

Zum Einfluss anthropogener Abwärme auf die Klimaerwärmung der Atmosphäre

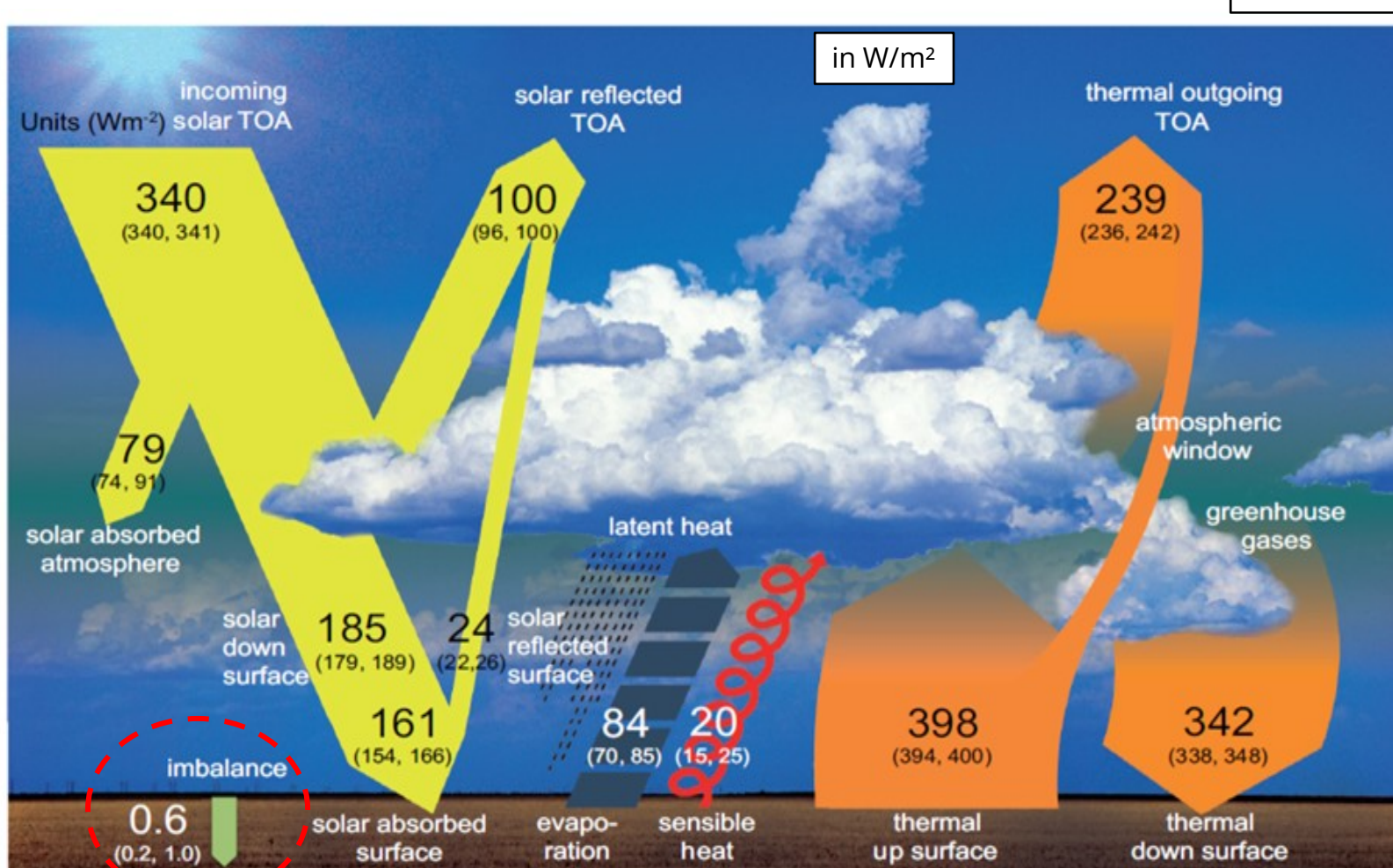
Anthropogene Abwärme unter Berücksichtigung neuer synthetischer Brennstoffe für Luftfahrt und Verkehr
Auf der Basis grundlegender thermodynamischer Analysen wurden Abschätzungen zum potenziellen Einfluss von Abwärme aus Industrie, Heizung, Gewerbe und Verkehr auf die Temperaturerhöhung der Atmosphäre durchgeführt. Ausgehend von der in den vergangenen Jahrzehnten meteorologisch beobachteten Klimaerwärmung nahe der Erdoberfläche von im Mittel 0,02 °C pro Jahr weltweit, werden aufgrund von Abwärme zusätzliche Temperaturerhöhungspotenziale der Atmosphäre in der gleichen Größenordnung und höher identifiziert. Bei der Einführung synthetischer Brennstoffe (SAF) sollten diese Effekte nicht unberücksichtigt bleiben.

EINLEITUNG

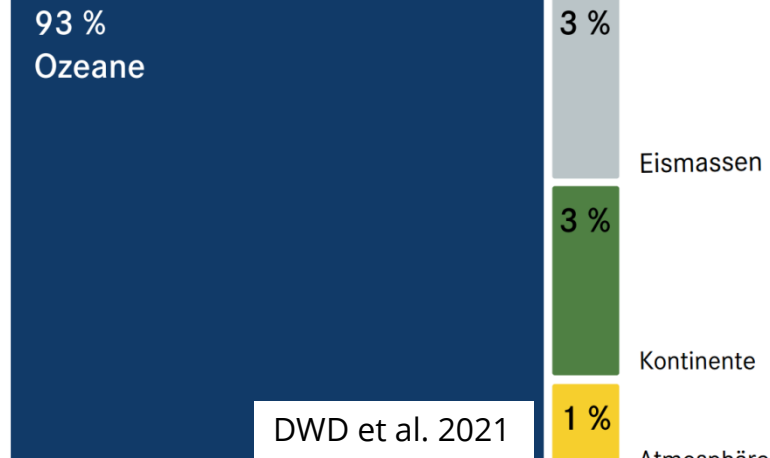
Bisherige Analysen zur Klimaerwärmung beruhen hauptsächlich auf der Modellierung und Bilanzierung des Strahlungsaustausches zwischen Weltall und Erde unter Berücksichtigung treibhausgasbedingter Luftverunreinigungen (CO₂) und deren Interaktion mit der Atmosphäre. Die Berücksichtigung der konvektiven Abwärme aus Heizung, Industrie und Verkehr wurde in gängigen Umweltberichten als nur regionale Erscheinungen und für das Gesamtklima als unbedeutend erklärt. Begründung: Der Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Weltall (Sonne) und Erde ist um den Faktor 10⁴ größer als die vom Mensch generierten anthropogenen Abwärmemengen. Die atmosphärische Klimaerwärmung durch Abwärme und die neu hinzu kommende Abwärme bei der Erzeugung synthetischer Brennstoffe wurde in diesem Beitrag vereinfachend thermodynamisch untersucht (1. und 2. thermodynamischer Hauptsatz).

Klimabilanz

Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre



Wohin fließt die globale Erwärmung?

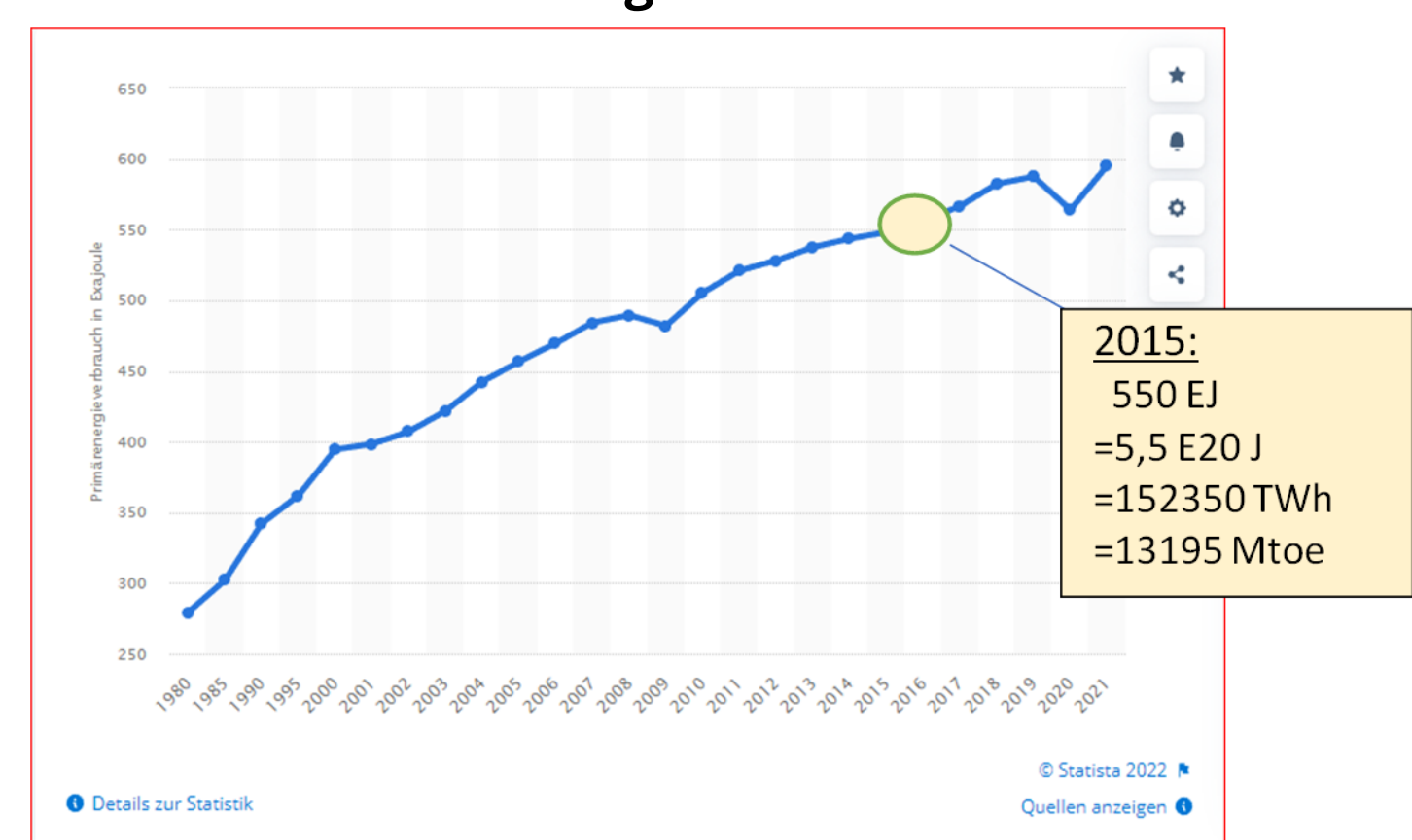


Klimabilanzen fokussieren auf den Strahlungsaustausch zwischen Weltall und Erde. Von der gesamten Einstrahlung (340 W/m²) werden 99,8 % ins Weltall zurückgestrahlt. Nur 0,6 W/m² verbleiben auf der Erde.

Nur 1 % des auf der Erde verbleibenden Wärmeintrags (0,006 W/m²) trägt im Jahresdurchschnitt zur atmosphärischen Erwärmung bei. Nahe der Erdoberfläche wurden im Mittel 0,02 °C p.a. Temperaturerhöhung gemessen. Anthropogene Abwärme wird dabei nicht berücksichtigt.

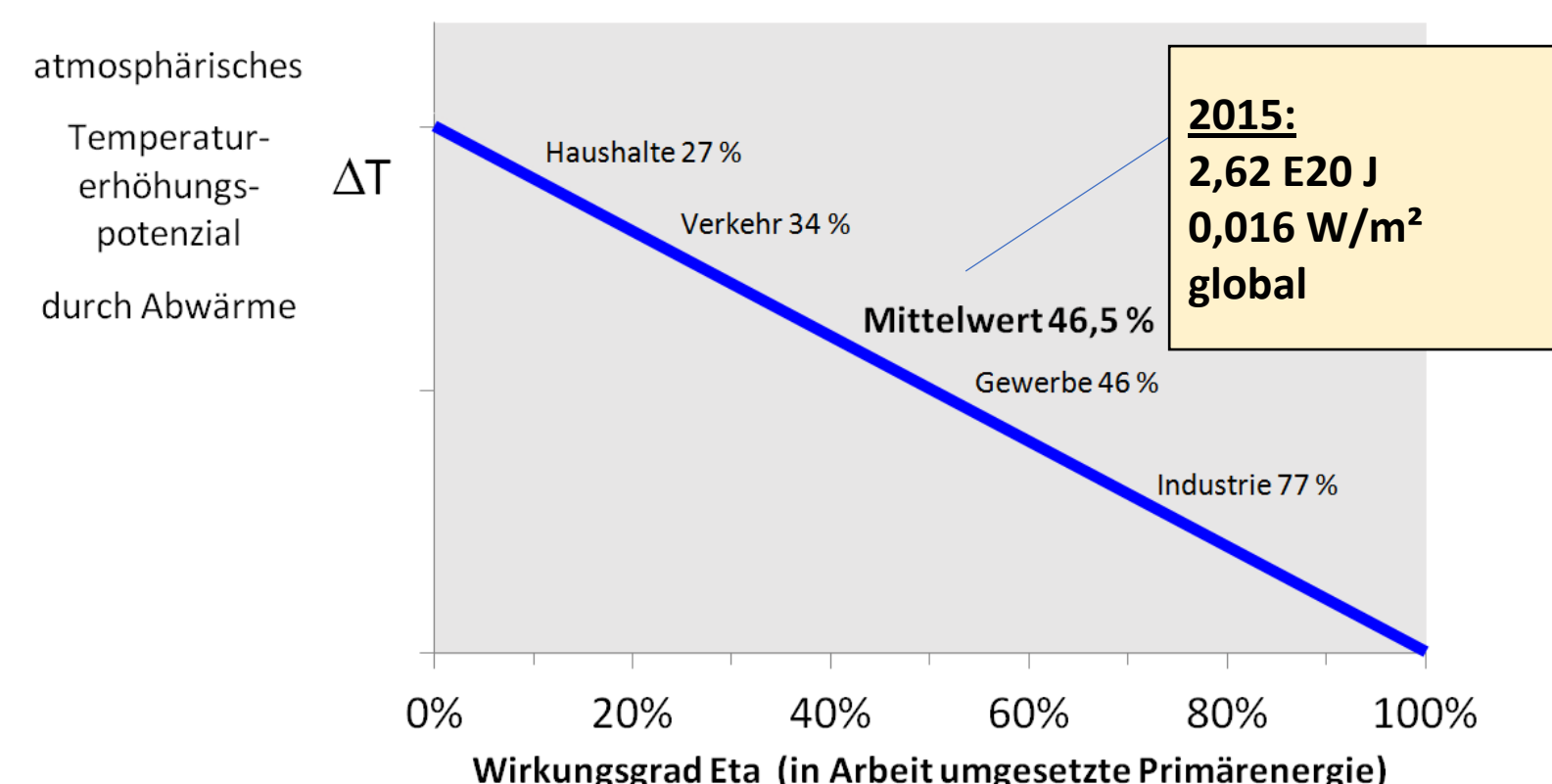
Anthropogene Abwärme

Weltweiter Primärenergieverbrauch seit 1980



Vorliegende Untersuchungen basieren auf dem Primärenergieverbrauch von 2015. Nach Abzug regenerativer Anteile (ca. 11 %) wird daraus die anthropogene Abwärme berechnet.

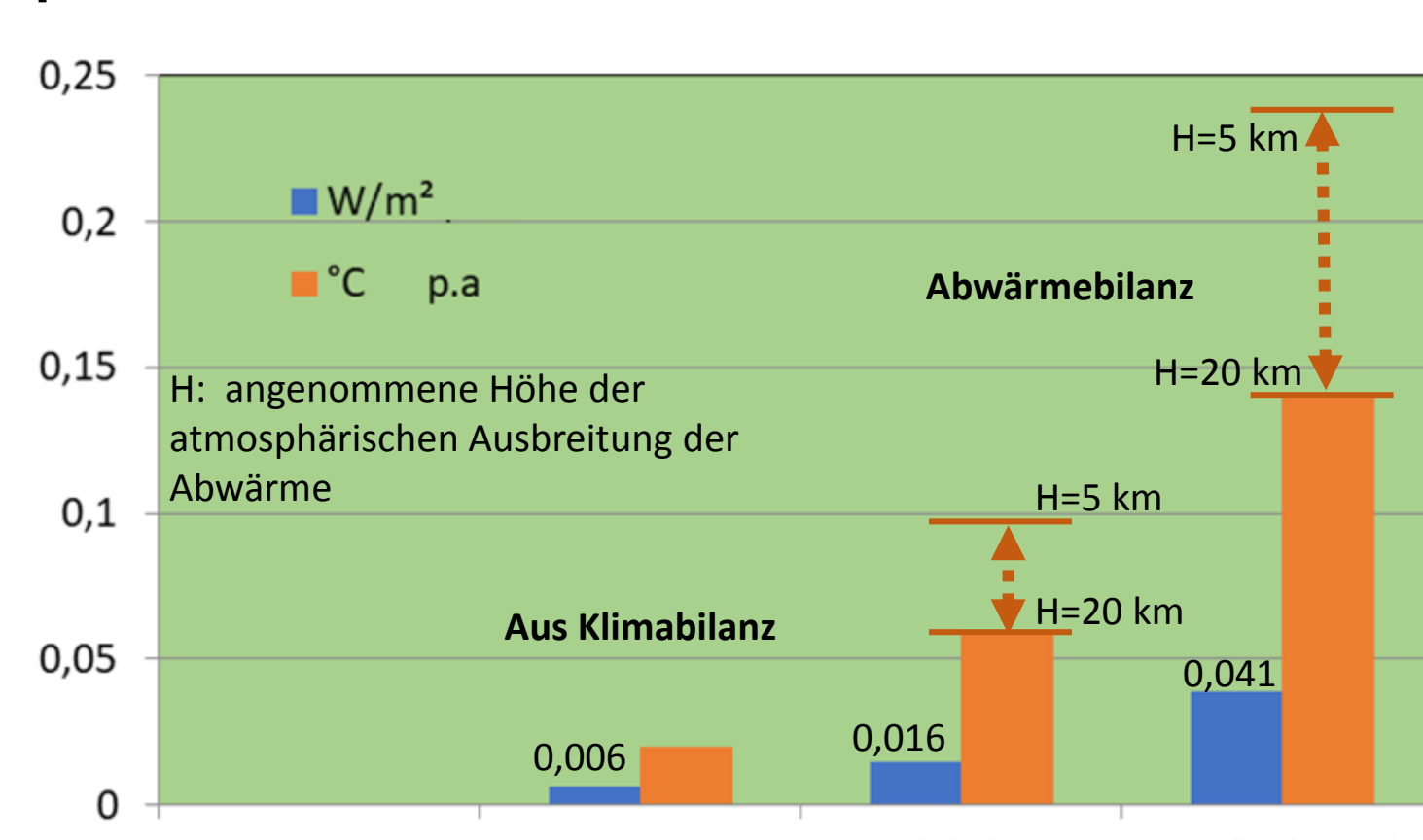
Ermittelte Primärenergie - Umsetzungswirkungsgrade



Der mittlere Umsetzungswirkungsgrad an Primärenergie liegt selbst bei optimistischer Betrachtung unterhalb 50 %. Basis: Aufteilung anhand der Endenergieverbräuche in Deutschland (AGEB); Industriebedarf abgeschätzt nach Rode (2013). Anmerkung: Letztlich wird auch die Arbeit oft in Wärme umgewandelt (z.B. durch Luftwiderstand). Flanner (2009) setzt daher die Abwärme dem Primärenergieverbrauch (ohne regenerative Anteile) gleich.

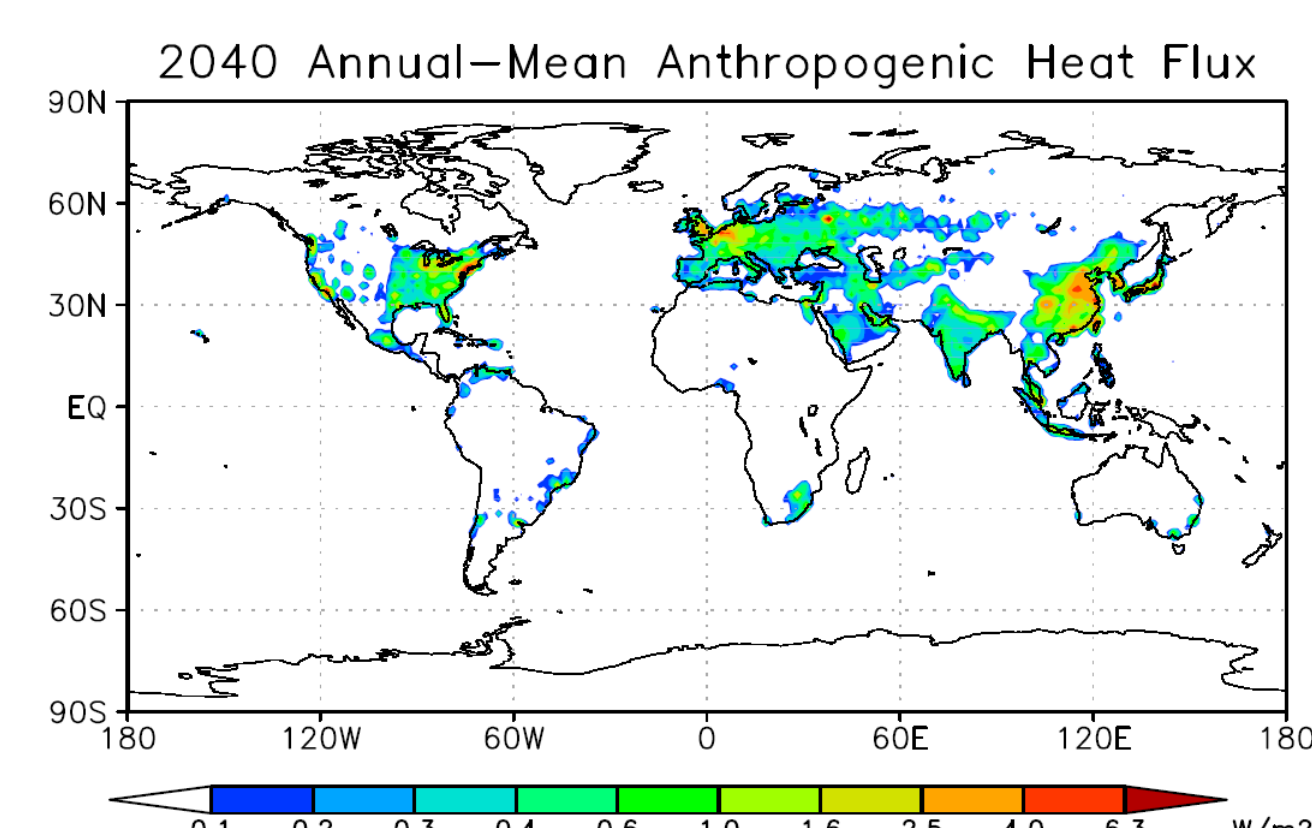
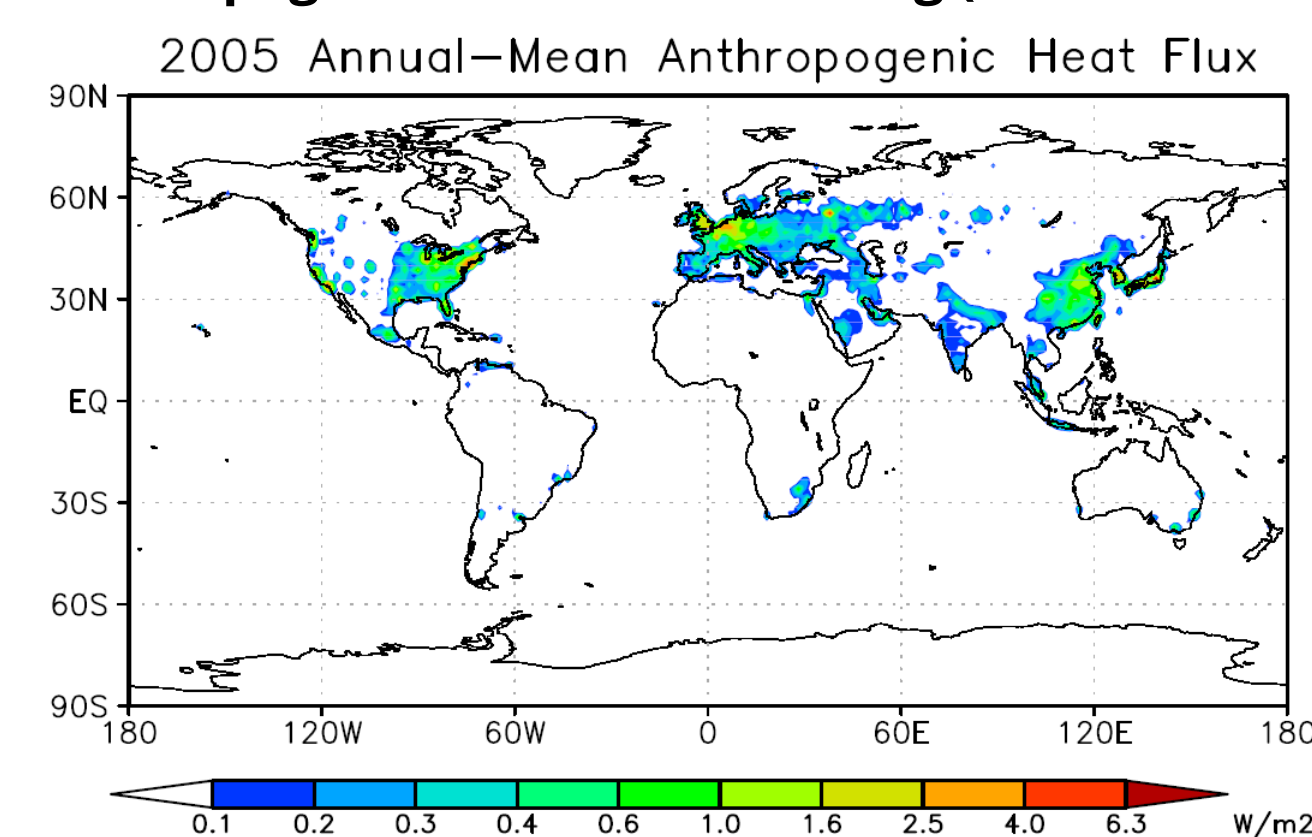
Anthropogener Wärmeeintrag

Anthropogener Energieeintrag in die Atmosphäre und resultierende atmosphärische Temperaturerhöhungspotenziale



Die anthropogene Abwärmemenge übersteigt die aus der Strahlungsbilanz abgeleitete Erwärmung der Atmosphäre beträchtlich. Die Auswirkungen auf der hochpopulativen Nordhalbkugel sind besonders groß. Die Abwärme fällt zunächst in der Atmosphäre an. Es ist aus Wärmeübertragungssicht davon auszugehen, dass ein Großteil der Abwärme zunächst von der Erde aufgenommen wird und dann über langwellige Strahlung in die Atmosphäre / Weltall weitergegeben wird. Ob die verbleibende atmosphärische Erwärmung so etwas wie der 1 % Analogie des Strahlungsaustausches (s.o.) unterliegt, war nicht zu ermitteln.

Anthropogene Wärmeausbreitung (Flanner 2009)



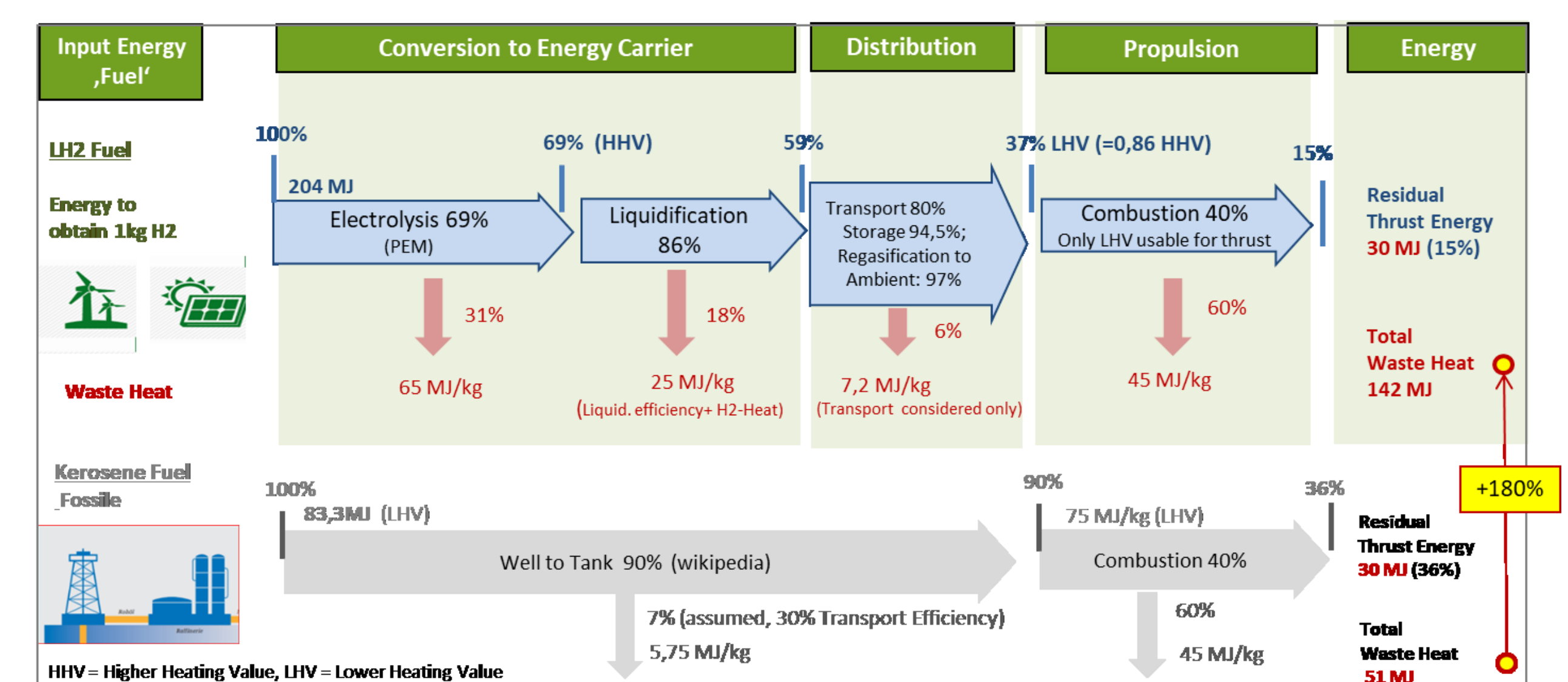
Flanner bestätigt die dominierende Klimaauswirkung der Abwärme auf der Nordhalbkugel. Er zeigt, dass die lokalen Wärmeinträge gegenüber den hier global gemittelten Werten um den Faktor 10 bis 30 höher sein können. Er zeigt auch, dass langfristig eine starke Zunahme der Abwärmemenge und der Abwärmeverbreitung zu erwarten ist. Da sich die Abwärme im Gegensatz zum Strahlungsaustausch konvektiv ausbreitet, ist anzunehmen, dass die Abwärme auch in weite und auch temperatursensible Bereiche transportiert wird. Da aus Wärmeübertragungssicht ein Großteil der Wärme zunächst von der Erde (Ozeane, Eismassen, Kontinente) aufgenommen wird, wird damit auch Flora und Fauna, Meere und Eisschmelze beeinflusst, insbesondere in Europa, USA und Zentralasien. Ausbreitung, Reichweite und Kritikalität erfordert eine meteorologische Bewertung über die rein strahlungsorientierte Klimabewertung hinaus. Ob Abwärme langfristig noch eine regionale Erscheinung bleibt, oder das globale Klima mitbeeinflusst, ist zu klären.

VORGEHENSWEISE

- Thermodynamische Analyse des fossilen Primärenergieverbrauchs und der dabei anfallenden Umsetzungswirkungsgrade in Nutzenergie und Abwärme.
- Vergleich der Abwärme mit der atmosphärischen Aufheizung im Zuge des Strahlungsaustausches mit der Sonne (IPCC Report).
- Analyse synthetischer Brennstoffe am Beispiel LH2 im Hinblick auf Energiebedarf zur Bereitstellung und der dabei anfallenden Abwärme.
- Potenzielle Beiträge der SAF zur atmosphärischen Klimaerwärmung.
- Offen Fragen zum konvektiven Wärmeintrag und Strahlungsaustausch in der Atmosphäre.

Synthetische Brennstoffe am Beispiel LH2

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



Der Energiebedarf zur Herstellung LH2 und die dabei anfallenden Abwärmemengen gegenüber Kerosin bestätigen in vorliegender Abschätzung eine Steigerung um den Faktor 2,5 bis 3. Der Faktor ist sogar noch höher bei Sustainable Aviation Fuel (SAF) als E-Fuel (Power-to-Liquid, PtL). Die Verwendung von Wind- und Sonnenenergie ist nicht klimaneutral. Es wird hochwertigere Energie zum Teil mit erhöhter Temperatur (low Entropy Energy) erzeugt, mit konvektivem Energieeintrag in die Atmosphäre und damit zusätzlichem Einfluss auf Klima und Abwärme.

Einfluss synthetischer Brennstoffe auf die Klimaerwärmung Beispiel: vollständige Substitution von Kerosin durch LH2



Beitrag zur anthropogenen Abwärme (2015)
Kerosin (3,25 · 10¹¹ 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 Abwärmeeintrag um ca. 7 %-Punkte an. Das atmosphärische Temperaturerhöhungspotenzial steigt um 25 %-Punkte. Da mehr als 30 % der Abwärme im Flug (und nicht bodennah) freigesetzt werden, dauert ein Wärmeübergang z.B. in die Ozeane entsprechend länger. 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.

DISKUSSION

Ziel der thermodynamischen Abschätzungen war, auf die Bedeutung der durch den Menschen erzeugten anthropogenen Abwärme hinzuweisen. Die Abwärme erreicht ein nicht zu unterschätzendes Ausmaß, insbesondere auf der Nordhalbkugel (Europa, USA, Zentralasien), mit all den Konsequenzen für Fauna, Flora, Berge, Seen und Gletscher. Tendenz steigend, auch im Zusammenhang mit der Einführung synthetischer Brennstoffe. Die im Mittel gemessenen 0,02 °C p.a. Erwärmung würden bei Umsetzung der Abwärme in atmosphärische Temperaturerhöhung deutlich angehoben werden. 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.