1 dargelegt, wird der Wärmeanfall bei der LH2 Erzeugung auch als repräsentativ für die synthetische Kerosinherstellung über H2 Elektrolyse (Abb.1.1) angenommen. Auf eine Analyse der hoch komplexen und wesentlich energieintensiveren STL Kerosinerzeugung nach Abb 1.4 -1.5 wird mangels Detailkenntnisse an dieser Stelle nicht eingegangen.

Luftfahrt

Die Bereitstellung von synthetischem LH2 anstelle von Kerosin erhöht den Energiebedarf und die Abwärmeproduktion um 200% und mehr (s. Tab 1.1), selbst wenn wie hier angenommen, die Brennstoffherstellung mit ausschließlich regenerativer elektrischer Energie erfolgt.

Für die weltweit prognostizierten Kerosinverbräuche in Abb. 4.1 werden Abschätzungen zur Abwärmeerzeugung bei Verwendung von synthetischem LH2 durchgeführt und den beobachteten Klimaerwärmungen (ca. 0,02 grd p.a.) gegenübergestellt.

Ausgangspunkt ist die Treibstoffsituation in 2025 (Abb. 4.1). Gemäß Prognose werden in 2025 ca. 350 Mrd Liter Kerosin und nur wenig Sustainable Aviation Fuels (SAF) verbraucht.

Sustainable Aviation Fuels sind per Definition synthetische Brennstoffe, die aus nicht fossilen Rohstoffen aber nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden. Wenn Strom als Energieträger angewandt wird, werden auch E-Fuels wie LH2 aus Elektrolyse, Fischer Dropsch und Carbon Capture hinzu gezählt (s. Wikipedia: SAF).

In Tab 4.1 sind für 2025 Energiebedarf und Abwärme Effekte aufgezeigt für den Fall dass der gesamte weltweite Kerosinbedarf durch LH2 ersetzt wird.

In Anhang 2 erfolgt ergänzend hierzu in Analogie zur Abwärmeanalyse von 2015, Kap 2, eine vereinfachte Zusammenstellung für die reine Kerosinsubstitution;



flugzeugbedingte Schuberrhöhungen sind nicht berücksichtigt .

Prognose zum weltweiten Verbrauch von fossilem Kerosin sowie Sustainable Aviation Fuels (nachhaltigen Flugkraftstoffen) in den Jahren 2025 bis 2040 (in Milliarden Liter)

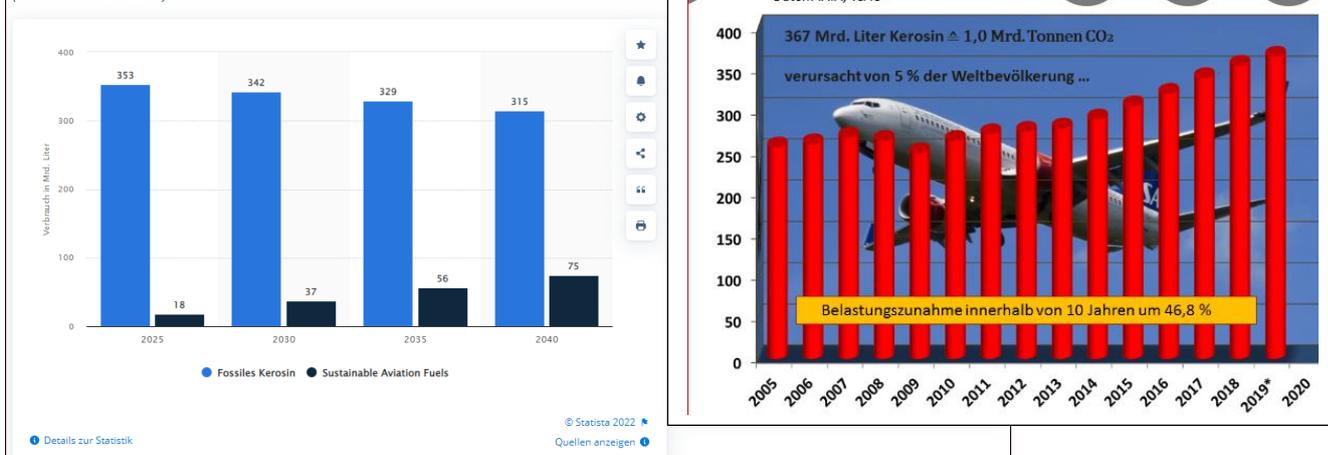


Abb 4.1 Weltweiter Kerosinverbrauch , prognostiziert bis 2040 (Quellen: ICAO, IATA, Statista2022)

Kerosinverbrauch 2025				
Kerosinverbrauch 2025	Gewicht (rho=0,82)	Energiebedarf (42,8MJ/kg)	Schubenergie (Eta=0,4)	Abwärme (Fuel to Thrust)
Liter	kg	J	J	J
3,50E+11	2,86E+11	1,33E+19	4,86E+18	0,814E+19
		+10% Well to tank		
		100%	100%	100%
alles SAF - Synthetische Herstellung (Abb1.1 und Tab 1.1)+20% thrust				
		Energiebedarf (Power Required)	Schubenergie (Power to Thrust)	Abwärme (Power to Heat)
		J	J	J
		3,96 E+19	5,83 E+18	2,53E+19
		296%	120%	317%
SAF Beitrag zur atmosphärischen Klimawärmung				
rel. beobachteter Erwärmung lt Strahlungsanalyse in Erdoberflächennähe (0,02grd) entspr. 1E+20J p.a. Energieeintrag in die Atmosphäre , s. Abb 3.3 und Abb 2.2				
			Zus Abwärme, rel 1E20J	Atmosph. Temp Erhöhungs - Potenzial durch Kerosin/ SAF
		Kerosin(Status)	7,4%	+(0,0015-0,0022)K
		SAF	24%	+(0,004- 0,007)K
		Erhöhung	+17%	
SAF Beitrag zur atmosphärischen Klimaerwärmung				
rel. Erwärmung aus Strahlungsanalyse + Abwärberechnung (0,079-0,126grd); entspr. 3,7E+20J p.a Energiezufuhr in die Atmosphäre, Abb 3.4				
			Zus Abwärme rel 3,7E20J	Atmosph. Temp Erhöhungs - Potenzial durch Kerosin/ SAF
		Kerosin(Status)	2,2%	+(0,0015-0,0022)K
		SAF	7%	+(0,004- 0,007)K
		Erhöhung	+5%	(unverändert)

Tab 4.1: Energiebedarf und Abwärme bei vollständiger Kerosin-Substitution durch SAF (global). Die Erhöhung bedeutet eine zusätzliche Beschleunigung der atmosphärischen Erwärmung.



Wie in Tab 1.1 wird davon ausgegangen, dass wegen des erhöhten LH2 Tankvolumens und des deutlich höheren Tankgewichts der Schubbedarf um ca 20% höher ausfällt.

Analog zu Tabelle 1.1 steigt der Energiebedarf gegenüber Kerosin um den Faktor ~ 3 an, der Abwärmeeintrag um nahezu den Faktor 3,17. Die Abwärme steigt von $0,8$ auf $2,5E+19$ J p.a. an. Im Vergleich zum Gesamtwärmeeintrag von $1E+20$ J p.a. in der Atmosphäre durch Strahlungseintrag (Abb. 3.2) entspricht dies einer relativen Zunahme von ca 17%. Gegenüber der in Abb. 3.3 unter Einbeziehung der hier berechneten anthropogenen Abwärme ($3,7 E+20$ J) wären dies ca 5%. Die zugehörigen Temperaturerhöhungspotenziale liegen bei beiden Betrachtungen bei $0,004-0,007$ K, was eine Größenordnung kleiner ist als die Beobachtungen der Meteorologen ($0,02$ grad).

Eine vollständige Substitution von Kerosin hat energietechnisch lt Tab. 4.1 das Potenzial, eine Beschleunigung der atmosphärischen Klimaerwärmung um 5% - 17% zu bewirken. In welchem Umfang dies letztlich zur Temperaturerhöhung beiträgt, hängt von den überlagerten Ausbreitungs- und Abstrahlungsvorgängen zwischen Abgas, Atmosphäre, Erdoberfläche und Weltall ab.

Sollte aber lt Abb. 4.1 die Einführung von SAF bis 2040 nur zu ca 20% erfolgen, wird der spürbare Einfluss zunächst vernachlässigbar sein.

Die Herausforderung synthetischer Brennstoffherstellung für die Luftfahrt wird damit zunächst in der Bereitstellung entsprechend hoher regenerativer el. Energien zur Herstellung sein liegen.

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 werden (plus noch einmal 35 % durch SAF als Bio-Fuel; insgesamt also durch 70 % SAF). Die Auswirkungen auf die anthropogene Aufheizung der Atmosphäre sind dann entsprechend kleiner als bei 100 % Ersatz von Kerosin.

Allgemeiner Verkehr

Addiert man den Straßenverkehr noch hinzu, dann steigt unter Annahme gleicher Umsetzungswirkungsgrade wie beim Triebwerk der Energie- und Abwärmeeintrag nochmals um den Faktor 6,5 ($39\%/6\%$) an, s. Abb 4.2. Der Abwärmeeffekt auf das Klima durch die Herstellung synthetischer Brennstoffe wird dann bei vollständiger



Substitution in der gleichen Größenordnung sein, wie derzeit beobachtet (0,02grad p.a.). Die atmosphärische Klimaerwärmung würde dadurch doppelt so stark beschleunigt werden, wie die derzeit bekannt ist.

Im Falle der hier betrachteten synthetischen Wasserstoffzuführung für den Straßenverkehr ist zu berücksichtigen, dass bei Kraftfahrzeugen die Speicherung von Wasserstoff vorwiegend in Hochdrucktanks mit 400-700 bar erfolgt. Wegen der damit verbundenen hohen Verdichtungsarbeit des Wasserstoffs mit anschließender Abkühlung auf Umgebungstemperatur ist ebenfalls mit sehr hohen thermischen Umweltbelastungen zu rechnen, ähnlich wie bei der Wasserstoffverflüssigung für die Luftfahrt. In vorliegender Abschätzung wurden vereinfachend beide Verfahren zur Wasserstoffspeicherung bezüglich Energieaufwand und Abwärme vergleichbar angenommen.

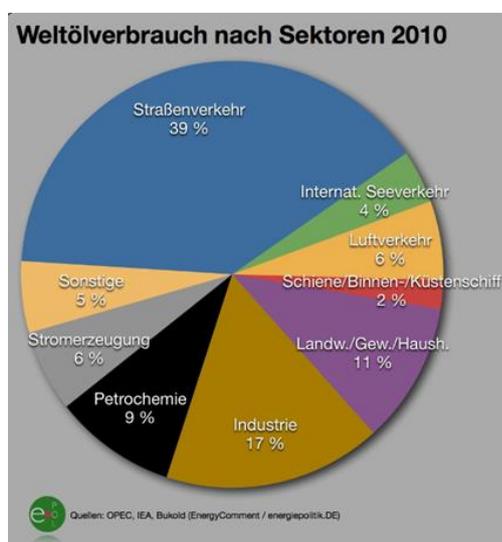


Abb 4.2 Luftfahrt im Vergleich zum Straßenverkehr anhand der Erdölverbräuche



5. Zusammenfassung

Zur Bewertung des Einflusses synthetischer Brennstoffe musste als Referenz zunächst die globale Abwärmeproduktion ermittelt werden.

Die hier errechneten globalen Abwärmeeinflüsse stellen einen beträchtlichen Zusatzbeitrag zur atmosphärischen Klimaerwärmung dar, allein aufgrund der hohen Wärmemengen, die konvektiv in die Atmosphäre eingeführt werden.

Bisher wurden diese Aspekte in der Klimabeschreibung nicht wiedergeben. Die gegenwärtige Bewertung der Klimaerwärmung basiert nach vorliegender Erfahrung ausschließlich auf den Strahlungsaustausch mit dem Weltall, der Strahlungsrückkopplung durch Wettererscheinungen (Wolken), auf Luftverunreinigungen durch CO₂, CH₄,..... und sie konzentriert sich hauptsächlich auf den Bereich Nahe der Erdoberfläche.

Die hier aus den Primärenergieverbräuchen errechneten Abwärmemengen sind um den um den Faktor 2-3 höher als das, was der Strahlungsaustausch an atmosphärischer Klimaerwärmung nahe der Erdoberfläche vermuten lässt. Statt der beobachteten 0,02grd p.a. wurden Potenziale für 0,06 -0,09 grd Erwärmung ermittelt. Besonders stark sind die Effekte auf der Nordhalbkugel der Erde, wo die größten Umweltbelastungen und Energieverbräuche stattfinden. Hier steigen die Abwärmepotenziale auf bis zu 0,13grd p.a.

Diese Abwärme- bezogene konvektive Klimaerwärmung erscheint bislang weitgehend unbeachtet. Die beobachtete Klimaerwärmung ließ sich anhand der bisherigen Klimamodelle ohne Einbeziehung von anthropogener Abwärme anscheinend ausreichend begründen, zumal auch nur der Bereich in unmittelbarer Erdoberflächennähe betrachtet wurde.

Zu klären ist, wie sehr die beträchtlichen anthropogenen Abwärmebeträge

- das atmosphärische Klima über der gesamten Atmosphäre direkt beeinflussen (Wolkenbildung, etc)
- ob und auf welchem Wege diese Abwärme ins Weltall entweicht
- wie lange die Abwärme in der erdnahen Atmosphäre verbleibt, und ob auf diesem Weg diese konvektive Abwärme nicht direkt auch zur Abschmelze von Gletschern und Polen beiträgt. Die Windsysteme der Erde könnten diese Vermutung untermauern.
- In welchem Umfang die resultierende höhere Feuchtigkeitsaufnahmekapazität der Luft auch zur Klimaentwicklung beiträgt



- 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. Vor allem sollte die gesamte Atmosphäre und nicht nur der erdoberflächennahe Bereich betrachtet werden.

Auch bezüglich Luftfahrt und Substitution herkömmlicher fossiler Brennstoffe durch synthetische Brennstoffe (SAF) erscheinen die hier errechneten Abwärmeeinflüsse nicht vernachlässigbar zu sein. Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch SAF hat die zusätzliche Abwärmefreisetzung bei der Brennstoffherstellung das Potenzial, die atmosphärische Klimaerwärmung um 5-17% zu beschleunigen, je nach Betrachtungsweise.

Bezieht man den Straßenverkehr mit ein, dann kann bei vollständiger Substitution durch SAF die atmosphärische Klimaerwärmung auf das Doppelte und mehr beschleunigt werden. Das tatsächliche Ausmaß dieser Klimaeinflüsse hängt natürlich von der Geschwindigkeit und dem Umfang ab, mit der die synthetischen Brennstoffe eingeführt werden.

Fazit: Die Abwärmethematik eröffnet nach vorliegender Erkenntnis einen neuen, essentiellen Themenkreis für die Klimaforschung, sowohl grundsätzlich, als auch bezüglich der Einführung neuer synthetischer Brennstoffe.

Die Bedeutung der Abwärme wurde bislang in der Klimabewertung als vernachlässigbar eingestuft und deshalb nicht berücksichtigt. Nach vorliegender Erkenntnis sollte anthropogene Abwärme als weiterer Umweltparameter in die Klimadiskussion aufgenommen werden. Meteorologische Analysen hierzu könnten weiterhelfen. Insbesondere müsste in einer dynamischen Betrachtung ermittelt werden, wie sich die anthropogene Abwärme weiter auf Ozeane, Eismassen und Kontinente verteilt und welcher Prozentsatz der Wärme mittelfristig in der Atmosphäre verbleibt. Weiterhin sollte untersucht werden, ob regenerative Energie der Atmosphäre Wärme entzieht oder zuführt

Was die Einführung neuer Brennstoffe und Antriebsmethoden anbelangt, so scheint nach den in Kap.1 dargestellten Verhältnissen sowohl bezüglich Energieverbrauch als auch Umweltbelastung der Elektroantrieb für Luftfahrt und Straßenverkehr im Vorteil zu sein.

K. Rüd , Sept. 2023



6. Anhang

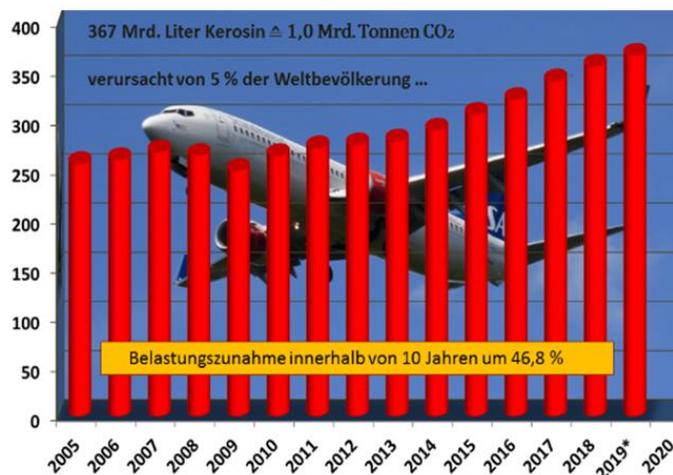
Anhang 1: Fortsetzung zum Primärenergieverbrauch in einzelnen Ländern

Primärenergieverbrauch in Terawattstunden (TWh) 1970–2021: ^[2]										
Rang (2021) ↓	Land ↓	1970 ↓	1980 ↓	1990 ↓	2000 ↓	2010 ↓	2015 ↓	2020 ↓	2021 ↓	Anteil in % ↓
1.	Volksrepublik China	2.362	4.828	7.938	11.800	29.054	35.283	40.995	43.791	26,5
2.	Vereinigte Staaten	18.206	20.752	22.607	26.545	25.952	25.747	24.593	25.825	15,6
3.	Indien	764	1.219	2.301	3.729	6.269	8.030	8.942	9.841	6,0
4.	Russland	...	...	...	7.214	7.815	7.880	8.022	8.694	5,3
5.	Japan	3.271	4.264	5.219	6.242	5.908	5.297	4.759	4.928	3,0
6.	Kanada	1.869	2.712	3.009	3.647	3.755	4.041	3.840	3.871	2,3
7.	Deutschland	3.611	4.239	4.193	3.988	3.847	3.778	3.432	3.512	2,1
8.	Südkorea	167	454	1.066	2.246	3.045	3.333	3.330	3.493	2,1
9.	Brasilien	448	1.115	1.528	2.294	3.134	3.444	3.334	3.490	2,1
10.	Iran	166	406	811	1.397	2.423	2.760	3.340	3.386	2,0
11.	Saudi-Arabien	263	420	928	1.335	2.427	3.018	2.949	3.007	1,8
12.	Frankreich	1.803	2.307	2.658	3.107	2.998	2.808	2.460	2.613	1,6
13.	Indonesien	107	306	600	1.164	1.769	1.945	2.250	2.308	1,4
14.	Vereinigtes Königreich	2.551	2.381	2.508	2.664	2.489	2.277	1.961	1.994	1,2
15.	Türkei	147	298	562	865	1.260	1.604	1.789	1.896	1,1
16.	Mexiko	404	906	1.273	1.636	2.038	2.144	1.786	1.886	1,1
17.	Italien	1.402	1.724	1.855	2.099	2.037	1.811	1.646	1.765	1,1
18.	Australien	570	844	1.033	1.305	1.509	1.600	1.594	1.589	1,0
19.	Spanien	529	887	1.069	1.528	1.710	1.575	1.439	1.553	0,9
20.	Thailand	67	145	358	742	1.222	1.423	1.408	1.419	0,9
21.	Südafrika	421	646	1.030	1.185	1.463	1.415	1.376	1.383	0,8
22.	Taiwan	108	315	585	1.022	1.306	1.344	1.306	1.383	0,8
23.	Vereinigte Arabische Emirate	10	108	345	536	972	1.231	1.183	1.258	0,8
24.	Polen	988	1.496	1.210	1.018	1.166	1.112	1.134	1.234	0,7
25.	Vietnam	91	54	77	214	540	832	1.173	1.200	0,7
26.	Malaysia	44	127	241	611	933	1.114	1.139	1.164	0,7
27.	Pakistan	103	155	305	484	741	816	976	1.071	0,6
28.	Ägypten	91	212	391	569	895	972	984	1.054	0,6
29.	Niederlande	660	872	911	1.007	1.143	984	940	965	0,6
30.	Singapur	87	9,5	273	443	798	932	955	960	0,6
31.	Argentinien	353	472	513	699	885	997	881	953	0,6
32.	Ukraine	...	...	...	1.585	1.427	1.003	918	926	0,6
33.	Kasachstan	...	...	...	370	614	713	804	792	0,5
34.	Belgien	540	566	621	743	773	671	677	757	0,5
35.	Algerien	37	177	315	300	439	618	654	685	0,4
36.	Schweden	487	641	682	639	622	629	618	634	0,4
37.	Irak	39	101	238	323	380	435	552	590	0,4
38.	Norwegen	278	379	495	581	500	548	559	568	0,4
39.	Venezuela	224	456	604	818	946	969	535	564	0,4
40.	Usbekistan	92	...	521	600	531	538	521	547	0,4
41.	Philippinen	...	146	184	301	341	443	510	545	0,3
42.	Katar	12	53	79	134	334	592	515	535	0,3
43.	Kolumbien	121	189	252	314	407	480	482	534	0,3
44.	Nigeria	...	123	204	224	244	459	486	514	0,3
45.	Kuwait	73	85	91	212	393	454	448	483	0,3
46.	Tschechien	527	621	547	474	514	471	442	466	0,3
47.	Chile	90	107	156	311	375	423	450	462	0,3
48.	Bangladesch	12	35	74	136	251	364	439	459	0,3
49.	Turkmenistan	...	...	152	120	250	333	372	446	0,3
50.	Oman	1	17	49	115	241	336	371	416	0,3
51.	Österreich	254	321	335	391	420	395	400	412	0,2
56.	Schweiz	249	307	332	364	350	336	309	298	0,2
...	Sowjetunion	8.810	13.452	18.446	...	...	...	...	...	...



Anhang 2: Einfluss synthetischer Brennstoffe auf die Klimaerwärmung auf der Basis der Kerosinverbräuche von 2015

Beispiel: vollständige Substitution von Kerosin durch LH2



Beitrag zur anthropogenen Abwärme (2015)

Kerosin ($3,25 \cdot 10^{11}$ L):	3 %
bei Substitution durch LH2:	10 %

Potenzieller atmosphärischer Temperatureinfluss

Gemessen/Status:	+ 0,02 °C p.a.	Basis
Kerosin:*	~+ 0,0021 °C p.a.	+10 %
Bei vollständiger Substitution durch LH2 (SAF):*	~+ 0,007 °C p.a.	+35 %

* Annahme: Abwärme verteilt sich gleichmässig über eine Höhe von ca. 10 km

Bei vollständiger Substitution von Kerosin durch LH2 steigt der globale anthropogene Abwärmeeinfall um ca. 7 %-Punkte an. Das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial steigt um 25 %-Punkte.



7.Literatur

- (1) 'Electrica Flight- Potential and Limitations' ; M.Hepperle; DLR Germany; Institute of Aerodynamics and Flow Technology
D-38108 Braunschweig, Germany; STO-MP- AVT-209 (Download under Martin.Hepperle)
- (2) 'Turboelectric Distributed Propulsion Engine Cycle Analysis for Hybrid-Wing-Body Aircraft' J.I. Felder, H.D.Kim, G.V.Brown, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OHIO, AIAA-2009-1132, 2009
- (3) 'Renewable jet Fuel: Upcomming Techology Options'; A. Sizmann 4th Bauhaus Luftfahrt Symposium, Ottobrunn 7th-8th May 2019
- (4) 'Power –to-Liquid/Chemicals' ; K. Arnold,G. Kobiela,A. Pastowski; Wuppertal Institute für Klima, Umwelt Energie GmbH, 2018; Technologiebericht innerhalb des Forschungsprojektes TF Energiewende (written in German)
- (5) 'Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation'; Patrick Schmidt, Walentin Blattgeiger, Arne Roth, et al.; Chem Ing tech 2018, Vol 90, No 1-21267-140
- (6) 'Hydrogen Powered Aviation'; EU Study 2020
- (7) 'Hydrogen in a Low Carbon Economy' Report Nov 2018; Committe on Climate Change
- (8) ASUE, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Ausgabe: April 22
- (9) 'Energy Analysis of Solar Thermochemical fuel Production Pathway with a Focus on Waste Heat Recuperation and Vacuum Generation'; C. Falter, R. Piz-Paal, Bauhaus Luftfahrt , Germany, DLR Köln; Solar Energy 2018
- (11) 'Industrielle Abwärmenutzung'; S. Hirzel, B. Sontag, C. Rode ; Fraunhofer Institut 2013; Bericht Kurzstudie
- (11) ' Was wir heute übers Klima wissen' Stand Juni 2021, herausgegeben von: Deutsche Klimakonsortium, Deutsche Metereologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst. Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz Klimainitiative, Klimafakten.de
- (12) H.D. Baehr; 'Thermodynamik – Eine Einführung in die Grundlagen und ihre tehnsiche Anwendung'
3. Auflage, Springerverlag 1973; S 222 ff
- (13) **Integrating anthropogenic heat flux with global climate models**
Mark G. Flanner,
Advanced Study Program, National Center for Atmospheric Research
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L02801, DOI:10.1029/2008GL036465, 2009
- (14) E-Mail Konversation mit Prof Latif, 7.Juli 2023
Prof. Dr. Mojib Latif ,Ozeanzirkulation und Klimadynamik; Maritime Meteorologie
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Universität Kiel



8. Autor's Biography

CV – Klaus Rued



Contact Data:

Dr. Klaus Rued
Consulting Powerplants and Technology
Claude-Lorrain-Str. 29
81543 München, Germany

Phone: +49 89 1892 0500
Cell: +49 152 3419 7422
E-Mail: klauspeterrued@gmail.com



Background:

Since 2016	Consultant on Propulsion and Technologies and partner of various consulting companies
2001-2016	Director of Department for Advanced and Conceptual Design of Civil and Military Aero Engines (including industrial power plant and gas turbine derivatives)
1996 -2001	Head of Preliminary Design Group for Civil Aero Engines
1987	MTU Aero Engines, Munich, Department Future Projects ; subject: analytical engineering and design
1985-87	Post Doctorate at Arizona State University, USA; Subject: Gas Turbine Cooling, (<u>AvH Fellowship</u>)
1985	Doctorate Degree at University of Karlsruhe, Germany, Prof. Wittig, Topic: Transitional boundary layers and gas turbine heat transfer; translated by NASA : NASA TM-88524
1979	Diploma, Mechanical Engineering at University of Karlsruhe in Thermal Turbomachinery and Measurement and Controls, o. Prof. S. Dr. Wittig and o. Prof. Dr. F. <u>Mesch</u>

20.11.2022

Rued Consulting – Proprietary Information

1