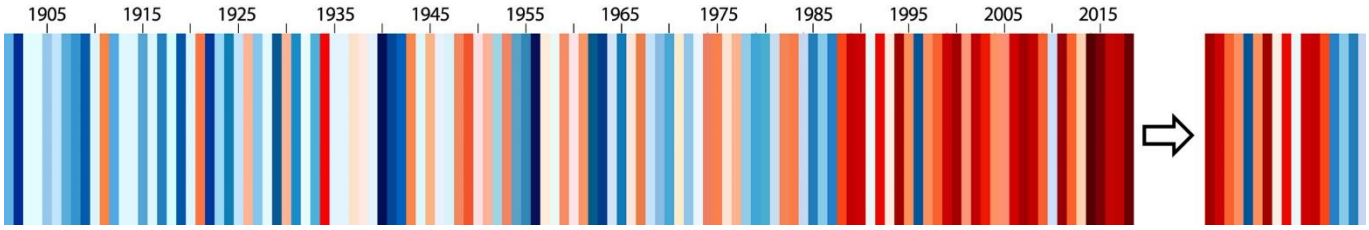


Anpassung des Klimawandels

Inhalt

Einleitung 1
1. Deutschland eilt dem Klimawandel voraus – besonders im Rheintal 2
2. Was bringt die Treibhausgas-Emissionsbegrenzung? 5
3. weg vom puristischen Focus auf CO_2-Minderung! 7
4. Wasserkreislauf und Hitzeregulierung 10
5. Tropennächte als Stadtklimaindikator 16
6. Konsequenzen 20
7. Slow water! 22
Abschlussbemerkung 26
Anhang: Der Strahlungshaushalt der Erde und die Kühlleistung der Biota 27

Einleitung

Mit dem Thema „Klimaanpassung“ verbinden wir bislang die Frage, wie wir uns, unsere Städte und Lebensbedingungen an den „Klimawandel“ anpassen können, wie wir andere Häuser bauen, mehr für Verschattung und Kühlung tun können usw. Und besonders viele Menschen – insbesondere in heißen Regionen – denken ganz schlicht und unmittelbar an die Installation von Klimaanlagen zur Kühlung ihrer Wohnhöhlen. Der egoistische Drang, unsere eigenen Lebensbedingungen zu sichern und möglichst komfortabel zu gestalten, leitet Denken und Handeln. Das ist die ‚artgerechte‘ Perspektive des *Homo sapiens*.

Dabei gerät aus dem Blick, dass die Natur in der Milliarden Jahre langen Geschichte von Leben auf der Erde selbst immer wieder erstaunliche Leistungen erbracht hat, durch die sie ein aus dem Ruder laufendes Klima anpasste und damit die Bedingungen von Leben auf diesem Planeten sicherte. Sie musste dabei wesentlich größere Belastungen verarbeiten, als sie die aktuell um 1,1 °C gestiegene Globaltemperatur mit sich bringt. Die heutige globale Durchschnittstemperatur auf der Erde von 15 °C hat sich im Laufe der Erdgeschichte in der Spannweite von > 5 °C und < 25 °C bewegt[1]. Die Lebensbedingungen auf der Erde wurden bislang immer erfolgreich in diesem Intervall „biotisch reguliert“[2]. Das ist die Perspektive der Natur und Grund für den Titel dieses Textes „Anpassung **des** Klimawandels“.

Doch diese regulierenden Ökosysteme sind von den Menschen derart zerstört worden, dass sie die notwendigen Klimaanpassungen kaum noch erbringen können. Der hin und wieder in den Blick gerückte Verlust an

[1] Victor G. Gorshkov, Vadim V. Gorshkov and Anastassia M. Makarieva: Biotic Regulation of the Environment. Key Issue of Global Change. Springer. Published in association with Praxis Publishing Chichester, UK, 2000, S. 236 ff

[2] Die Aufrechterhaltung lebensfreundlicher Umweltbedingungen auf der Erde erfolgt durch die biotische Regulierung der Umwelt bzw. die „**Biota**“, die alle Lebewesen der Umwelt (Pflanzen, Tiere, Pilze, Bakterien) umfassen. Nicht zu den Biota werden Viren gezählt sowie der Mensch, der nicht biotisch in die Regulierung der Umwelt einbezogen ist, sondern diese durch sein Handeln (zer)stört.

Biodiversität ist nur ein *Indikator* für die Annäherung an diesen Kipppunkt biotischer Regulierung, weil sich Artenrückgang mit dem Instrumentarium menschlicher Intelligenz messen lässt[3]. Das Verständnis biotischer Regulierung ist hingegen komplizierter. Biotische Regulierung überschreitet in ihrer Komplexität alles, was menschengemachte Rechner- und KI-Systeme jemals modellieren können. Der Wirkungsverlust biotischer Regulierung ist daher noch nicht ins Gemeinverständnis vorgedrungen und wird selbst vom Weltklimarat (IPCC) nicht mit der nötigen Priorität behandelt.

Dieser Text will den Blick auf diese Zusammenhänge lenken und – mit Focus auf den Lebenszusammenhang meiner Stadt Darmstadt – ein paar Handlungsrichtungen andenken, die sich ‚im Kleinen' gehen lassen. Anstoß für diese Untersuchung ist die offene Frage, warum sich Regionen in Deutschland – und insbesondere das Rheintal, in dem Darmstadt gelegen ist – so sehr aufheizen, dass ihre Temperaturentwicklung weit über die globale Erderwärmung hinausgeht, die mit dem „Klimawandel" verbunden wird.

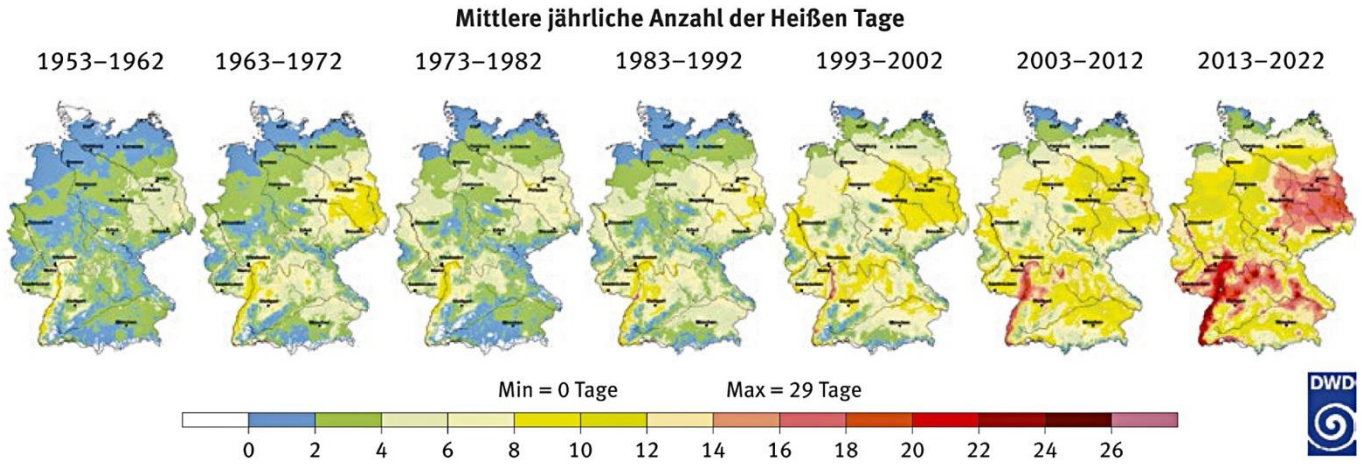
1. Deutschland eilt dem Klimawandel voraus – besonders im Rheintal

Ende November 2023 stellte die Bundesregierung wieder einmal einen Bericht vor. Die Medien berichteten kurz, dann war er wieder vergessen, bzw. von anderen Krisenberichten überlagert worden. In jener Pressekonferenz vom 28. November[4] mit Umweltministerin Steffi Lemke ging es um den **Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel** [5] – also um die Beschreibung des aktuellen Zustandes, wie wir mit der Anpassung an das sich rasant verändernde Klima fertig werden – bzw. korrekter: wie wir damit *nicht* fertig werden.

Diesem Bericht haben Referate diverser Bundesministerien, zahlreiche Bundesbehörden, Forschungsinstitute und Universitäten sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD) zugearbeitet. Letzterer verantwortet das Kapitel „Klimaentwicklung in Deutschland".

Darin findet sich eine bemerkenswerte grafische Darstellung der jüngeren Klimaentwicklung, gegliedert in die letzten sieben Dezennien. Noch nie wurde uns so anschaulich präsentiert, welche gravierenden klimatischen Veränderungen in der kurzen Lebensspanne eines Menschen stattfinden können, weil alle früheren Klimaveränderungen immer ein Vielfaches an Zeit in Anspruch nahmen, weil sie ungleich langsamer verliefen.

Anhand der „heißen Tage" pro Jahr (= Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C), diese über jeweils 10 Jahre gemittelt und damit um „Ausreißerjahre" bereinigt, ergibt sich über die sieben Jahrzehnte seit den 1950-er Jahren ein unverkennbarer Trend zur Aufheizung Deutschlands:



[3] Frauke Fischer: Was ist, wenn der Klimawandel gar nicht unser Problem ist? in: Focus online, 22.06.2024 (mit weiterführenden Literaturhinweisen).

[4] Zugehörige Pressemitteilung des Umweltbundesamtes: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/folgen-der-klimakrise-in-deutschland-verschaerfen

[5] Download-Angebot des Berichts: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023

–

***Abb. 1**: Flächenhafte Darstellung der mittleren jährlichen Anzahl heißer Tage je Dezennium ab 1953, Modellierung der Messdaten durch das DWD, Monitoringbericht 2023, S. 23*

Leider hat man diese bedrückende Darstellung auf ein winziges Format verkleinert, aus dem sich keine Details entnehmen lassen[6]. Vergrößert man die Abbildung in der Druckfassung des Monitoringberichts, so zeigt sich vor allem das Druckraster (Abb. 2 links), man kann aber nicht einmal die Namen der eingetragenen Bundesländerhauptstädte richtig lesen (in der PDF-Version des Berichts ist alles nur noch verschwommen). In besser aufgelösten ähnlichen Darstellungen des DWD erahnt man immerhin das 1-km-Raster des zugrundeliegenden Deutschlandmodells, mit dem die flächenhafte Darstellung aus Daten der einzelnen DWD-Wetterstationen generiert wird. Denn das muss man im Hinterkopf behalten: die fein differenzierte kartografische Darstellung basiert nicht auf einem entsprechend fein verteilten Messstellennetz, sondern auf Modellrechnungen, die sich u.a. auf die Messdaten der sehr viel gröber verteilten DWD-Messstationen stützen [7]:

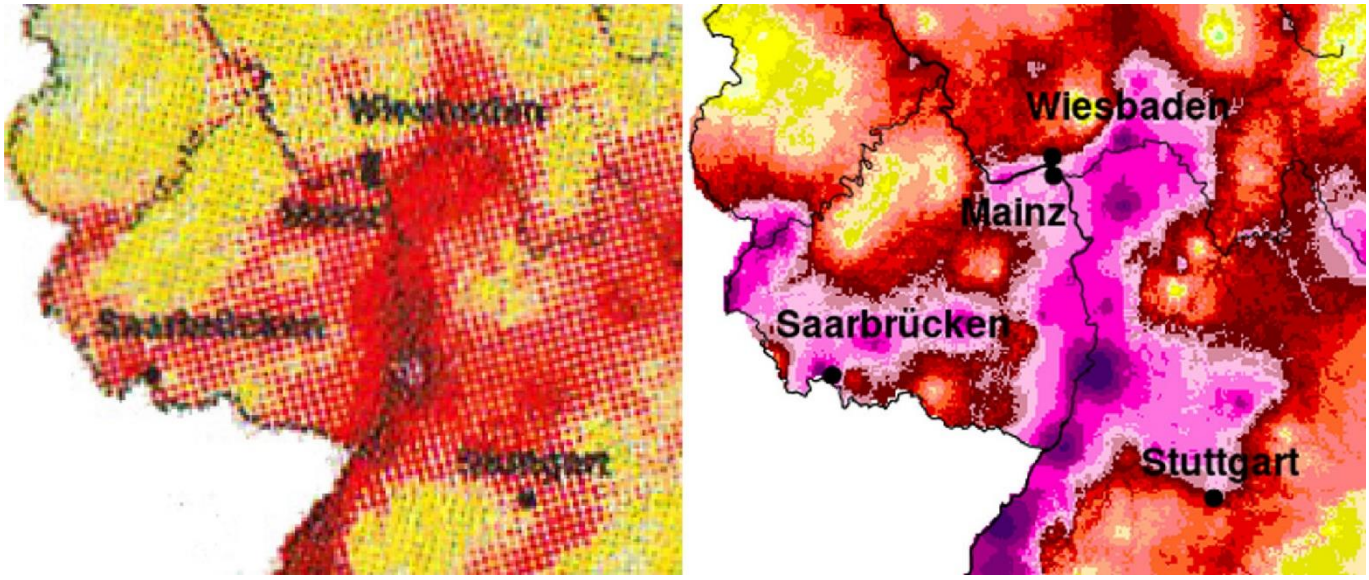


***Abb. 2**: Links ein Ausschnitt Südwestdeutschlands aus dem Monitoringbericht zum letzten Dezennium (2013-2022) zur gemittelten Anzahl heißer Tage pro Jahr (vgl. Abb. 1), in dem das Druckraster dominiert. Rechts der entsprechende Ausschnitt aus der großformatigeren DWD-Darstellung heißer Tage für das Einzeljahr 2022 [8], in dessen Pixelstruktur noch das 1 km-Flächenraster der Modellrechnung zu erahnen ist.*

Der „Deutsche Klimaatlas“ des DWD stellt zu zahlreichen Klimaparametern zum einen Normalwerte bereit, die in der Klimaforschung üblicherweise aus einem länger zurück liegenden 30 Jahre-Mittel bezogen werden. Damit lassen sich Jahreswerte vergleichen, die entweder als Absolutwerte oder als Abweichungen zu den Normalwerten je Erfassungsjahr dargestellt werden. Die spezielle Darstellung von Zehnjahresmittelwerten, wie sie im Monitoringbericht 2023 miniaturisiert wurde, hält der „Deutsche Klimaatlas“ leider nicht in einer

---

[6] Zudem stellen sich weitere Fragen zu dieser Darstellung, für die sich im Monitoringbericht keine Antworten finden lassen, etwa:

- Dargestellt ist Deutschland durchgängig im Gebiet nach der Wiedervereinigung von 1989, als hätte es diesen Staatsgebietszuschnitt bereits seit 1953 gegeben. Doch in den ersten vier Dezennien gab es die DDR, die nicht vom Deutschen Wetterdienst beprobt wurde. Woher stammen also die Daten aus den DDR-Jahrzehnten?
- Auch die Herkunft älterer Daten als Grundlage der flächenhaften Darstellung der Temperaturen bleibt unklar. Der „Deutsche Klimaatlas“ liefert Jahreswerte erst ab 2000.

[7] Darstellung des Verfahrens in: Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 193 (1995), Gerhard Müller-Westermeier: Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten, http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201601274356. Das Verfahren der Kartengenerierung setzt voraus, dass „eine brauchbare Korrelation zwischen einem klimatologischen Parameter und der Topographie vorliegt" (S. 16).

[8] Die flächenhafte Darstellung von Klimadaten der punktuellen Messstationen ist dem Deutschen Klimaatlas des DWD zu entnehmen: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html

besseren Auflösung bereit. Daher der Vergleich in Abb. 2 mit dem letzten Einzeljahr aus der Darstellung von Abb. 1, wobei das heiße Jahr 2022 besonders drastische Hitzewerte produzierte.

Die Darstellung der Abb. 1 zeigt deutlich, dass sich Deutschland insgesamt stark aufheizt. Das Bild differenziert sich jedoch nach Regionen: Die Küstenbereiche an Nord- und Ostsee sind geringer betroffen (Drift vom kühlen blauen in den immer noch kühlen grünen Bereich). Bestimmte Gebiete heizen sich jedoch besonders rasant auf:

- Auffällig ist zum einen das **Rheintal**. In den 1980-er Jahren zeigen sich zunächst mit kleinen roten Flecken punktuelle Aufheizungszentren in Karlsruhe und Freiburg. Dann driftet im ersten Dezennium dieses Jahrtausends das gesamte Rheintal bis hinauf in die Wetterau in den roten Bereich. Im zweiten Dezennium verschärft sich dieser Trend im Kernbereich des Rheintals, zudem ‚schwappt' der rote Bereich vom Rhein-Main-Necker-Raum über die Rheintal-Ränder nach Westen und Osten hinaus.
- Im **Osten Deutschlands** wird ein weiteres Problemgebiet sichtbar: die nördliche Küsten- und die südliche Bergregion sind weitgehend aus der Kühle blauer Bereiche herausgefallen – wie auch andere große Teile Deutschlands. Aber in den südlicheren neuen Bundesländern Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt entwickelte sich im letzten Jahrzehnt eine ausgedehnte Dürreregion, die die überhitzen Flächen im Rheinteil flächenmäßig noch übertrifft.

Auf die Ursachen für solch regionale Differenzierungen ist noch zurückzukommen. Zunächst sei aber der Aufheizungsprozess in Deutschland *global* eingeordnet: Die nachfolgende Abb. 3 befasst sich mit den Jahresmittelwerten der Lufttemperatur seit 1880, also ungefähr seit Beginn der Industrialisierung. Dargestellt sind die Temperatur-*Abweichungen* vom Durchschnittswert eines 30 Jahre-Referenzzeitraums, der hier auf 1961 bis 1990 festgelegt wurde (als türkiser Balken in Abb. 3 ergänzt).

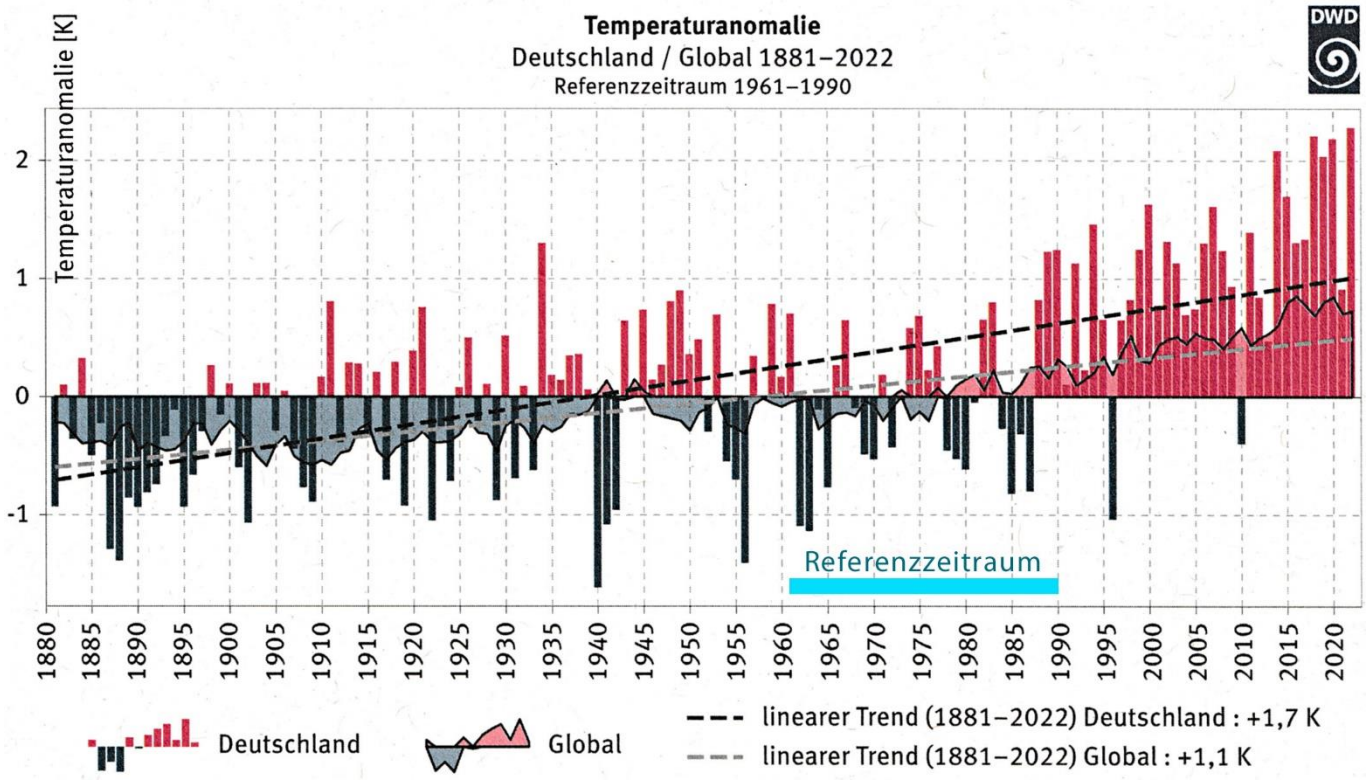


***Abb. 3**: Abweichungen der jährlichen Durchschnittstemperaturen vom Durchschnittswert des Referenzzeitraums – in Deutschland sowie global. Monitoringbericht 2023, Abb. 1; Referenzzeitraum türkis ergänzt.*

Die Deutschland-Jahreswerte sind in Abb. 3 als Säulen, die globalen Werte als flächig gefüllte Kurve dargestellt. Man sieht deutlich, dass die allermeisten Deutschland-Jahreswerte weit über die globalen Werte hinausgehen, dass sich also Deutschland früher und sehr viel stärker aufgeheizt hat als der Globus insgesamt. Das schlägt sich auch in den beiden in Abb. 3 ergänzten Trendlinien nieder. Der *globale* Temperaturanstieg (grau gestrichelte Linie) hat danach bislang einen Wert von 1,1° erreicht – und liegt damit noch unter dem 1,5 °-Ziel. Die Entwicklung in Deutschland hingegen (schwarz gestrichelte Linie) zeigt bereits einen

deutschlandweit durchschnittlichen Anstieg der Temperatur um 1,7°. Die Zielmarke von +1,5 °, auf die die Weltgemeinschaft den globalen Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung bis 2100 begrenzen will, ist also in Deutschland längst überschritten. Diese Entwicklung geht weiter und stellt sich in den genannten Problemzonen noch gravierender dar.

2. Was bringt die Treibhausgas-Emissionsbegrenzung?

Die aktuelle Klimapolitik konzentriert sich auf die Minderung von Treibhausgasemissionen, insbesondere des CO_2. Allerlei politisch lancierte Erfolgsmeldungen begleiten dies – doch die sind oft fragwürdig[9]. Denn an der entscheidenden Quelle, d.h. bei der Förderung der fossilen Energieträger Gas, Öl und Kohle, deren Verbrennung zu diesen Treibhausgasemissionen führt, lässt sich keine Trendwende erkennen.

Das wurde mit der Weltklimakonferenz Ende 2023 in Dubai (Vereinigte Arabische Emirate / VAE) deutlich. Es soll hier nicht in den Vordergrund geschoben werden, dass absurde 70.000 angereiste (d.h. herangeflogene) Sitzungsteilnehmer, Lobbyisten und Aktivisten mit dem Besuch dieser Konferenz einen gigantischen CO_2-Abdruck hinterlassen haben. Überraschend war die Offenbarung, dass bis heute keine der vielen Weltklimakonferenzen einen Beschluss gefasst hat, nach dem die Förderung fossiler Energieträger zu beenden sei. Die meisten der über die Klimaentwicklung besorgten Menschen sind wohl bislang davon ausgegangen, dass diese elementare Voraussetzung für eine Politik zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen selbstverständlich ist. Dubai hat uns in diesem Winter etwas anderes gelehrt: Ein Nutzungsende fossiler Energieträger hat nie zum beschlossenen Programm der „Weltgemeinschaft“ gehört.

Entsprechend fällt auch die Bilanz der Förderung und Verbrennung fossiler Energieträger aus: Abb. 4 zeigt, dass die Verbrennung fossiler Energieträger in den letzten 10 Jahren sogar noch zugenommen hat und nur im Corona-Jahr 2020 einen vorübergehenden Dämpfer erlitt, der aber längst wieder ‚ausgeglichen‘ ist.

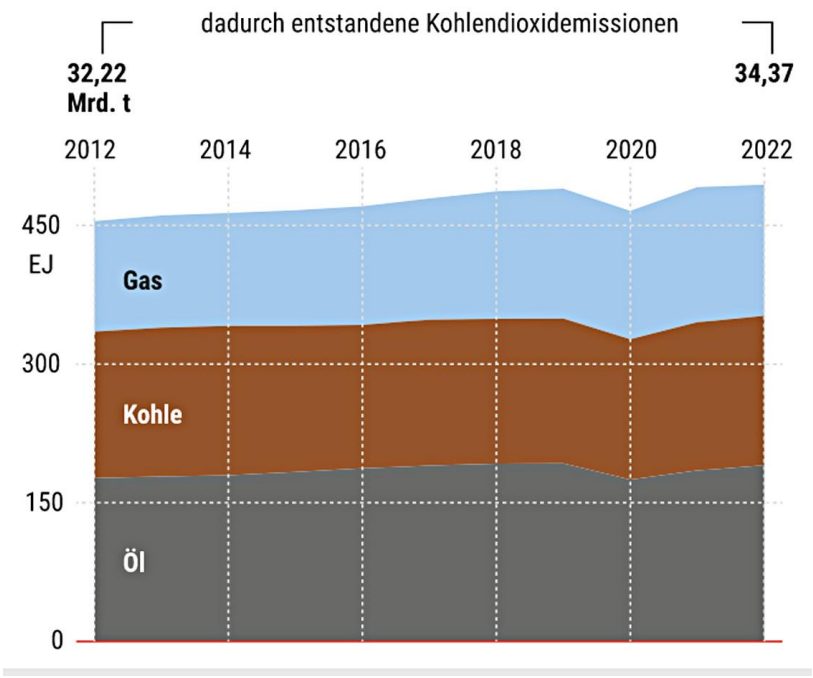


***Abb. 4**: Weltweiter Verbrauch fossiler Energien in Exajoule nebst dadurch ausgelösten CO_2-Emissionen (DE vom 14.12.2023 / dpa-Grafik mit Quelle Energy Institute, London)*

In Dubai stellten die zehn am stärksten von der Erderwärmung betroffenen Mitglieder dieser „Weltgemeinschaft“ – Somalia, Tschad, Niger, Guinea-Bissau, Mikronesien, Tonga, Eritrea, Sudan, Liberia und die Solomones – nur 1.509 Delegierte, die Lobbyisten fossiler Energien hingegen 2.456 und zudem den Präsidenten der Konferenz, Sultan Ahmed al-Jaber, der zugleich CEO der staatlichen Ölgesellschaft der VAE ist. Dieser Präsident hat die Abschlussabstimmung hastig mit einem in allen Videomedien wiedergegebenen Hammerschlag beendet, als die Vertreter der bedrohten Inselstaaten Samoas noch gar nicht im Saal waren, und auf diese skrupellose Weise „Einstimmigkeit“ hergestellt. Damit blieb erneut das Ziel einer Reduzierung der Förderung fossiler Energieträge auf der Strecke.

[9] Vgl. etwa das Gutachten des Expertenrats für Klimafragen zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024 vom 03.06.2024, https://expertenrat-klima.de/publikationen/: Der Rückgang an Treibhausgasen geht vor allem auf die negative Entwicklung der energieintensiven Industrie zurück (Abb. Z5) während die Emissionsziele bei Gebäuden und Verkehr überschritten werden (Abb. Z1).

Es sind aber nicht nur diese Kräfteverhältnisse, an denen die hehren Ambitionen der Klimaretter zersplittern. Es ist auch das Unvermögen der Politik, die notwendige Umsteuerung strategisch wirksam mit dem nötigen ganzheitlichen Denken und Instrumentarium voranzubringen. Das „Heizungsgesetz“ ist nicht am Filz im Wirtschaftsministerium gescheitert, weil der zuständige Staatssekretär Graichen seinem Trauzeugen einen Posten verschafft hat. Es ist an den Realitäten gescheitert, die man unter einer verengten puristischen Perspektive im Hauruck-Verfahren auf den Kopf stellen wollte. Man mag über die verlorenen Jahre der sich als Klimakanzlerin inszenierenden Angela Merkel jammern und nun einen riesigen Aufholbedarf reklamieren. Doch der Umbau lässt sich nicht erzwingen. Zwei Beispiele für die ganz praktischen strategischen Versäumnisse:

Fehlgesteuertes Bildungssystem

Die Installation der „Energiewende“-Infrastruktur – Solaranlagen, Wärmepumpen, Wasserstofftechnologie, Batterietechnologie, Ladesäulen usw. – hängt entscheidend von den verfügbaren Fachkräften ab. Die gibt es aber nur unzureichend, weil die Einrichtungen der beruflichen Bildung nicht liefern bzw. weil berufliche Bildung nicht den gesellschaftlichen Stellenwert hat, den wir ihr geben müssten. 600.000 junge Menschen zwischen 15 und 24 Jahren, die ihre Schulbildung abgeschlossen haben, wissen nichts mit ihrem Leben anzufangen und hängen ab[10]. Gefragt sind ansonsten bei Jugendlichen (bzw. ihren Helikoptereltern) vor allem Gymnasialabschlüsse. Und danach wollen Abiturienten gerne „irgendwas mit Medien“ machen, Psychologie studieren oder Influencer werden. Die Auszubildendenzahlen nehmen ab, die Studentenzahlen hingegen zu[11]. Sie belasten die Wohnungsmärkte der Universitätsstädte, liefern aber zu wenig Ingenieure in den MINT-Fächern. Stattdessen sehen wir eine ausufernde Flut von immer spezialisierteren Orchideenstudiengängen, die für die strategische Weiterentwicklung unserer Infrastruktur und die Eingrenzung der Ökosystemzerstörung keine Relevanz haben.

Energiefressender Gebäudebestand

Man muss nur mal durch die Lande fahren und sich den komplexen Gebäudebestand unter dem Aspekt seiner energetischen Sanierbarkeit vergegenwärtigen. Der ist so unterschiedlich, dass die schlichte Devise „jedem seine Wärmepumpe“ offensichtlich nicht funktionieren kann: In den verdichteten Kernquartieren der wachsenden Städte ist für Wärmepumpen kein Aufstellplatz, vor den schlecht gedämmten Einfamilienhäusern der zersiedelten Peripherien und den Sozialbauten der Nachkriegszeit sind Wärmepumpen energetische Verschwendung. Für energetische Sanierung, die oft der Installation einer Wärmepumpe vorangehen müsste, fehlt den meisten Eigentümern schlicht das Geld. Für die Umsiedlung der alt gewordenen Singles oder Paare, die in leer gefallenen ehemaligen Familienwohnungen festhängen, fehlen die passenden „Tiny“-Alternativen – die viel zu groß gewordenen Wohnungen werden für weniger gewordene Menschen dennoch komplett beheizt.

Auch beim Wohnungsneubau stößt energieverbrauchsarmes und damit CO_2-emissionsminderndes Bauen an seine Grenzen – höhere Kosten für das „Effizienzhaus 40“[12] stehen nur noch geringen Energieeinsparmöglichkeiten gegenüber[13]. Deshalb hat die Bundesbauministerin im August 2023 die Verschärfung der Energiestandards im Wohnungsneubau gestoppt.

Der flächenfressende Wohnungsbau hat nicht dazu geführt, dass unter dem Strich mehr Wohnungen verfügbar wurden. Vielmehr hat sich die Wohnfläche pro Person immer mehr vergrößert. Und überall sind die gleichen Kisten entstanden, die keine Ortsidentität ausdrücken und deshalb ihren Bewohnern keine Heimat bieten können. Gebaut wird fast nur noch von großen, renditeorientierten Investorengesellschaften, mit denen

---

[10] https://www.faz.net/aktuell/karriere-hochschule/trotz-personalmangel-junge-menschen-ohne-arbeit-studium-oder-ausbildung-19193554.html

[11] https://www.destatis.de/DE/Im-Fokus/Jahr-der-Jugend/_inhalt.html

[12] Die Kennzahl 40 gibt an, dass das Effizienzhaus nur 40 % Primärenergie benötigt, verglichen mit einem Referenzgebäude (nach Gebäudeenergiegesetz). Zudem liegt der Transmissionswärmeverlust bei nur 55 % des Referenzgebäudes. Der bauliche Wärmeschutz ist somit um 45 % besser (https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-Effizienzhaus/).

[13] Vgl. die Stellungnahme des wissenschaftlichen Dienstes des Bundestags zur „Kostensteigerungen im Wohnungsbau durch höhere Energiestandards“, https://www.bundestag.de/resource/....pdf

sich dann weitgehend hilflose Bewohner über Baumängel, Nebenkosten und steigende Mieten auseinandersetzen müssen.

Alternativen sind denkbar: Privater oder genossenschaftlicher Wohnungsbau auf kleinen Parzellen, angepasste bzw. nachträglich anpassbare sparsame Wohnflächen je Bewohner, niedrige Grundstückspreise (z.B. im Wege des Erbbaurechts), Haustypen, die nicht nur als Energiespar-Häuser konzipiert werden, sondern vor allem auch durch ihre Begrünung als Null-Aufheizhäuser, sollten zu Standards von Neubaukonzepten werden. Für den Bestand sind – auf die jeweiligen Gebäudetypen abgestimmt – differenzierte energetische Sanierungs- und Umbaumodelle zu entwickeln, die Eigentümern wie ausführenden Fachkräften zuverlässige praktische Handlungsgrundlagen liefern, die ökonomisch verträglich sind, den Gebäudebestand auf flexible flächensparende Nutzung umstrukturieren und auch den ästhetischen Gebäudecharakter berücksichtigen.

Derartige Überlegungen, die sich um eine ganzheitliche Problemsicht bemühen, könnte und müsste man auch auf all die vielen anderen stagnierenden Handlungsfelder richten, etwa:

- den ungebrochen anwachsenden Verkehr auf den Straßen, der in der Wahrnehmung durch Alibi-Aktionismus von „verkehrsberuhigten“ 15-Minuten-Stadtzonen sediert wird,
- die sich explosionsartig ausbreitenden Rechenzentren mit ihrem gigantischen Stromverbrauch als das energiefressende dreckige Gesicht der allseits als Heilsbringer propagierten „Digitalisierung“,
- die Implementierung einer teuren und energieaufwändigen Flüssiggasinfrastruktur (gerne auch aus Fracking-Gas), weil nun mal Wind und Sonne nicht immer zur Verfügung stehen und der stetig wachsende Energieverbrauch den Zubau an Windkraft neutralisiert,
- usw. usf.

Weil die Anstrengungen zur CO_2-Emissionsminderung offensichtlich nicht hinreichend greifen, werden Entsorgungstechnologien verstärkt in den Blick genommen: Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre durch dessen Speicherung in der Erdkruste, die sogenannten **CCS-Technologien** („Carbon Capture and Storage“). Das sind hochproblematische Konzepte, mit denen aberwitzig viel Geld verbrannt werden kann, ohne dass diese ‚Investitionen‘ irgendeinen gesellschaftlichen oder ökologischen Nutzen bringen. Es ist zudem höchst fraglich, ob man CCS in jene Größenordnung skalieren kann, die benötigt würde, um der Atmosphäre die gewünschten CO_2-Mengen wieder zu entziehen. Denn dies Treibhausgas wurde in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung über 150 Jahren akkumuliert, indem gigantische, in vielen Millionen von Jahren angelagerte Kohlenstoffmengen verbrannt wurden.

Die ZEIT brachte in diesem Kontext ein signifikantes Beispiel: *„Aktuell werden jährlich weltweit rund 40 Milliarden Tonnen* [CO_2] *ausgestoßen. Die weltweit größte CO_2-Filteranlage für Direct Air Capture, die gerade in Island in Betrieb ging, hat eine Kapazität von 36.000 Tonnen pro Jahr. Das ist ein knappes Millionstel“.*[14]

Die *natürliche* CCS-„Technologie“ – Bindung von Kohlenstoff in der Vegetation und in den Böden – gerät dabei aus dem Blick – bzw. man fügt sich dem Gang der Dinge: Abholzung großer Waldbestände nicht nur im Regenwald, sondern weltweit (zum Beispiel auch durch solche Publikumslieblinge wie IKEA[15]), Verlust von Wäldern durch Brände, Trockenlegung von Mooren und Feuchtwiesen, Zerstörung der Böden durch industrialisierte Landwirtschaft usw. usf. – d.h. unvermindert grassierende Eingriffe in die natürlichen Ökosysteme – konterkarieren alles, was die meist vergeblichen Bemühungen um CO_2-Reduktion anstreben oder bewirken können.

3. weg vom puristischen Focus auf CO_2-Minderung!

Seit einigen Jahren übersteigt die Aufheizung im Deutschland-weiten Schnitt jenes 1,5°-Ziel, auf das die „Weltgemeinschaft“ die menschengemachte Erderwärmung eigentlich, aber ziemlich erfolglos begrenzen will (s.o. Abschnitt 1 mit Abb. 3). Die flächenhafte Auswertung der Temperaturdaten in Deutschland zeigt ferner, dass sich die allgemeine Aufheizung regional unterschiedlich verschärft. Somit gibt es Regionen, in

[14] Vgl. DIE ZEIT 29.05.2024 „Ein gutes Jahr fürs Klima?“; s.a. die (unkritisch) darüber berichtende Presse, z.B. https://www.heise.de/news/Groesste-CO-Filteranlage-der-Welt-in-Island-eroeffnet-9715212.html

[15] Vgl. die Arte-Dokumentation „Wie Ikea den Planeten plündert“, https://www.arte.tv/de/videos/112297-000-A/wie-ikea-den-planeten-pluendert/

denen die Aufheizung selbst jene 1,7° gesamtdeutscher durchschnittlicher Aufheizung seit Beginn der Industrialisierung noch einmal kräftig überschreitet.

Die herausragendste Aufheizungsregion (neben der im letzten Jahrzehnt hervorgetretenen Hitze- und Dürre-Region in Ostdeutschland) ist seit längerem der Rheingraben. Bereits die Eingangsgrafik der Abb. 1 zeigte dies unverkennbar. Abb. 5 konkretisiert die Situation am Beispiel der „heißen Tage“:

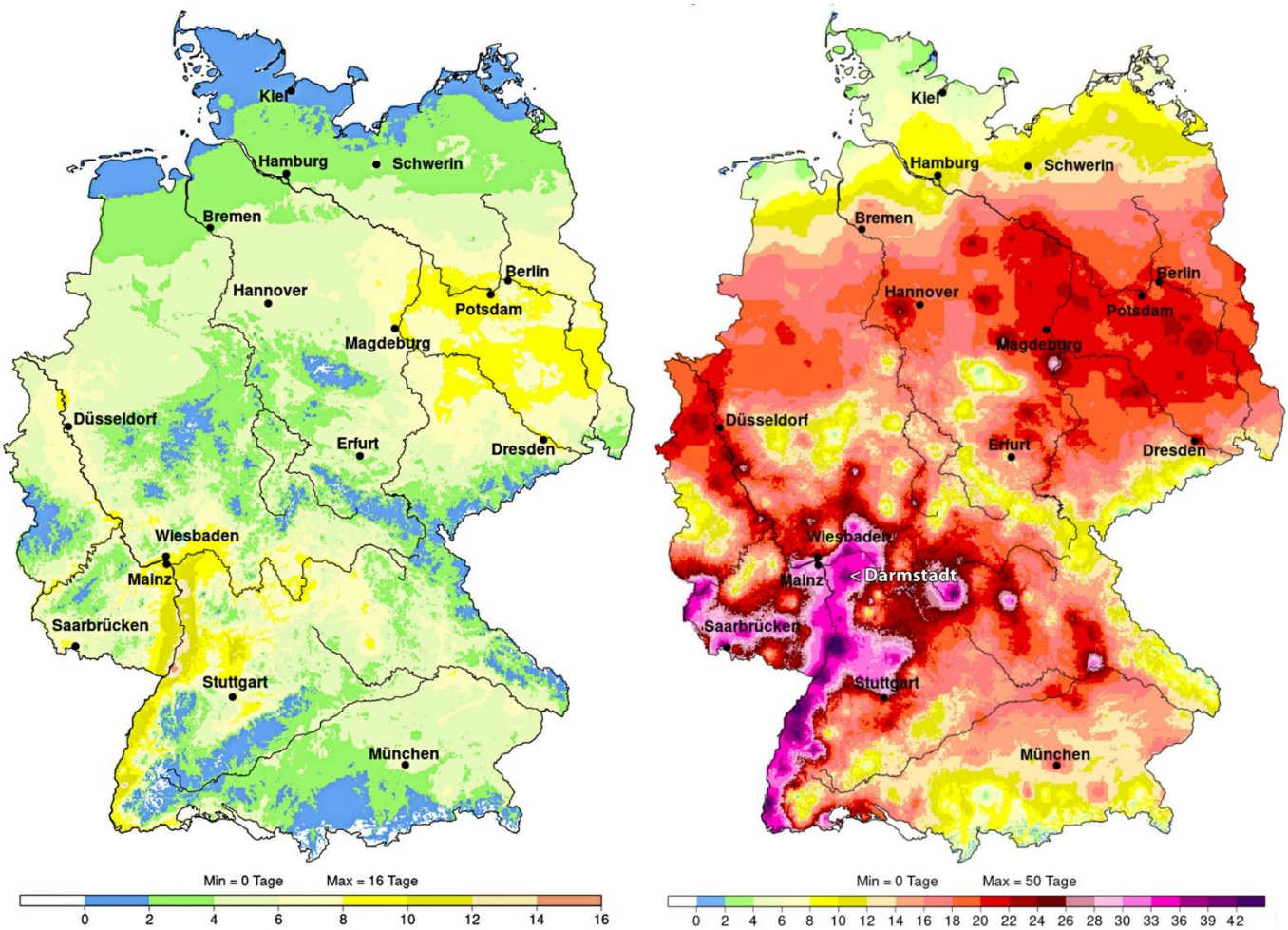


***Abb. 5**: Flächenhafte Darstellung der heißen Tage pro Jahr in Deutschland. Links die „Normalwerte“ als 30-jährige Mittelwerte für den Zeitraum 1971 bis 2000. Rechts (mit Hervorhebung von Darmstadt) die Absolutwerte für das Dürre-Jahr 2022 (Daten: DWD, Deutscher Klimaatlas).*

Wie Abb. 5 belegt, ist der Rheingraben unverkennbar ein hot-spot der Klimaentwicklung in Deutschland. Die Entwicklung hat inzwischen auch auf angrenzende Regionen ausgegriffen. Zeigt die Karte für den 30-Jahre Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 nur 10 bis 12 heiße Tage (Abb. 5 links), so signalisieren die grell violetten Töne in der 2022-er Karte schon 30 und mehr heiße Tage. Die Kette dunkelvioletter Flecken im hellvioletten Rheingraben markiert städtische Verdichtungsräume mit 36 und mehr heißen Tagen (als Maximalwert werden vom DWD 50 Tage angegeben): Diese Kette aufgeheizter Stadträume beginnt im Norden mit Frankfurt – noch als erstaunlich kleiner Fleck im Umfeld der kühlenden Taunushänge –, mit einem deutlich größeren tiefvioletten Fleck gefolgt vom sehr viel kleineren Darmstadt[16]. Es schließen sich nach Süden hin noch

[16] Das verweist auf die sehr ungünstige topografische Lage von Darmstadt im Vergleich zu benachbarten Städten wie Frankfurt, Wiesbaden oder Mainz. Insbesondere Wiesbaden profitiert von den Taunushängen, in dessen Tälern nächtliche Kaltluft entsteht, bis ins Zentrum der Stadt vordringen kann und dort für Kühlung sorgt (vgl. DWD / Heike Noppel, Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz, Juli 2017, insbes. S. 56-66, online: https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/249_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3). Demgegenüber hat Darmstadt eine sehr flache Topografie, in der Kaltluft kaum ‚fließt‘ und alsbald von Bebauung gestoppt wird. Das relevante Kaltluftentstehungsgebiet des Oberfeldes neigt sich in seinem hinteren Teil nach Osten und ist deshalb für die Stadt nicht relevant, der westliche Teil endet in

größere Aufheizungszentren an: der Großraum Mannheim-Ludwigshafen, Karlsruhe am Eck der französischen Grenze, das rechtsrheinische Vorfeld zum Großraum Straßburg (dort hatte bereits die Messstelle Kehl auffällig viele Tropennächte gemeldet – vgl. Anm. 26). Freiburg bildet eine aufgeheizte Bucht im Schwarzwaldrand und schließlich Weil am Rhein einen letzten Aufheizungsschwerpunkt innerhalb der deutschen Grenzen.

Die Forschungsarbeiten zum Klimawandel – auch der Monitoringbericht 2023 – halten sich auffällig zurück, wenn es um die Frage geht, wie diese besondere Aufheizung in bestimmten Regionen zu erklären sei. Die Gutachten beschränken sich auf die Darstellung des Phänomens, auf seine Modellierung und auf Prognosen, die auf der restriktiven Modellbasis berechnet werden. Doch echte Erklärungen – oder auch nur die *Frage* danach – sucht man vergeblich. Aus der globalen Zunahme an Treibhausgasen in der Atmosphäre sind diese Sonderentwicklungen jedenfalls nicht zu erklären.

Es drängt sich die Hypothese auf, dass die Veränderung der Landnutzung – bauliche Verdichtung, Versiegelung, Entwaldung, Trockenlegung von Feuchtgebieten, kanalisierter schneller Abfluss der Gewässer usw. – als Erklärungsansatz regionaler Überhitzungen herangezogen werden muss. Wir wissen (dazu mehr, sowie konkret für Darmstadt in Abschnitt 5) dass bauliche Verdichtung und Versiegelung zur Aufheizung von Stadträumen führt.

Diese Aufheizungseffekte betreffen aber nicht nur die Stadträume (diese in besonderem Maße), sondern auch die unbebaute Landschaft: Je mehr sie von Vegetation ‚befreit' ist, desto stärker zeigen sich Aufheizungseffekte. Eine Studie im südlichen Böhmen hat dies beispielhaft an einem kleinen, heterogen genutzten Geländeausschnitt veranschaulicht (Abb. 6[17]):

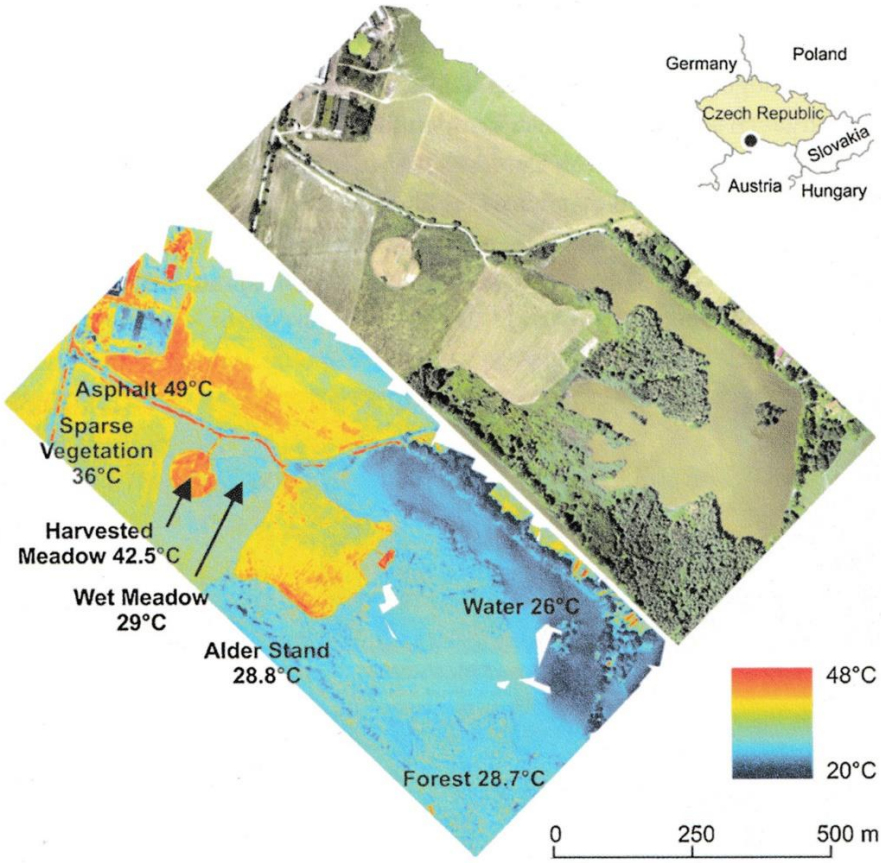


***Abb. 6**: Ein heterogen strukturierter Landschaftsausschnitt aus dem südlichen Böhmen mit Wald, Wasser, Landwirtschaft und Kleinsiedlung im Luft- und im Wärmebild.*

An einem heißen Tag ist die Temperatur in der dort erfassten kleinen Waldfläche mit 28,7 °C um rund 14 °C niedriger als auf dem kahlen Boden einer abgemähten Wiese (harvested meadow mit 42,5 °C). Unmittelbar neben dieser Wiesen-Kahlfläche liegt die Temperatur auf einer Feuchtwiese bei nur 29 °C. Der Asphalt der benachbarten Straße heizt sich hingegen auf 49 °C auf und auch der oberhalb der Straße sich anschließende abgeerntete Acker tendiert in den roten Bereich. Selbst bewachsenes Ackerland ist von solcher Aufheizung betroffen, wenn es sich etwa

einer Senke vor der Mathildenhöhe. Ansonsten gibt es ein großes Kaltluftentstehungsgebiet auf den Äckern nördlich von Arheilgen mit sehr schwacher Geländeneigung, so dass es allenfalls in Wixhausen für gewisse Kühlung sorgen kann.

[17] Petra Hesslerová et al., Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate, in: Ecological Engineering, Vol. 54, May 2013, S. 145-154, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.036, Abb. reproduziert aus: Scheub/ Schwarzer, Aufbäumen gegen die Dürre, S. 69.

um einen Maisacker mit seinem typischen kahlen Boden handelt, der durch Einsatz von Pestiziden all seiner agrartypischen bodendeckenden Kräuterflora beraubt ist[18].

Das was in Abb. 6 der Acker und die gemähte Wiese in winziger Dimension als Aufheizung anzeigen, skaliert sich auf den riesigen Agrarflächen Ostdeutschlands in eine gewaltige Dimension: Nach der Getreideernte zeigt sich dort bis zum Horizont nur noch kahler Boden. Keine Krautvegetation, keine Hecke, kein Wald und keine Wasserfläche sorgt für Kühlung. Über diesen Flächen saugt die aufsteigende aufgeheizte Luft jegliche Restfeuchte ab und transportiert sie davon. Im Ergebnis ist dann das Dürrebild nicht mehr verwunderlich, das sich im letzten Dezennium mit Schwerpunkt in Ostdeutschland ausgebildet hat (Abb. 1 und 5)

Es liegt also an der Vegetationsbedeckung, wenn sich Dürreregionen entwickeln, nicht an zu wenig Wasser. Die zentrale Frage lautet daher, wie die Wasserversorgung durch unsere Landnutzung gestört wird. Dazu muss der Blick auf die **Betrachtung des globalen Wasserkreislaufs** gerichtet werden: Dies ist nicht nur daraus begründet, dass Dürre und Aufheizung mit schwindend verfügbarem Wasser zu tun haben. Vielmehr sind die Wasserkreisläufe bzw. ihre Störung ein noch fundamentaleres Problem der Klimaentwicklung als die CO_2-Problematik. So lautet eine grundsätzliche Kritik am „Weltklimarat“ (IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change) [19]:

> *Der IPCC macht einen großen Fehler in seinen Berechnungen, weil seine Grundannahme ist, dass wir Menschen den Gehalt an Wasserdampf in der Atmosphäre nicht beeinflussen. Dabei denkt er nur an industrielle Anlagen, die Wasserdampf in die Luft blasen, aber nicht an die gewaltigen Landnutzungsänderungen, die den Wasserdampf-Gehalt in der Atmosphäre ändern. Die Frage ist nun, ob sich die Atmosphäre ausschließlich aufgrund des Treibhauseffekts erwärmt hat. Oder ob die heiße Luft, die deutlich vermehrt produziert wird, einen entscheidenden Einfluss hat. In der Nord-Hemisphäre bestehen 40 Prozent der Landoberfläche aus kultiviertem Land. In den USA sind 400.000 Quadratkilometer Feuchtgebiete trockengelegt worden, um sie in Äcker umzuwandeln. Damit wurde das Verhältnis von latenter zu sensibler Wärme und der Wasserdampf-Gehalt der Atmosphäre massiv verändert.*

Hinter dieser Kritik steckt ein komplexer Problembereich, der hier möglichst knapp aufgeschlüsselt werden soll:

4. Wasserkreislauf und Hitzeregulierung

Beginnen wir beim **globalen Wasserkreislauf**:

Auf die Frage „Woher kommt unser Regen?“ wird ein einigermaßen orientierter Mitteleuropäer antworten: vornehmlich aus Tiefdruckgebieten, die den überm Atlantik verdunsteten Wasserdampf in Wolken nach Osten in den eurasischen Kontinentalbereich transportieren und dort ausregnen. Die Kreislaufvorstellung

> Verdunstung über den Ozeanen ⇨ Wasserdampf-Transport aufs Land ⇨ Kondensation und Niederschlag ⇨ Rückfluss über die Gewässer zum Meer

steckt allenthalben in den Köpfen nicht nur von interessierten Normalbürgern, sondern auch von Wissenschaftlern. So veranschaulicht etwa die US-Fachbehörde USGS („United States Geological Survey“) noch immer dies Kreislaufmodell, Wikipedia reproduziert das Diagramm dieser Behörde (siehe Abb. 7). Die dicken blauen Pfeile suggerieren einen einfachen dominanten Kreislauf vom Meer zum Land und wieder zurück zum Meer. Die vielen anderen kleinen blauen Pfeile erscheinen hier eher untergeordnet oder verwirrend, werden jedenfalls kaum wahrgenommen:

---

[18] Messwerte bei Scheub/Schwarzer a.a.O. S. 70; vgl. auch „Klimanotstand“, S. 15: http://homersheimat.de/res/pdf/Klimanotstand_V2.pdf, mit dem Vergleich zweier unmittelbar nebeneinander liegender Schläge auf der Schwäbischen Alb: kahler Maisacker und dicht mit Segetal-Arten unterwachsener Linsenanbau.

[19] Ute Scheub/Stefan Schwarzer: Aufbäumen gegen die Dürre. Wie uns die Natur helfen kann, den Wassernotstand zu beenden. Oekom-Verlag München 2023; dort der Pflanzenphysiologe Jan Pokorny auf S. 126. Die unzureichende Perspektive des Weltklimarats ist als IPCC-FAQ 8.1 in deutscher Übersetzung auf der Website des Deutschen Klima-Forums nachzulesen: https://www.deutsches-klima-konsortium.de/klimafaq-8-1.html.

Abb. 7: *USGS-Diagramm zum Wasserkreislauf (deutsche Wikipedia-Version). Dominant erscheint der Kreislauf von Verdunstung über den Meeren, Transport des verdunsteten Wassers aufs Festland, Niederschlag und Rückfluss in die Meere per Oberflächen- und Grundwasserabfluss.*

Die Wissenschaft hatte lange Zeit große Probleme, die anteiligen Wassermengen in diesen Kreisläufen zu bemessen[20]. Erst in jüngerer Zeit wurde erkannt, dass dies Kreislaufmodell grundsätzlich modifiziert werden muss: Die Niederschläge über dem Festland speisen sich keineswegs vorrangig aus Verdunstung über den Ozeanen. Zum größeren Teil stammen sie aus Verdunstung *über Land*. Nach Abb. 8 sind es (global) nur 45.800 km³/a der über den Meeren verdampften Wassermengen (Evaporation), die nicht über den Ozeanen wieder abregnen, sondern aufs Festland transportiert werden. Hingegen stammen 71.800 km³/a oder 71 % der Niederschläge über Festland aus Verdunstung auf dem Festland selbst („Evapotranspiration" – in Abb. 7 ist diese nur mit einem winzigen Pfeil berücksichtigt) und regnen dort wieder ab. Abb. 8 quantifiziert diese verkoppelten und in sich geschlossenen drei Kreisläufe

Abb. 8*: Mengengerüst der drei geschlossenen Wasserkreisläufe auf und zwischen den Ozeanen und den Kontinenten (englische Beschriftung in der Quelle hier übersetzt).*

[20] Wegweisend zunächst: A. Baumgartner / E. Reichel, Die Weltwasserbilanz. Niederschlag, Verdunstung und Abfluß über Land und Meer sowie auf der Erde im Jahresdurchschnitt (en/de), Oldenburg-Verlag 1975. Der Studie gelingt es noch nicht, die Mengen in den Ozean- und Festlandkreisläufen schlüssig miteinander zu verbinden (vgl. insbes. die Tabellen 18 a bis c nebst Diagramm S. 16). Noch 1984 setzte ein Mitarbeiter der Bundesanstalt für Gewässerkunde die Daten aus Baumgartner et al. in ein Flussdiagramm um, das offensichtlich an einer zwischen Ozean und Festland numerisch nicht ausgeglichenen Wasserbilanz krankt: Hans-Jürgen Liebscher, Der Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen, in: Geowissenschaften in unserer Zeit, 2. Jahrg. 1984, Nr. 4, https://doi.org/10.2312/geowissenschaften.1984.2.130, dort Abb. 1.

- Meeresverdunstung ⇨ Niederschlag über dem Meer
- Verdunstung auf Land ⇨ Niederschlag über Land
- Ausgleich des Wasserdampftransports aufs Land durch Rückstrom über Gewässer und Grundwasser.[21].

Unser Wasserhaushalt ist also maßgeblich davon geprägt, dass über Land Wasser verdunstet und als Niederschlag über Land zurückkommt. Die Mächtigkeit dieses Kreislaufs über Land ist dabei vor allem von der Pflanzenbedeckung abhängig.

Dies schimmert bereits im zusammengesetzten Begriff der „**Evapotranspiration**" durch. Er enthält zum einen den Begriff **Evaporation**, worunter man die Verdunstung über offenen Flächen versteht (Wasser-, aber auch unbewachsene Landflächen). Die andre Begriffskomponente ist die **Transpiration**. Damit wird die Leistung von Pflanzen beschrieben, Wasser (weit unter dessen Siedepunkt) zu verdunsten. Die Pflanzen erledigen das vor allem über regulierbare Spaltöffnungen an den Blattunterseiten (stomatäre Transpiration). Das Ausmaß dieser Verdunstungsleistung ist von zahlreichen Umweltfaktoren abhängig: Standort der Pflanze (v.a. hinsichtlich der Wasserversorgung aus dem Boden), Luftfeuchtigkeit (wichtig für die Potentialdifferenz), Wind (der den produzierten Wasserdampf abführt), Temperatur (die die Transpirationsleistung regelt) usw.

Diese Verdunstungsaktivität ist für Pflanzen lebenswichtig, weil sie einen Unterdruck in der Pflanze erzeugt, durch den Wasser (und damit die im Wasser gelösten Nährstoffe) aus dem Boden gesaugt wird. Zugleich wird über die Stomata (Spaltöffnungen) CO_2 von der Pflanze aufgenommen, was sie für ihren Stoffwechsel via Photosynthese benötigt, um die für ihr Wachstum erforderlichen organischen Verbindungen (v.a. Kohlenhydrate) zu produzieren. Und zum dritten hat Transpiration eine energetische Dimension: Sie benötigt viel Energie bei der Umwandlung des aufgenommenen CO_2 und der Verdunstung des Wassers, die die Pflanze aus der Sonneneinstrahlung bezieht.[22]

Diese Sonnenenergie wird per Transpiration in „latente Energie" umgewandelt, die dort, wo sie auf die Erdoberfläche aufgetroffen ist, nicht mehr als Wärme (bzw. Aufheizung) wirksam werden kann, sondern sich im Wasserdampf ‚versteckt'. Der Wasserdampf steigt auf, kondensiert in der Atmosphäre zu Wolken und entlässt die gespeicherte latente Energie erst dort oben wieder als Wärme. Die Transpiration von Pflanzen hat also (abgesehen von ihrer Schattenwirkung) einen starken kühlenden Effekt auf der Erdoberfläche. Umgekehrt hat der Verlust von Pflanzenüberdeckung zur Folge, dass sich das betreffende Gelände stärker aufheizt.

Darin dürfte ganz wesentlich die Erklärung dafür liegen, dass bestimmte Gebiete – ganz Deutschland mit + 1,7 °C und Regionen wie die Rheinebene noch weit darüber – inzwischen sehr viel stärker aufgeheizt sind als der globale Durchschnitt. Denn hier manifestieren sich die Zerstörungen der Ökosysteme durch Versiegelung und Bebauung, Entwaldung, Industrialisierung der Landwirtschaft usw. und damit die Reduzierung der Transpirationsleistung der arg geschwundenen Pflanzenüberdeckung besonders stark.

Die Transpirationsleistung von Pflanzen ist schwer zu messen. Wohl auch deshalb blieb die Bedeutung dieses fundamentalen Vorgangs in unseren Ökosystemen in den Klimamodellen bislang unterschätzt bzw. unberücksichtigt. Inzwischen konnte man das Phänomen durch Messungen der Isotopenverhältnisse des im Wassermolekül gebundenen Sauerstoffatoms genauer eingrenzen: Es gibt die beiden Sauerstoffisotope O_{16} und O_{18}. Über offenen Flächen (Wasser, kahles Land) verdunstet das leichtere O_{16} schneller als das schwerere O_{18}. Ein höherer O_{16}-Anteil im Wasserdampf verweist daher auf Evaporation.

Die Transpiration, d.h. die Verdunstung von Wasser durch Pflanzen macht diesen Unterschied *nicht*: Pflanzen *„nehmen Wasser mit einem bestimmten Isotopenverhältnis auf und geben dieses unselektiert wieder ab".* Aus solchen Untersuchungen ließ sich die fundamentale Erkenntnis ableiten, dass *„die Transpiration mit 80*

---

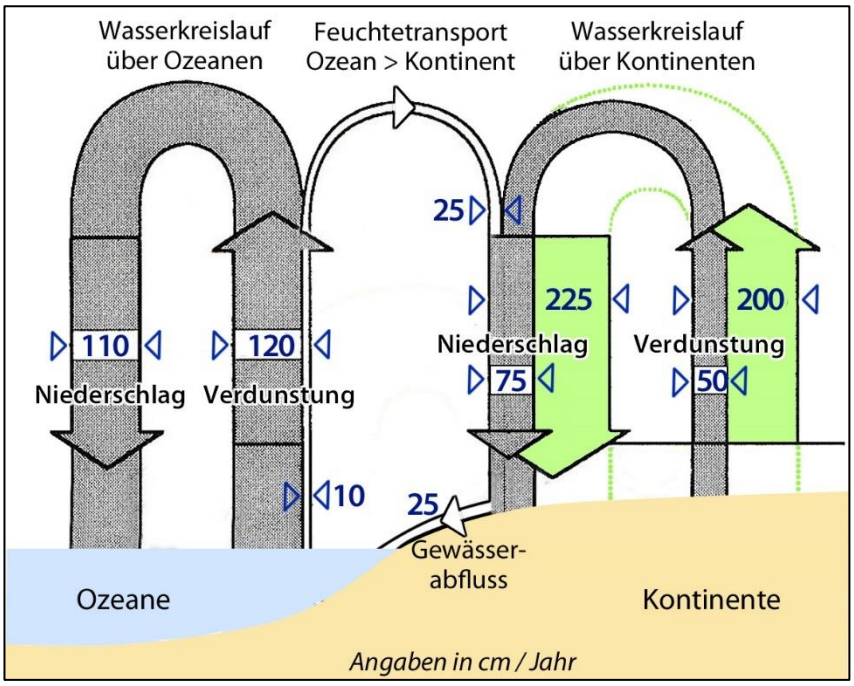
[21] Udo Schneider et al, Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), in: atmosphere 8/2017, issue 3 (03.03.2017), Fig. 11 / S. 14; https://www.mdpi.com/2073-4433/8/3. Eine Metastudie über 8 Quellstudien kam 2011 zu ähnlichen Mengen im globalen Wasserkreislauf: Kevin E. Trenberth et al, Atmospheric Moisture Transports from Ocean to Land and Global Energy Flows in Reanalyses, in: Journal of Climate, 15.09.2011, S. 4907 ff, dort: Fig. 9 / S. 13; https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/18/2011jcli4171.1.xml

[22] Vgl. die recht anschaulichen Darstellungen auf der vom Bundesforschungsministerium gehosteten Website https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/...: „Pflanzen schwitzen besser. US-amerikanische Forscher berechnen den globalen Anteil pflanzlicher Transpiration neu".

bis 90 Prozent der terrestrischen Evapotranspiration der bei weitem größte Wasserstrom aus den Kontinenten der Erde ist". Diese Wasserströme in der Atmosphäre sind wesentlich größer als die Gewässerströme vom Land ins Meer. Man spricht daher auch von „fliegenden Flüssen". Daraus folgt die Forderung nach einer grundsätzlichen Korrektur in den Klimamodellen, mit denen der menschengemachte Klimawandel beschrieben werden soll: *„Die Dominanz der Transpirationsströme bei der kontinentalen Evapotranspiration legt nahe, dass bei der Entwicklung von Klimamodellen … Verbesserungen bei der Simulation biologischer Ströme gegenüber physikalischen (Verdunstungs-)Strömen Vorrang haben sollten".*[23]

Im Grunde sind diese Erkenntnisse gar nicht so neu, sie wurden nur vom Mainstream der Klimaforschung nicht angemessen erkannt oder gar ignoriert. Bereits 2000 erschien ein Werk russischer Wissenschaftler um Victor Gorshkov, die interdisziplinär zwischen theoretischer Physik und Pflanzenökologie dem fundamentalen Einfluss pflanzlicher Transpiration auf das Klima auf den Grund gegangen sind[24]. Sie haben u. a. ermittelt, in welcher Spannbreite der Wasserkreislauf über Land durch Pflanzenbedeckung variieren kann. Abb. 9 modifiziert Fig. 6.7 in der Quelle durch die Art der Darstellung und die Eindeutschung der Beschriftung. Das Verständnis wird vielleicht ein wenig durch den gewählten Parameter erschwert: Dargestellt sind die Wasser-(Dampf-)Ströme in cm/Jahr, dies bezogen auf Niederschlag bzw. Verdunstung. Da die Weltmeere ungefähr die 2,5-fache Fläche der Landmassen einnehmen, entsprechen 10 cm/a Verdunstung über Meer, die mit Wolken aufs Land transportiert wird, einem dortigen Niederschlag von ungefähr 25 cm/a.

***Abb. 9**: Biotische Auswirkungen auf den Wasserkreislauf. Grau sind (mengenproportional) die beiden Kreisläufe von Verdunstung und Niederschlag über den Ozeanen bzw. über den Kontinenten dargestellt (globale Durchschnittswerte). Die beiden Kreisläufe sind über den Feuchtetransport vom Meer ins Land (entspricht 10 cm Verdunstung über Meer und 25 cm Niederschlag über Land) sowie den Rückfluss über Gewässer ins Meer miteinander verkoppelt. Diese Austauschbeziehungen zwischen Meer und Land sind ausgeglichen.*



Mit breiteren grünen Pfeilen ist in Abb. 9 hervorgehoben, welche Auswirkungen eine vollständige Umwandlung der auf die Erde treffenden Sonnenenergie in Wasserdampf durch (pflanzliche) Transpiration hätte (verbunden mit der dabei frei werdenden enormen Kühlleistung!): Die Verdunstung über Land steigt auf das Vierfache und liefert entsprechende Niederschläge, die sich allein aus der Verdunstung über Land auf 2.000 mm/a belaufen. Das ist keineswegs nur ein theoretisches Modell. Vielmehr beschreibt diese in Abb. 9 grün hervorgehobene Kreislaufvariante sehr gut die Situation auf dem südamerikanischen Kontinent mit seinen ausgedehnten Wäldern, deren Verdunstung die Wolken speist, die sich auf diese Wälder wieder abregnen, was diesen Regionen mit mächtigen geschlossenen Wasserkreisläufen den Namen „Regenwald" gegeben hat.

---

[23] Jasechko, S. et al. (2013): Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. In: Nature Earth and Environmental Sciences, nature 496 vom 3.4.2013, S. 347-350. DOI: 10.1038/nature11983 bzw. https://www.nature.com/search?q=Terrestrial+water+fluxes+&journal=

[24] Victor G. Gorshkov et al, a.a.O. (FN 1)

Man muss allerdings festhalten: hier wird ein *vergangener* Zustand der Regenwälder modelliert. Denn die massiven Rodungen im Amazonasgebiet haben inzwischen dazu geführt, dass der Wasserkreislauf über Land in Südamerika erheblich gestört ist (was auch massive globale Folgen hat). Über die Einzelheiten informiert die sorgfältig recherchierte und aufwändig produzierte **Arte-Dokumentation** „Die fliegenden Flüsse des Amazonas“ aus dem Jahr 2021, die wesentlich auf der Arbeit der zitierten russischen Wissenschaftler um Victor Gorshkov basiert[25].

Diese Studie fasst zusammen (S. 174 f – Quellenreferenzen ausgelassen):

> *In unberührten, von menschlichen Aktivitäten unberührten Wäldern werden bis zu 90 % der einfallenden Sonnenenergie vom Laub abgefangen und für die Transpiration verwendet, während dieser Wert in vom Menschen veränderten Kulturland 40 % nicht übersteigt. Somit dürfte die menschliche Beeinflussung der natürlichen Waldgesellschaften während der gesamten Menschheitsgeschichte die Verdunstungskraft der Vegetation im globalen Maßstab nahezu halbiert haben. Dies könnte zu erheblichen Änderungen des Zirkulationsregimes der Luftmassen in der Atmosphäre und zu einer erheblichen Verringerung der Niederschläge an Land führen, d. h. eine völlige Umstrukturierung des Feuchtigkeitsregimes auf großen Kontinentalflächen zur Folge haben und den Prozess der Wüstenbildung verstärken.*

Gorshkov et al. weisen nach, dass intakte Ökosysteme auch die CO_2-Anreicherung in der Atmosphäre locker ausgleichen könnten, die seit der Industrialisierung durch die Verbrennung fossiler Ressourcen produziert wurden – wenn diese Ökosysteme nicht so gravierend durch den Menschen geschädigt würden (Abb. 9a).

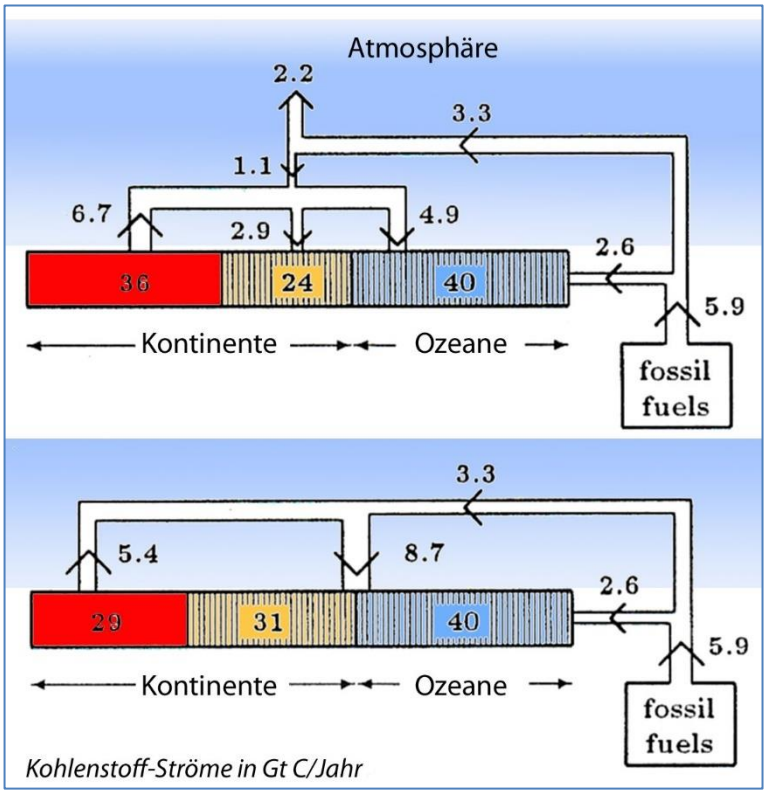


Abb. 9a[26]*: Oben der aktuelle Belastungszustand der globalen Biota: Die Ozeane und Teile der Landflächen werden noch als weitestgehend ungestört angesehen (schraffierte Flächen) während die Biota auf den Kontinenten zum größeren Teil bereits anthropogen ge- oder zerstört sind (rote Flächen). Die weißen Pfeilflächen bezeichnen die globalen Kohlenstoffkreisläufe, die aus der Förderung fossiler Energien hervorgehen, in Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr.*

Unten wird ein Zustand beschrieben, in dem die Biota in der Lage sind, die aktuell in die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffmengen von 2,2 Gt C/a in den Biota der Landmassen zu binden, wenn die anthropogen gestörten Flächen der Natur zurückgegeben würden. Dieser Gleichgewichtszustand würde bei ‚nur‘ 29 % Schädigung der globalen Biota (statt heute 36 %) erreichbar sein.

Aktuell geht allerdings die Zerstörung der kontinentalen Biota weiter (und ergreift auch zunehmend die Ozeane), so dass sich der Anteil gestörter Biota immer mehr vergrößert – und damit auch die CO_2-Emissionen in die Atmosphäre mit ihrer Treibhauswirkung.

Die Anstrengungen, CO_2-Emissionen zu reduzieren bzw. CO_2 technologisch der Atmosphäre zu entziehen, sind also zum einen der fragwürdigere Ansatz (vgl. hiesigen Abschnitt 2), grundsätzlich aber auch zum Scheitern verurteilt, falls der Raubbau an den Ökosystemen nicht gestoppt wird. Denn wenn die Regulierungskraft

[25] Die Dokumentation ist nicht mehr über die Arte-Mediathek verfügbar. Sie kann über diesen Cloud-Link abgerufen werden: https://magentacloud.de/s/S72KERKRAidB7xJ

[26] Gorshkov et al., a.a.O., Kapitel 6.5 mit Teilen aus Figure 6.6 (hier modifiziert und koloriert)

der Ökosysteme so sehr beschädigt wird, wie dies aktuell passiert, wird ein Systemzustand zerstört, der über Milliarden von Jahren auf der Erde – bei sehr viel stärkeren klimarelevanten Veränderungen als heute – die Bedingungen für Leben garantiert hat. Gorshkov et al. nennen dies auf dem Spiel stehende System „**Biotische Regulation**“.

Auf den Erhalt bzw. die Wiederherstellung natürlicher Ökosysteme müssen sich also die Anstrengungen konzentrieren, wenn dem Klimawandel entgegengewirkt werden soll. Die riesigen, aber bislang vergeblichen Investitionen in CO_2-Emissionsminderung haben auf die wahrnehmbaren Bedingungen des heutigen menschlichen Lebens keinen Einfluss, weil ihre Wirkung vielleicht in fernerer Zukunft eintreten könnte. Sie kosten aber enorme Ressourcen. Das ist wohl auch der Hintergrund für eine sich verbreitende Skepsis in der Bevölkerung, dass der Focus aktueller Klimapolitik an den Problemen vorbeigeht und im Extrem als „Klimalüge“ eingeordnet wird.

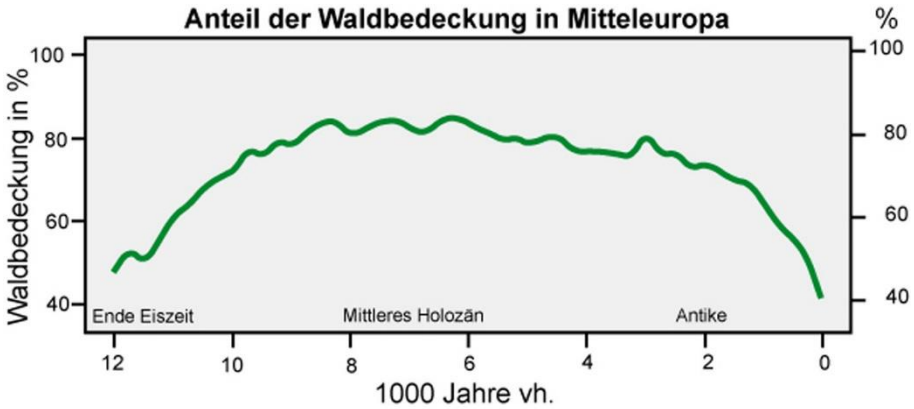


***Abb. 10**: Exponentiell abnehmende Waldbedeckung seit der Antike.*

Hingegen würden die Aufgabe der Waldbewirtschaftung zwecks Rückführung der Wälder in einen natürlichen stabilen Zustand, die Ausweitung intakter Ökosysteme und die Durchgrünung der aufgeheizten Städte usw. schneller wahrnehmbare Effekte erzielen, auf die es letztlich den unter dem Klimawandel leidenden Menschen ankommt und für die sie „mitgenommen“ werden können.

Zu korrigieren ist aber eine Entwicklung, die nicht erst seit der Industrialisierung eingetreten ist (wie das die aktuelle Klimapolitik in den Vordergrund stellt), sondern die die gesamte Menschheitsgeschichte durchzieht. Das macht die Entwicklung der Waldbedeckung deutlich (Abb. 10[27]): Seit der „neolithischen Revolution“ mit ihrer Rodung von Wäldern durch sesshaft werdende Bauern im mittleren Holozän (geologisch die Nacheiszeit ab 11.700 vor heute) geht die Waldbedeckung zurück. Dieser Rückgang steigert sich seit der Antike und hat heute im Zuge einer exponentiellen Entwicklung in Mitteleuropa den Tiefstwert von nur noch 40 % Waldüberdeckung erreicht. Das ist ungefähr jene Schwelle, an der Gershkov et al. den Kipppunkt sehen, ab dem die Regulationskraft der in Milliarden von Jahren bewährten Biota nicht mehr greift.

Gegenläufig exponentiell lief die Zunahme der Weltbevölkerung (Abb. 11[28]). Zwischen beidem besteht ein ursächlicher Zusammenhang.

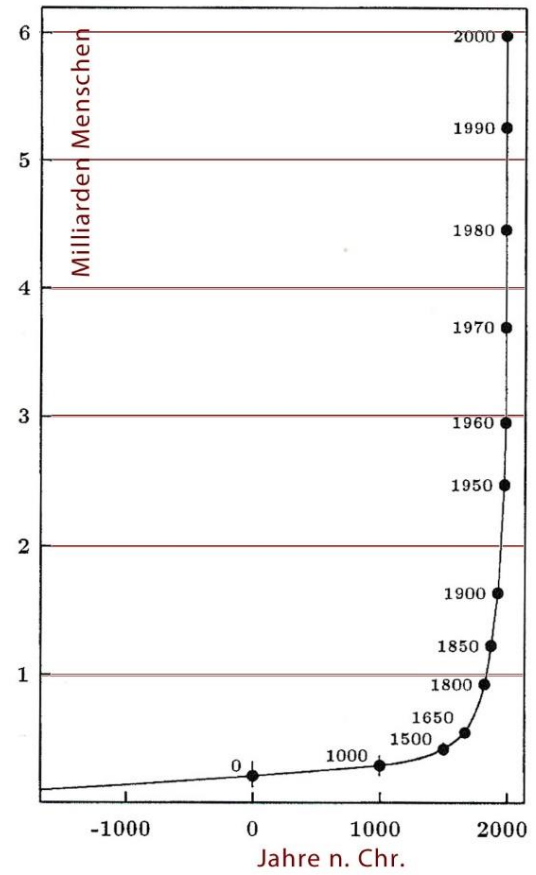


***Abb. 11**: Exponentieller Zuwachs der Menschheit*

[27] Wälder im Klimawandel: Europa, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wälder_im_Klimawandel:_Europa

[28] Gershkov et al., Figure 1.2, hier mit deutscher Beschriftung

5. Tropennächte als Stadtklimaindikator

Der globale Temperaturanstieg im Vergleich zum Beginn der Industrialisierung beträgt (wie in Abschnitt 1 gezeigt) aktuell 1,1 °C. In Deutschland liegt er allerdings bereits bei 1,7 %, in den besonderen Aufheizungsregionen wie der Rheinebene noch höher (dazu gibt es keine regionalen Daten). Und wenn in einer solchen Region eine stark versiegelte und bebaute Stadt liegt, hebt sich deren Temperaturniveau noch einmal vom großräumig bereits aufgeheizten regionalen Umfeld ab.

Neben heißen Tagen (Höchsttemperatur ≥ 30 °C) und Sommertagen (Höchsttemperatur ≥ 25 °C) gibt es hierzulande noch einen dritten Indikator für belastende Hitze: die „**Tropennächte**“. Der Begriff erfasst Nächte, in denen die Temperatur in der Nacht nicht unter 20 °C absinkt. In den Tropen selbst ist dieser Begriff nicht gebräuchlich, da dieser nächtliche Temperaturlevel dort eher für einen Normalzustand steht. Der ist jedoch in intakten tropischen Ökosystemen (Regenwald) selbst unter der dortigen intensiven direkten Sonneneinstrahlung erheblich gedämpft: Die Kühlleistung der Wälder durch Evapotranspiration erzeugt einen so niedrigen Temperaturlevel, dass großräumig Luft vom wärmeren Ozean ins kühlere Landesinnere strömt. Im gedämpften Klima unter dem kühlenden Blätterdach des Regenwaldes gibt es zwar „Tropennächte“, aber kaum „Sommertage“ und keine „heißen Tage“. Abb. 12 zeigt die Lufttemperaturverläufe im Tieflandregenwald des Pasoh Forest Reserve in Malaysia in 53 m Höhe (über den Baumkronen), auf Bodenniveau (0 m) sowie im Oberboden (-0,05 m)[29].

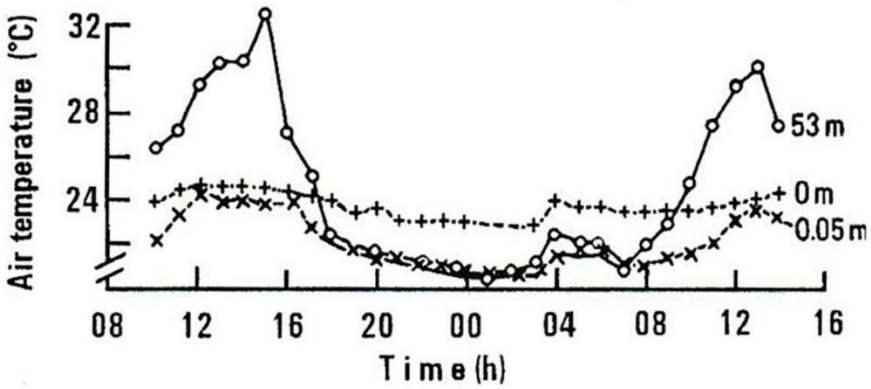


***Abb. 12**: Tagestemperaturverläufe im tropischen Regenwald über und unter dem Kronendach*

Wir hingegen in unseren aufgeheizten und durch keine Baumvegetation geschützten Stadträumen erleiden die heißen Tage und erfahren nachts keine Kühlung, wenn eine Tropennacht folgt. Diese Kombination von starker Hitze tags und fehlender Abkühlung nachts ist insbesondere für alte und körperlich geschwächte Menschen eine erhebliche bis tödliche Belastung.

Für Stadtbewohner sind heiße Nächte, in denen das Umfeld dichter Baumassen und versiegelter Flächen nicht abkühlen will, kein unbekanntes Phänomen. Umso mehr erstaunt die Einordnung durch den Deutschen Wetterdienst (DWD), nach der Tropennächte in unserem Umfeld eine absolute Rarität sein sollen [30]:

> *Tropennächte sind in Deutschland sehr selten. An den meisten DWD-Stationen gibt es im Mittel weniger als eine Tropennacht pro Jahr. An einzelnen sehr günstig gelegenen Stationen werden durchschnittlich 2 bis 3 jährliche Tropennächte registriert. In Jahren mit sehr heißen Sommern wie 2003 wurden an begünstigten Stationen allerdings über 10 Tropennächte beobachtet. So gab es 2003 in Kehl bei Straßburg 21 Tropennächte [31].*

---

[29] Gorshkov et al. a.a.O., Figure 6.8

[30] https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussel/tropennaechte.html

[31] Eine Wetterstation „Kehl“ ist in der DWD-Wetterstationen-Datenbank nicht enthalten. Im Web werden Daten zu dieser Station unter der Bezeichnung „Kehl-Odelshofen“ von Meteostat angeboten („Meteostat ist einer der größten Anbieter von offenen Wetter- und Klimadaten. Die Plattform bietet Zugang zu langjährigen Zeitreihen von Tausenden von Wetterstationen“). Unter https://meteostat.net/de/station/D2546?t=2023-11-28/2023-12-05 finden sich auch Lokalisierungsangaben. Abgestimmt mit den von Google Earth unterstützten Geodaten findet sich als Standort der Station ein Container innerhalb einer Wiese, diese umschlossen von dem eher dörflichen Kehl-Stadtteil Odelshofen. Die Station liegt also nicht in einem baulich übermäßig verdichteten Bereich, obwohl sie erstaunliche Hitzedaten liefert.

In der Tat ergibt die Auswertung der DWD-Wetterdaten für 2023 – global das heißeste Jahr seit Beginn der Messungen, das in Darmstadt aber milder ausfiel –, dass in diesem Jahr an der Messstation Darmstadt keine einzige Tropennacht gemessen wurde. Der höchste, also wärmste nächtliche Minimaltemperaturwert wurde dort am 20.06.2023 mit 18,3 °C erfasst. Wenn von Stadtbewohnern an einem solchen Tag dennoch eine zu heiße Nacht wahrgenommen wird, handelt es sich um die Wahrnehmung des Aufheizungseffektes bebauter und versiegelter Stadtgebiete abseits der Messstation.

Lässt sich dieser Effekt für Darmstadt genauer abgrenzen?

Die DWD-Wetterstationen sind in der Regel in Gebieten angeordnet, an denen der besondere Aufheizungseffekt von Siedlungsgebieten nicht oder nur mäßig wirksam ist. Die Darmstädter DWD-Station befindet sich seit 1996 am nordwestlichen Rand des Oberfeldes südlich der Dieburger Straße in einem bebauungsnahen Grünbereich (vgl. Abb. 13) Sie ist klimatisch vor allem durch das Oberfeld geprägt, das als Kaltluftentstehungsgebiet gilt, aus dem nachts, der Geländeneigung folgend, kühlende Luft nach Westen in Richtung Stadt abströmt.

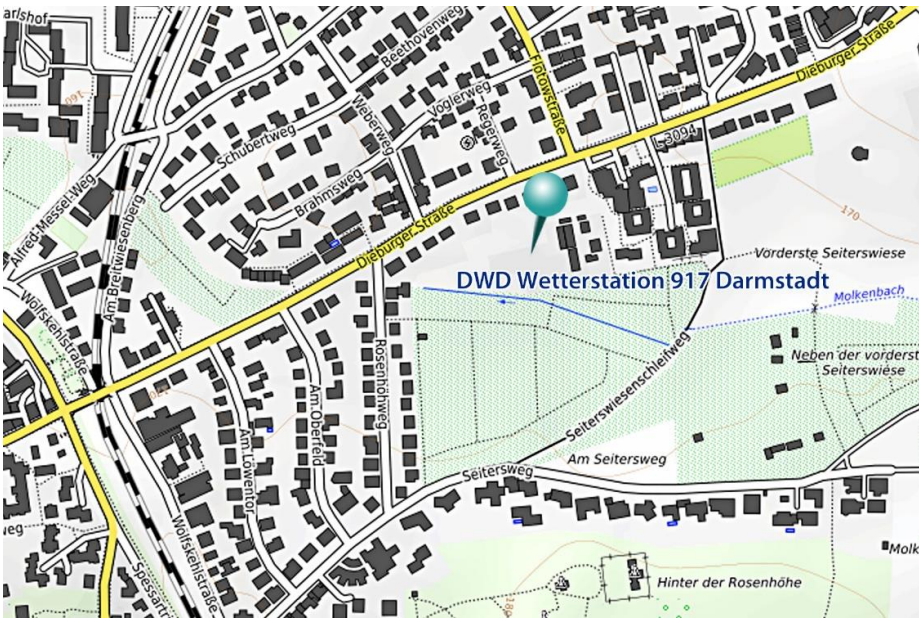


***Abb. 13**: Lage der DWD-Wetterstation Darmstadt am nordöstlichen Rand des Oberfeldes in einer Grünanlage südlich der Dieburger Straße.*

Diese Durchlüftung kommt aber alsbald vor der dichten innerstädtischen Bebauung zum Stillstand (vgl. blaue Pfeile in Abb. 14).

Die Aufheizung von Stadtgebieten wurde im Darmstädter Klimagutachten von 2016 vor allem in einer „Klimafunktionskarte“ anschaulich dargestellt. Einfärbungen von Stadtbereichen in Gelb (= „Überwärmungspotential“) bis tiefrot (= „Starke Überwärmung“) illustrieren das Aufheizungsproblem. Der nachfolgende Kartenausschnitt (Abb. 5) zwischen den Gleisanlagen am Hauptbahnhof im Westen (entlang der Bahnanlagen durchlüfteter hellgelber kühlerer Bereich) und dem Kaltluftentstehungsgebiet des Oberfeldes im Osten (kühler blauer Bereich) entspricht jenem Stadtplanausschnitt, in dem nachfolgend (Abb. 15) noch die Messpunkte zum Klimagutachten lokalisiert werden sollen:

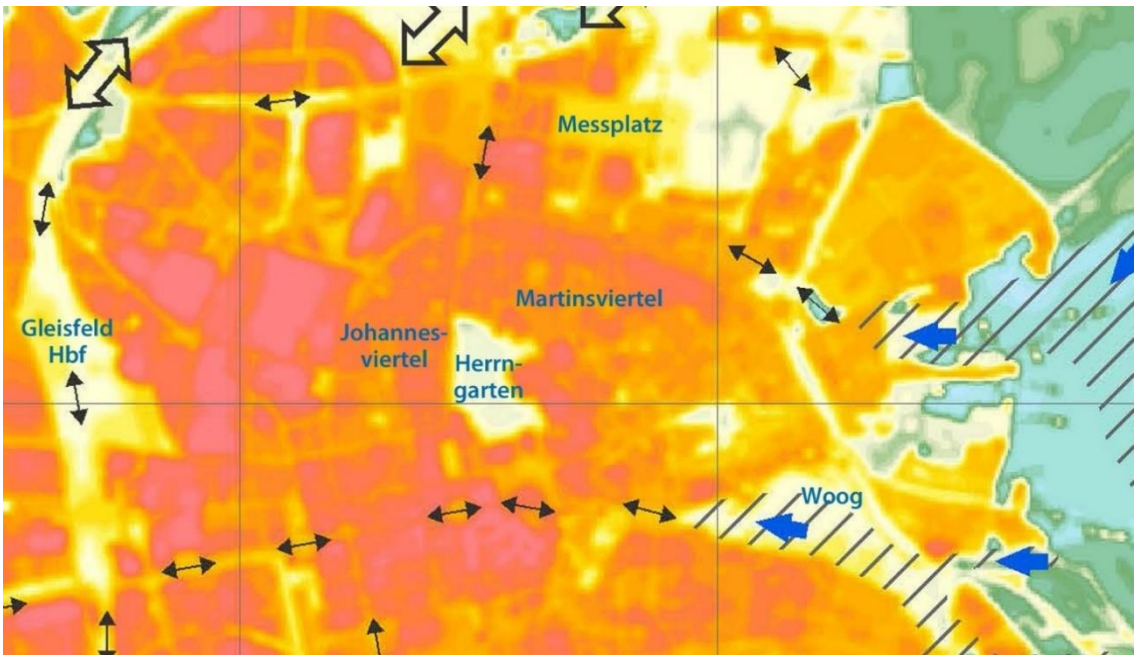


***Abb. 14**: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte*

Darmstadt von 2016. In der Bildmitte ist gut der Herrngarten als nur mild erwärmte Fläche zu erkennen, umgeben von stark aufgeheizten Gebieten der Kernstadt. Blaue Pfeile stehen für Kaltluftzuflüsse, die aber alsbald an der städtischen Bebauung enden. Weitere Pfeile zeigen Durchlüftungsbahnen – stark eingeschränkt entlang von Straßen und Bahntrassen.

Beim Erwärmungsbild der Klimafunktionskarte in Abb. 14 handelt es sich um die Darstellung von Modellrechnungen. Es wäre viel zu aufwändig, jeden Farbpunkt durch eine Messung nachzuweisen. Reale Messdaten wurden vorrangig zur Kalibrierung dieses Modells herangezogen. Nachstehend die wenigen realen Messpunkte des Klimagutachtens auf dem Stadtplan der Kernstadt[32]:

***Abb. 15**: Lokalisierung von Messpunkten zum Klimagutachten 2016, soweit Werte dieser Messpunkte im nachfolgenden Temperaturdiagramm (Abb. 16) verwendet werden. Gleicher Ausschnitt wie der zur Klimafunktionskarte oben. Ergänzt wurde die Lage der Darmstädter Messstation des Deutschen Wetterdienstes DWD (türkiser Pin in der rechten Bildmitte am nordwestlichen Rand des Oberfeldes). Zur Nummerierung der Messorte vgl. Fußnote 33.*

Zu Lufttemperaturdaten wurde vom Darmstädter Klimagutachten lediglich ein Diagramm veröffentlicht, das Temperaturverläufe für den heißen 11. Juli 2016 nebst der vorangehenden und der nachfolgenden Nacht zeigt[33]:

---

[32] Die Erläuterungen zu den Messungen sind karg (Klimagutachten 2016, S. 32), die grafische Darstellung der Messorte im Gutachten (dortige Abb. 14) ist zudem schwer mit dem Messwertediagramm des Klimagutachtens 2016 (dortige Abb. 16 / hiesige Abb. 16) in Einklang zu bringen. Die Messpunkte wurden deshalb in hiesiger Abb. 15 auf der Grundlage des amtlichen Stadtplans neu lokalisiert und um die Lage der DWD-Messstation ergänzt.

[33] Zur detaillierteren Erläuterung des Diagramms: Die Daten der vier Messstellen, an denen kontinuierlich erfasst wurde, sind im Temperaturdiagramm der Abb. 16 als Kurven dargestellt. Die Standorte dieser Messstellen sind auf dem Stadtplan der Abb. 6 mit lila Pins und den Nummern 1 bis 4 markiert. Die Nummer 1 betrifft allerdings Daten, die nicht im Rahmen des Gutachtens erhoben wurden, sondern von der HLNUG (Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) stammen, die im Park der Rudolf-Müller-Anlage unterhalb des Großen Woogs ihre Darmstädter Messstelle für meteorologische und Immissionsdaten betreibt. An dieser Messstelle wirkt sich der kühlende Effekt einer Grünanlage aus, während die temporären Messstellen des Klimagutachtens an der Bleichstraße (Höhe Grafenstraße, Nr. 3) und auf dem tegut-Parkplatz neben dem Müllheizkraftwerk (Nr. 2) für stark versiegelte und sich entsprechend aufheizende innerstädtische Areale stehen.
Die temporäre Klimagutachten-Messstelle 4 auf dem Oberfeld repräsentiert hingegen einen offenen Standort mit geringer Einwirkung durch die sich aufheizenden Stadt. Dennoch liegen deren Messwerte über denen der DWD-Messstelle, die näher an sich aufheizenden Baumassen gelegen ist. Das ist eine Inplausibilität in den Klimagutachtensdaten, die sich nicht erklärt.

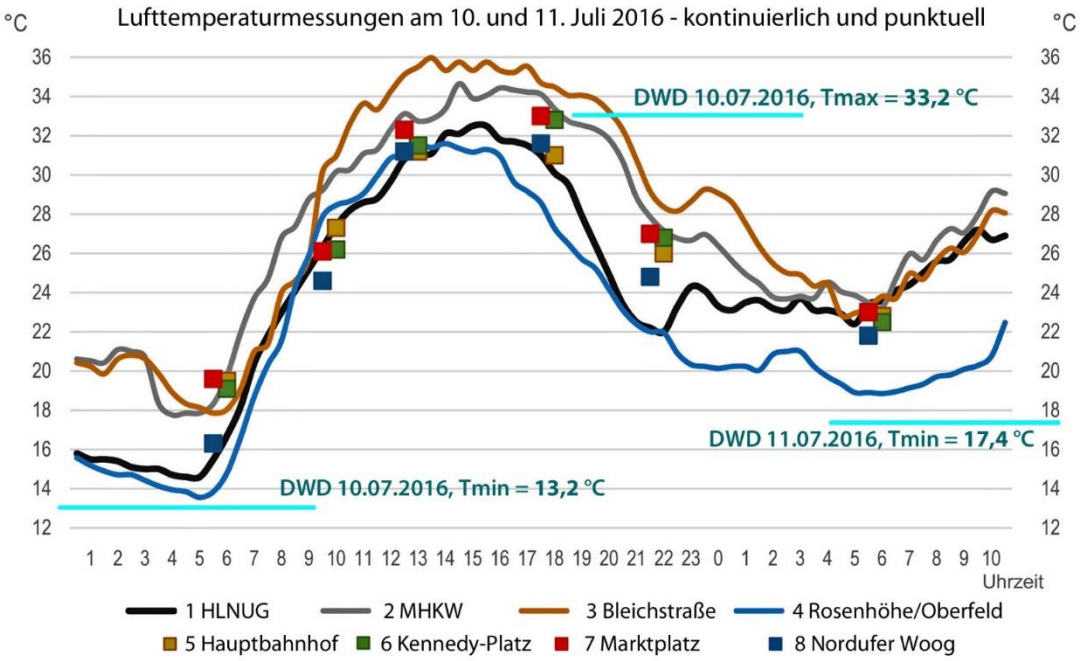


***Abb. 16**: Modifizierte Abb. 16 des Klimagutachtens 2016: kontinuierliche Messungen an den Standorten 1 bis 4, Einzelmessungen zu sechs Zeitpunkten an den Standorten 5 bis 8. Ergänzt sind drei Messwerte der DWD-Station Darmstadt im Klimagutachten-Messzeitraum vom 10. bis 11.07.2016 [34] (türkise Level).*

Am heißen **10. Juli 2016** stiegen die Temperaturen bis auf 36 °C an der innerstädtischen Bleichstraße und fielen in der folgenden Nacht nicht unter 23 °C ab, die erst gegen 5 Uhr morgens erreicht wurden. Selbst die HLNUG-Messstelle in der Grünanlage vor dem Woog maß in der insgesamt aufgeheizten Stadt nur ein Grad weniger. Im Vergleich zu den in Abb. 7 eingefügten Daten der DWD-Messstelle ergibt sich, dass das Stadtgebiet in der auf den heißen Tag folgenden Nacht immer noch um gut 5 Grad stärker aufgeheizt blieb als das nahe Umland.

An der am Stadtrand gelegen (vgl. Abb. 13) DWD-Station 917 gemessene Tagesminima von ≥ 15 °C sind also ein Anhaltspunkt, um in der aufgeheizten Stadt eine Tropennacht mit Temperaturen ≥ 20 °C zu erwarten. Filtert man die DWD-Daten für Darmstadt im eher milden Jahr 2023 nach Sommertagen (≥ 25 °C Höchsttemperatur) und ≥ 15 °C Tagestiefsttemperatur, so werden 23 Tage ausgeworfen, an denen im versiegelten und bebauten Darmstadt mit Tropennächten zu rechnen war. Abb. 17 stellt 21 dieser Tage dar (aus Darstellungsgründen sind zwei weitere aus dem Sommerabschnitt herausfallende Filtertreffer vom 17.09. und 13.10.2023 weggelassen).

Es fallen zwei Belastungscluster auf: Die in eine lange Dürreperiode eingebettete Hitzephase im Juni und die lange und schwüle Hitzephase im August. Tropennächte sind also nur „selten“, wenn man außerhalb bebauter Ortslagen misst (wie es der DWD systematisch tut). Im verdichteten Stadtraum Darmstadts waren sie selbst im milden Jahr 2023 keineswegs selten, sondern haben die Menschen erheblich belastet.

Im Temperaturdiagramm der Abb. 7 sind vier weitere Messorte mit den Nummern 5 bis 8 eingetragen, an denen zu sechs über den Tag verteilten Zeitpunkten ergänzende Messungen durchgeführt wurden. Sie repräsentieren eine Messstrecke von West nach Ost quer durch die Stadt hindurch (vgl. Stadtplan in Abb. 15), beginnend in der Grünanlage vor dem Hauptbahnhof und endend am Nordufer des Großen Woogs. Deren Daten bestätigen die kontinuierlich erhobenen Werte der anderen Stationen.

[34] Daten aus der DWD Wetterdatenbank: https://server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl?action=showStationComplete&stationId=917

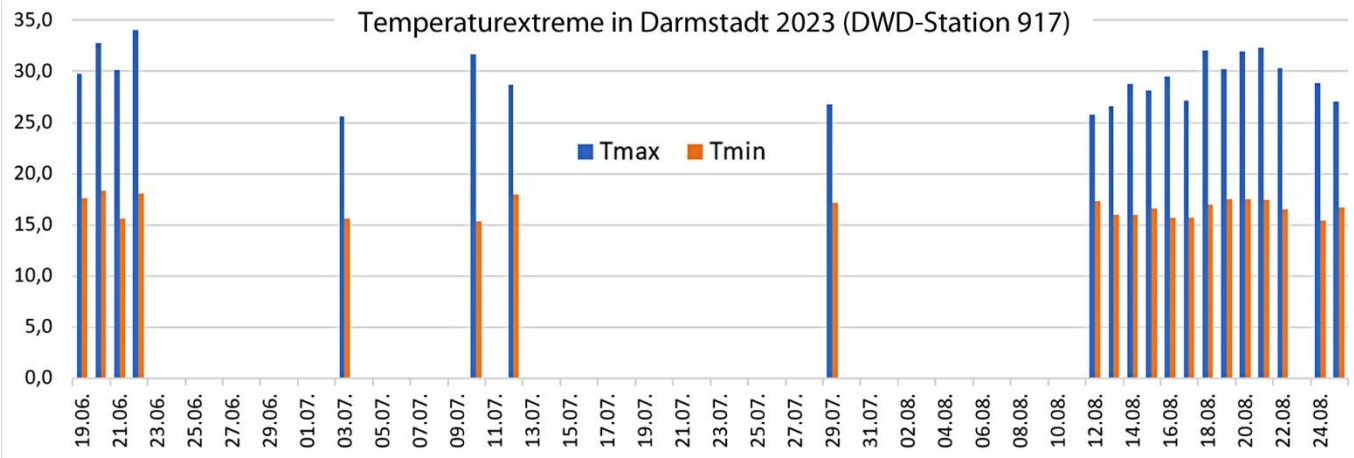


***Abb. 17**: DWD-Temperaturdaten (Messstation am Oberfeld) für 2023, gefiltert nach Tmax ≥ 25 °C und Tmin ≥ 15 °C. Tage mit solchen Tmin-Werten sind Kandidaten für Tropennächte im benachbarten aufgeheizten Stadtgebiet.*

6. Konsequenzen

Greifen wir noch einmal die Arbeit von Gorshkov et al. auf (S. 339), deren Abschätzung des Kipppunktes, auf den wir rasant hinsteuern, dahin zuzuspitzen ist, dass *„die moderne Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs und die Ansammlung von CO_2 in der Atmosphäre gestoppt werden kann, selbst wenn die moderne Verbrennungsrate fossiler Brennstoffe unverändert bleibt, wenn die moderne Waldnutzung weltweit um etwa 40 % reduziert und natürliche Wälder auf zuvor ausgebeuteten Gebieten wiederhergestellt würden“* (vgl. noch einmal Abb. 9a).

Entscheidend wird also die Beendigung all jener Prozesse sein, die die Ökosysteme schädigen und beseitigen, sowie die Eröffnung von Räumen, in denen natürliche Ökosysteme sich wieder entfalten können. Dies wird nicht ohne eine Reduzierung der Weltbevölkerung möglich sein, weil diese bereits zu einer Überinanspruchnahme der Ökosysteme geführt hat, die von der in Milliarden von Jahren bewährten „biotischen Regulierung“ nicht mehr eingefangen werden kann. In hochentwickelten Ökonomien wie der unseren regelt sich die Bevölkerungsabnahme (abgesehen von deren migrantischer Überkompensation) inzwischen ein wenig von selbst, in Nachholökonomien hatten bislang nur China und Indien an dieser ‚Stellschraube‘ zu drehen versucht. All das bleibt aber bislang unzureichend.

Wenn auch nicht von Gorshkov et al. konzipiert, so könnte die Initiative der Europäischen Union zum „**Nature Restoration Law**“ ein Impuls in die richtige Richtung sein[35]. Dies am 17.06.2024 beschlossene „Gesetz“ hat den Rechtscharakter einer „Verordnung“, die sich „die Wiederherstellung der Natur“ zum Ziel setzt. Eine EU-Verordnung hat – im Gegensatz zu den meist erlassenen „Richtlinien“, die erst einmal durch langwierige und meist komplizierende nationale Rechtssetzung in den Mitgliedsstatten umgesetzt werden müssen –, unmittelbare Rechtswirkung. Natürlich leidet auch diese Verordnung unter EU-üblichen Bürokratiewucherungen. Ehe ihre Ziele auf ca. 20 Seiten in Artikelform gegossen werden, komplizieren 78 vorangestellte „Erwägungsgründe“ die Umsetzung. Und ein 51-seitiger Anhang differenziert hunderte von zu rekonstruierenden Biotopen in einer Kleinteiligkeit, die sich womöglich administrativ kaum bewältigen lässt. Bezogen auf diese Biotoptypen sind die Ziele anspruchsvoll (Artikel 4, Abs. 1):

> *Die Mitgliedstaaten ergreifen die Wiederherstellungsmaßnahmen, die erforderlich sind, um die in Anhang I aufgeführten Lebensraumtypen, die sich nicht in einem guten Zustand befinden, in einen guten Zustand zu versetzen. Solche Maßnahmen werden bis 2030 auf mindestens 30 %, bis 2040 auf mindestens 60 % und bis 2050 auf mindestens 90 % der Flächen jeder in Anhang I aufgeführten Gruppe von Lebensraumtypen (wie im nationalen Wiederherstellungsplan gemäß Artikel 12 quantifiziert) ergriffen, die sich nicht in gutem Zustand befinden.*

[35] Website zum Projekt: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-law_en#documents

Die Quantifizierung der betroffenen Flächen ist allerdings noch in nationalen Wiederherstellungsplänen zu erarbeiten, so dass aktuell nicht zu beurteilen ist, ob die zitierte Gorshkov-Vorgabe erreicht werden kann.

Etwas konkreter sind die Vorgaben der Verordnung für **Stadträume**, die mit ihrer Verdichtung und Versiegelung die Aufheizung vorantreiben. Dazu heißt es in **Artikel 6 „Wiederherstellung städtischer Ökosysteme“**:

(1) *Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass bis 2030 in allen Städten sowie kleineren Städten und Vororten kein Nettoverlust an städtischer Grünfläche und städtischer Baumüberschirmung gegenüber 2021 zu verzeichnen ist.*

(2) *Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die nationale Gesamtfläche städtischer Grünflächen in Städten sowie kleineren Städten und Vororten bis 2040 um mindestens 3 % und bis 2050 um mindestens 5 % gegenüber 2021 vergrößert wird. Darüber hinaus stellen die Mitgliedstaaten Folgendes sicher:*

   a) *mindestens 10 % städtische Baumüberschirmung in allen Städten sowie kleineren Städten und Vororten bis 2050; und*

   b) *Nettogewinn an städtischer Grünfläche, die in allen Städten sowie kleineren Städten und Vororten in bestehende und neue Gebäude sowie Infrastrukturentwicklungen integriert wird, auch durch Renovierung und Erneuerung.*

In Sachen „Nettoverlust seit 2021“ (Art. 6, Absatz 1) hätte die Stadt Darmstadt noch einiges nachzuholen. Allein im Konversionsgebiet des Ludwigshöhviertels bewirkt die gerade laufende dichte Bebauung einen Flächenverlust an Wald und waldähnlichen Flächen von gut 0,8 ha[36]. Im Bürgerpark soll nördlich der Kastanienallee der Grünraum um einen See herum mit knapp 50 Wohnhäusern bebaut und damit eine wichtige Grünfläche mit stadtklimatischer Bedeutung versiegelt werden[37]. usw. usf.

Zu Absatz 2 in Artikel 6: Städtische Grünanlagen machten im Jahr 2020 in Darmstadt 343 ha aus, was gut 11 % der Siedlungsflächen umfasst[38]. Eine Ausweitung dieser Grünflächen um nur 3 % müsste zur Ausweisung zusätzlicher Grünflächen von gut 10 ha führen. Klimapolitisch kämen dafür vor allem Flächen in Frage, die im stark verdichteten baulichen Umfeld liegen und deren Bepflanzung mit Bäumen lokale Kühleffekte bewirken könnte. Das meint etwa den **Marienplatz**, für den aktuell noch immer eine dichte, also klimatisch kontraproduktive Bebauung geplant ist, der aber nur 1,4 ha Fläche umfasst[39]. Mehr Fläche würde der **Messplatz** bringen, der sich auf 3,9 ha erstreckt[40]. Zur Erfüllung des 3 %-Ziels wären aber Flächen in dieser Größenordnung noch einmal zusätzlich aufzubieten.

Zu Artikel 6, Absatz 2 a: Zur Baumüberschirmung der nicht überbauten Flächen im Siedlungsbereich der Stadt Darmstadt gibt es keine Daten. Man kennt und liebt zwar Straßen, die in der Vegetationszeit von Alleebäumen gut beschattet werden, wie z.B. den Rhönring, doch bereits im angrenzenden gründerzeitlichen Quartier finden sich straßenbegleitende und -beschattende Bäume nur vereinzelt. In diesem Quartier soll nun das Barcelona-Konzept der „Superblocks“ implementiert werden. Es wurde inzwischen zwar abgespeckt, aber auch in seiner Ursprungsversion folgte es allein verkehrspolitischen Zielen[41]. Die Idee aus Barcelona zielte aber auf *„ein komplexes Ökosystem, in dem der öffentliche Raum … eine tiefgreifende Transformation erlebt: Grün ersetzt Grau, Freizeitangebote verdrängen Verkehrsstress und Stau, Schatten vermeidet Überhitzung“*[42].

---

[36] Bebauungsplan S 26 „Ludwigshöhviertel“, Umweltbericht (§ 2a BauGB) und Umweltprüfung (§ 2 Abs. 4 BauGB), S. 98 f (Tabelle 31)

[37] Vorhabenbezogener Bebauungsplan N 8.4.4; Magistratsvorlage 2022/0291 zum Satzungsbeschluss nebst Anlagen.

[38] Datenreport 2021, https://www.darmstadt.de/fileadmin/Bilder-Rubriken/Standort/Statistik_und_Stadtforschung/pdf/jahrbuch/01Klima/K01-2-3.pdf

[39] Bebauungsplan M 34 - Marienplatz – Begründung (§ 2a BauGB), 06. Februar 2023, Ziff. 1 „Ziel und Zweck der Planaufstellung, Planerfordernis“

[40] Vorhabenbezogener Bebauungsplan N 85 – Messplatz – Ziel und Zweck der Planung, Vorentwurf September 2021.

[41] Vgl. die Magistratsvorlage 2023/0353 im Parlamentssystem

[42] https://www.baunetz-campus.de/news/stadterneuerung-im-netzwerk-der-barcelona-superblock

Der stadtklimatische Aspekt der Straßenraumumgestaltung durch Schaffung von Verschattung und Kühlung durch Bäume ist im Darmstädter „Superblock“-Konzept bislang kein Thema.

***Abb. 18**: Anders als in den (vergleichbaren) Straßenbaum-armen Gründerzeitvierteln von Darmstadt werden in Barcelona die Straßenräume mit kühlenden und verschattenden Bäumen aufgefüllt (Google Earth-Satellitenbild).*

7. Slow water!

Was aber tun, wenn die Ökosysteme derart geschädigt sind, dass es in Dürrephasen an Wasser fehlt, die Pflanzen nicht mehr transpirieren, die Vegetation deshalb vertrocknet und die Nadelbäume sich nicht mehr gegen Schädlingsbefall (Borkenkäfer) wehren können, so dass ihre Bestände großflächig absterben?

Die wesentliche Antwort lautet immer wieder: „slow water“. Auf jede erdenkliche Weise muss der Abfluss des Niederschlagswassers verlangsamt, das Wasser so weit wie möglich zurückgehalten werden[43], damit durchfeuchtete Böden den Pflanzen Nachschub zur Transpiration und damit zur Erbringung ihrer Kühlleistung liefern können.

In den Städten bedeutet das vor allem Entsiegelung und Versickerung statt Ableitung über Kanäle, Rückhaltung in Zisternen zur Bewässerung der Stadtbäume und begrünten Fassaden in Dürrephasen, Verschattung versiegelter (Verkehrs-)Flächen durch Bäume, um Verdunstungsverluste auf den aufgeheizten Flächen zu vermeiden.

Auf steilen Hängen bedeutet das die Anlage von Gräben entlang der Höhenlinien („keyline-design“[44]), um das Wasser auch bei Starkregen im Gelände zu halten, wo es in den Gräben allmählich versickert.

Auf dem Land bedeutet das eine andere Bewirtschaftung der Agrarflächen, die den schnellen Abfluss von Niederschlägen verhindert (Negativbeispiel ‚Maisacker‘ – siehe Fußnote 18): die Gliederung der Landschaft durch Hecken und Bäume bis hin zu Agroforstkulturen, die am effektivsten Wasser binden und den Nutzpflanzen zwischen den Baumreihen Schatten und Feuchte geben. Auf der wegweisenden Weltausstellung „Floriade“ im niederländischen Almere wurde dies Agroforstkonzept ambitioniert präsentiert (Abb. 19).

Die Autoren des bereits empfohlenen Buches „Aufbäumen gegen die Dürre“ enden mit persönlichen Visionen, die sich auf die besonders dürregeschädigten, aktuell ausgeräumten Agrarregionen Ostdeutschlands richten:

> *Ich erinnere mich, wie es hier früher aussah: endlose Monokulturen an Mais, Raps und Getreide, die Hunderte, manchmal sogar Tausende Hektar umfassten. Jetzt ist alles viel kleinteiliger strukturiert: Wiesen, Wäldchen, langgestreckte Hecken oder Äcker, auf denen zwischen Bäumen Getreide gedeiht, kleine und größere Bäche, die wieder fließen…*
>
> *Die Biber gaben den Anstoß für 30 Bauersfamilien, sich in einer Genossenschaft zusammenzuschließen, um ihre Landnutzung gemeinschaftlich zu planen: »Wie und mit welchen Methoden halten wir das Wasser in der Landschaft? Welches Gelände eignet sich als Tierweide, welches für Ackerkulturen? Wo können*

---

[43] Scheub/Schwarzer, Aufbäumen gegen die Dürre, a.a.O., S. 61 ff – unbedingt lesenswert, wie auch das gesamte Buch!

[44] vgl. z.B. Wikipedia mit weiteren Nachweisen; Aktivitäten im Biosphärenreservat Rhön (https://www.biosphaerenreservat-rhoen.de/natur/projekte-im-bereich-natur/keyline-design-wasser-in-der-landschaft-halten) und viele andere ähnliche Ansätze.

wir am besten Bäume pflanzen? Wir denken alle und alles zusammen: Feld-Wald-Wiese-Wasser-Tier-Mensch. Daraus sind integrierte Klimalandschaften entstanden…

Früher haben sie viel mehr Tiere gehabt, in Massenställen, gefüttert mit importiertem Soja und industriell angebautem hiesigem Weizen. Heute leben ihre Viecher draußen und suchen sich ihr Futter selbst - Kühe auf Weiden, deren Zäune im »Mobgrazing«-Verfahren täglich versetzt würden, Hühner, die ein paar Tage später den Kühen folgten, Schweine in Eichenwäldern. Durch die Tiere hat sich auch die Fruchtbarkeit der Böden deutlich verbessert. »Dieselben Flächen dienen abwechselnd als Weide und Acker. Wir profitieren fortlaufend von den wertvollen Ausscheidungen der Tiere.«…

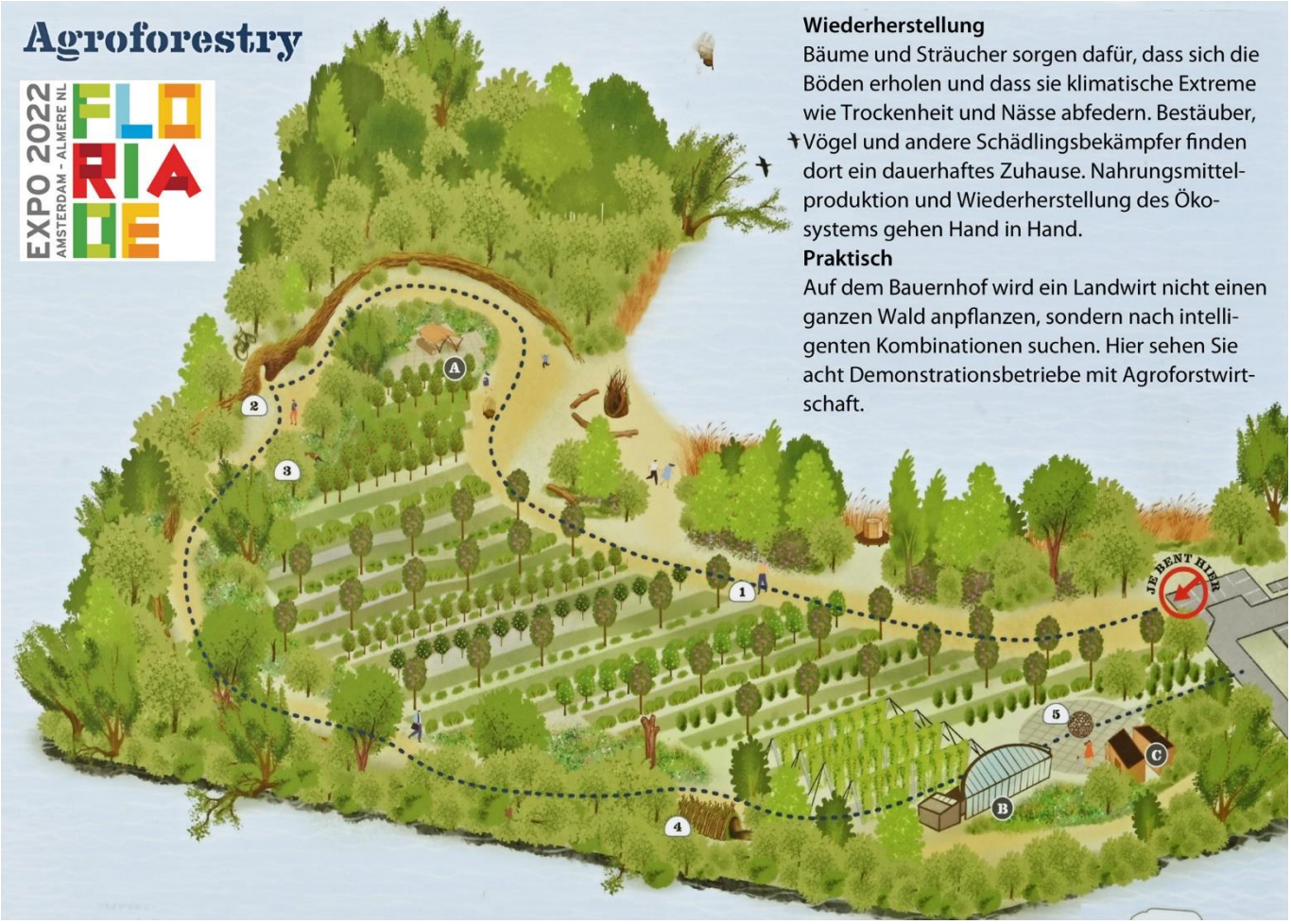


***Abb. 19**: Wegweiser zu den Agroforstkulturen auf der Floriade in Almere 2022*

So ganz nebenbei ist diese Vision auch ein Plädoyer für eine der Landschaft und den natürlichen Kreisläufen angepasste Tierhaltung, deren puristischer Ausschluss kontraproduktiv ist: Das Grünland der Weidetiere ist in seinem Humus ein wertvoller CO_2-Speicher, der durch Abgrasen und den Dünger der Tier-Ausscheidungen sein Potential erweitert. Nicht ohne Grund fordern die Richtlinien des strengsten Demeter-Ökosiegels, dass solche Höfe Tierhaltung betreiben müssen[45] (wie es auch die beiden Demeterhöfe in Darmstadt – auf dem Oberfeld und im Griesheimer Sand – tun).

In Darmstadt hat man die slow-water-Strategie noch nicht verstanden. Die mit der Ausgestaltung und Präsentation eines Wasserprogramms beauftragte Marketing-Agentur hat „slow-water“ in das phonetisch ähnliche und wohl für ‚cool‘ gehaltene „schlaue Wasser“ übersetzt (ausnahmsweise mal kein Anglizismus – und schon geht’s schief). Wasser ist auch unter der Ägide einer modisch aufs Digitale abfahrenden Verwaltung

[45] Abschnitt 7.4 der Demeter-Richtlinien https://www.demeter.de/media/5262/download?inline

niemals „schlau“. Es ist rar (weil kanalisiert), verschmutzt, mal zu viel (Starkregen), mal zu wenig (Dürre) – und kostbar. Das „Schlaues Wasser“-Programm (es wurde inzwischen aus finanziellen Gründen eingestellt[46]) überformt die essentielle Klimaanpassungsstrategie von „slow water“ mit „smartem“ Firlefanz (Abb. 20). Der zeigt sich auch in Details:

***Abb. 20**: elektronische Leiterbahnen statt Wasserflüssen im Logo – Darmstadts Umsetzung von „slow water“ in „schlaues Wasser“.*

Für Darmstadts „smartwater“-Strategie hat das Amt für Wirtschaftsförderung und Stadtentwicklung (eine bemerkenswerte Zuständigkeitszuordnung) zusammen mit der Marketing-Firma „City & Bits GmbH“ eine unzureichende Problemdarstellung formuliert[47]:

> *Grünflächen sind wesentlich für das Klima und die Lebensqualität in der Stadt. Stadtbäume sind für das innerstädtische Klima besonders wichtig. Indem sie Schatten spenden und durch Verdunstung die Luftfeuchtigkeit erhöhen, verbessern sie das Mikroklima.*

In Zeiten, in denen es tags schwül-heiß und nachts tropisch warm ist, wird ein hitzegeplagter Stadtbewohner einen Beitrag von Bäumen zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit (und damit der Schwüle) nicht gerade als Gewinn ansehen. In der auf ‚smart‘ getrimmten Darmstädter Strategie bleibt hingegen die essentielle Kühlleistung von Bäumen an dieser Stelle unerwähnt und auch sonst ein marginaler Aspekt. Immerhin sind – siehe Abschnitt 5 – in Darmstadt mindestens 5 ° Temperaturdifferenz gegenüber dem bereits überheizten Umland in der Rheinebene auszugleichen. Es gibt Beispiele aus anderen Städten, dass dies möglich ist[48].

Ein gutes Darmstädter Beispiel für die gebotene Rückhaltung von Niederschlagswasser durch Versickerung ist der **Kanal**, der unter der innerstädtischen **Schuchardstraße** auf das Luisencenter zuläuft. Er ist bei Starkregen hin und wieder überlastet und entlud seine Wasserfracht schon mehrfach ins Einkaufszentrum. Abhilfe denkt sich das städtische Tiefbauamt durch einen neuen Entlastungskanal quer über den Luisenplatz, der dort im aufwändigen Tunnelvortrieb gebaut werden soll. Das ist riskant, könnte den ÖPNV empfindlich stören, wird vor allem superteuer, hat aber keinerlei ökologischen Nutzen. Die wegen der komplizierten Verhältnisse auf dem Luisenplatz und im Boden darunter in immer höhere Millionensphären kletternden Kosten wären vermeidbar, wenn man den in Abb. 21 blau eingezeichneten Bypasskanal in der Mühlstraße ergänzen würde, über den ein Teil der Wassermassen ums Luisencenter herumgelenkt werden könnte. Doch das wäre nur eine absolut konventionelle Lösung, immerhin einfacher und billiger.

Problembewusster wären hingegen Anstrengungen, das im Einzugsbereich dieses Kanals anfallende Niederschlagswasser vor Ort zu versickern bzw. in Zisternen zu puffern und auf diese Weise erst gar nicht bis zum Luisencenter heranzuführen. Das ist im stark verdichteten Kernraum der Stadt zweifellos eine Herausforderung – doch technische Lösungen gibt es auch für solch stark versiegelte Areale. Und im Nebeneffekt könnte der Grundwasserpegel unter der Stadt durch Versickerung angehoben werden, der hier fatal tief abgesunken ist. Diese Grundwasserabsenkung unter der verdichteten Stadt, in der aktuell kaum ein Tropfen versickert, geht dann auch zu Lasten des Westwaldes, der im fehlenden Grundwasserabstrom Richtung Rhein an Wassermangel leidet (Grundwasser-Flurabstände von 10 bis über 30 m!).

---

[46] Darmstädter Echo vom 05.02.2024 : „Projekt „Schlaues Wasser“ fällt dem Sparhaushalt zum Opfer“, https://www.echo-online.de/lokales/darmstadt/sparhaushalt-darmstadt-ende-des-projekts-schlaues-wasser-3268374

[47] https://smartwater.darmstadt.de/uploads/2023/06/Schlaues_Wasser_Strategie.pdf

[48] Scheub/Schwarzer, Aufbäumen gegen die Dürre, a.a.O., S. 219 ff

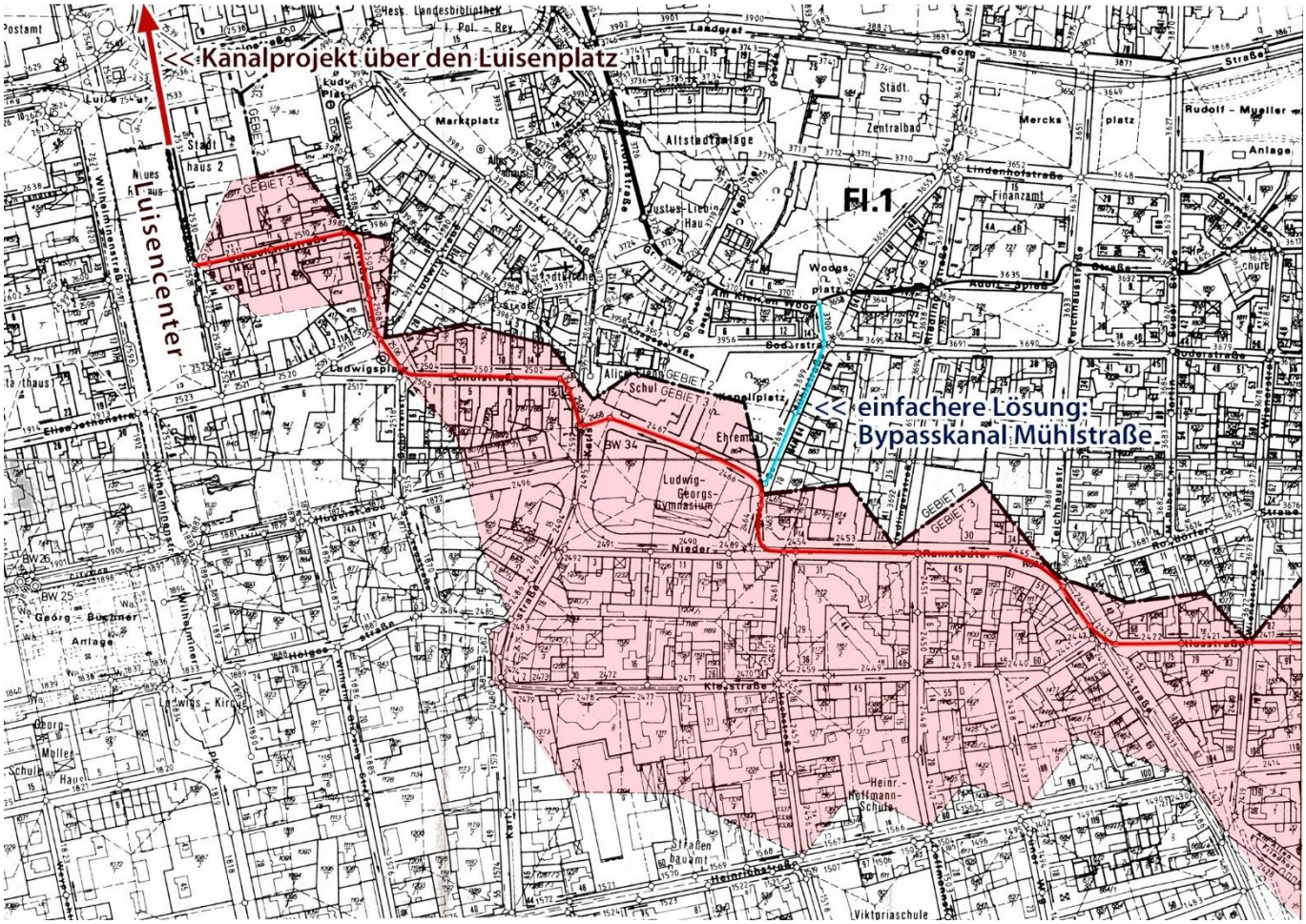


***Abb. 21**: Der Schuchardstraßenkanal (rot) endet vor dem Luisencenter (links oben) in einem Düker. Sein Einzugsbereich (rötliche Fläche) reicht östlich (nach rechts) noch weit über den abgebildeten Kanalplan-Ausschnitt hinaus. Der bei Starkregen überlastete Kanal soll durch ein neues Kanalprojekt über den Luisenplatz entlastet werden (links ganz oben), obwohl eine wesentlich einfachere und kostengünstigere Lösung in einem Bypass entlang der Mühlstraße möglich wäre (Bildmitte blau). Klimapolitisch angezeigt wäre allerdings, möglichst viel Niederschlagswasser im Einzugsbereich des Kanals zu versickern bzw. in Zisternen zu speichern.*

Wald benötigt nicht zwingend einen Grundwasseranschluss. In einem intakten Ökosystem funktioniert es auch ohne, wie Abb. 22 zeigt. In einem alten Buchen-/Eichenbestand im nordhessischen Bergland wurden drei Jahre lang alle Parameter des Wasserhaushalts gemessen[49]. Das erste Jahr (Vegetationsperiode von April 1981 bis März 1982) war feucht, die beiden Folgejahre etwas trockener (vgl. die Niederschlagswerte zu ‚N' in Abb. 22). Interessant ist hier die „**potentielle Transpiration**" (die nur rechnerisch aus anderen Parametern ermittelt werden kann). Sie gibt an, wieviel Wasser die Pflanzen (hier Bäume) verdunsten *könnten*, wenn ihnen genügend Wassernachschub aus dem Boden zur Verfügung stünde. Wir sehen in Abb. 22, dass die Transpiration der Bäume nie auf Null absank, in den beiden Trockenjahren jedoch erhebliche Transpirationsdefizite entstanden (rote Flächen der potentiellen Transpiration). Der Wald konnte daher in den Sommermonaten nicht seine maximale Kühlleistung erbringen, hat dann aber in den nachfolgenden Wintermonaten (ohne Transpiration der entlaubten Bäume) seinen Betrag zur Grundwasseranreicherung geleistet.

Bei Stadtbäumen mit ihren fast immer zu kleinen Baumscheiben dürfte die erforderliche Versorgung mit Niederschlagswasser deutlich enger ausfallen. Entsprechend steigt die Differenz zwischen potentieller und aktueller (tatsächlicher) Transpiration. Gerade in den heißen Monaten ist diese Transpirationsleistung aber gewünscht, um den Stadtraum wirksam zu kühlen. Deshalb muss das erforderliche Wasser in den Wurzelraum

[49] Hans Ernstberger, Einfluss der Landnutzung auf Verdunstung und Wasserbilanz (Dissertation). Verlag Beiträge zur Hydrologie – Kirchzarten 1988.

aktiv nachgespeist werden. Da sich der Einsatz von Trinkwasser verbietet, sind Zisternen erforderlich, die diese sommerlichen Wassergaben aus niederschlagsreichen Monaten puffern.

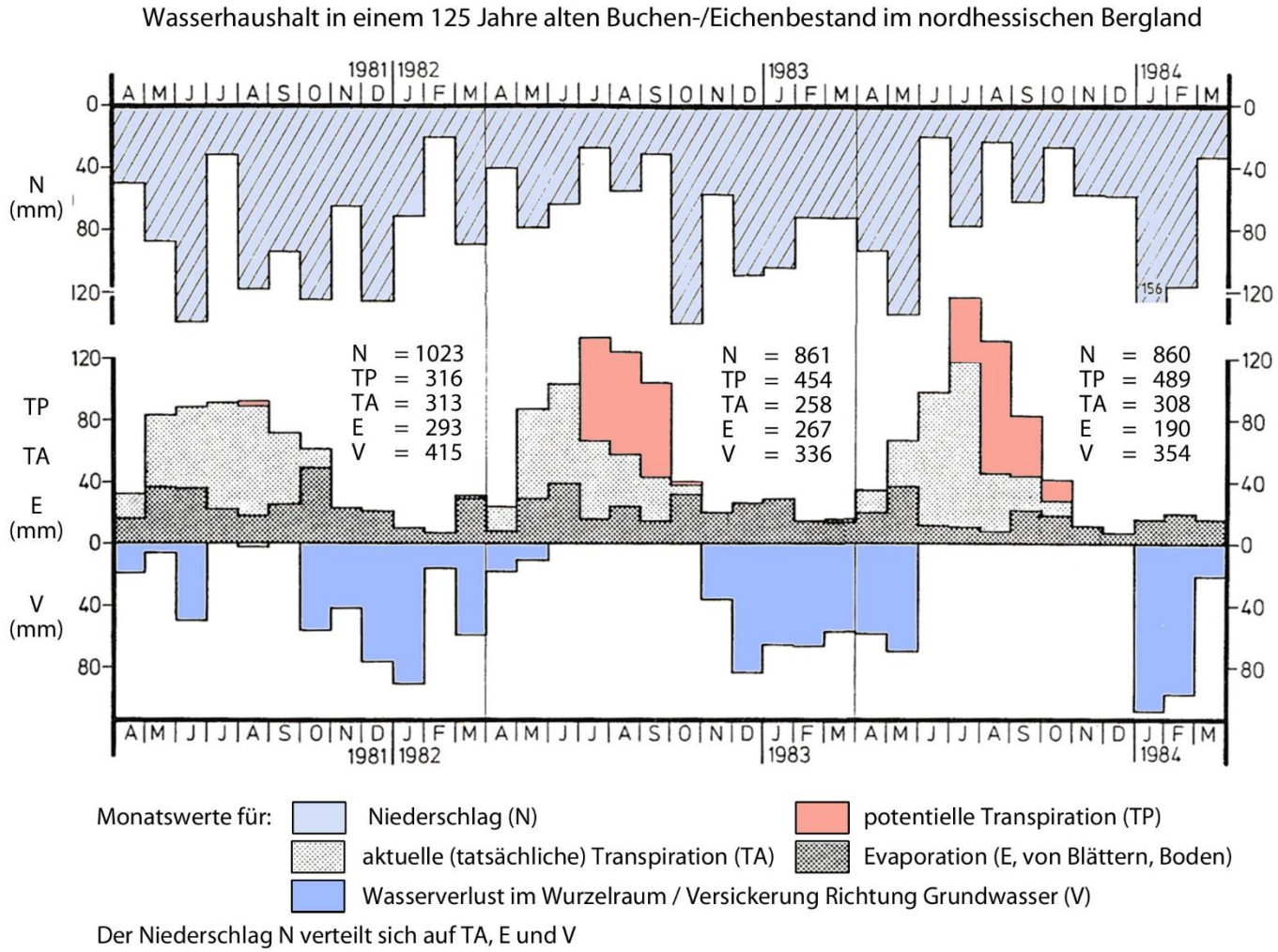


***Abb. 22**: Abb. 29 aus Ernstberger a.a.O., modifiziert und koloriert.*

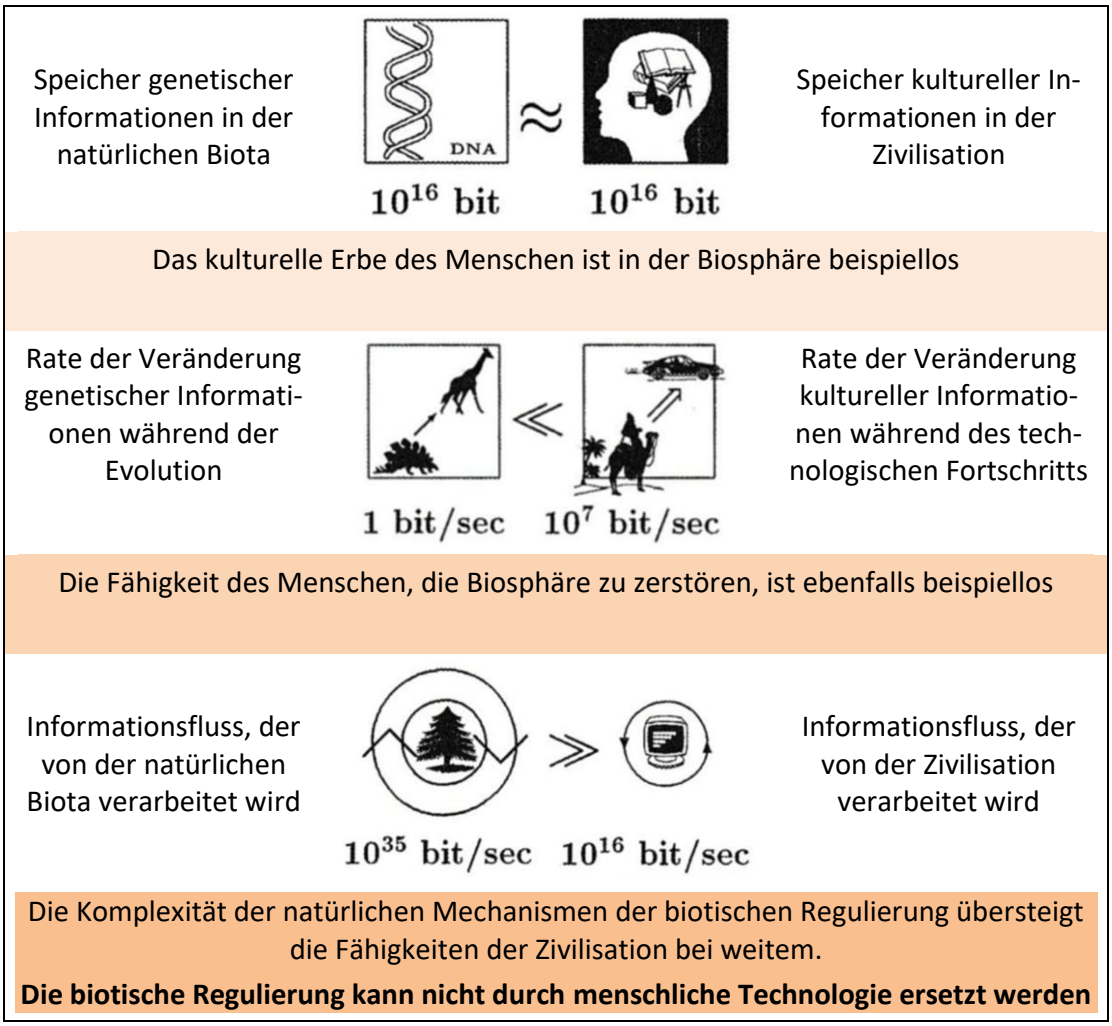
Abschlussbemerkung

Die vorangehenden Vorschläge zu einigen Anpassungs-Maßnahmen im Lebensraum der Stadt sind natürlich angesichts des globalen Problems unzureichend, können aber den hier lebenden Menschen erfahrbare Erleichterungen verschaffen. Alles was konkret mit dem besonders wichtigen Erhalt von vorhanden Waldbeständen, ihrer ökologischen Wiederherstellung und ihrer Erweiterung zu tun hat, ist hier noch nicht angesprochen. Da ist vor allem Verzicht auf menschliche Intervention angesagt: die Aufgabe von Nutzungen und die Bereitstellung von Flächen, gepaart mit einigen, menschliches Handeln korrigierenden ‚Maßnahmen', die vor allem die Rückhaltung des Wassers und die Rücknahme entwässernder Infrastruktur betreffen. Prinzipiell ist die Wiederherstellung der regulierenden Ökosysteme aber nicht technologisch realisierbar bzw. kompensierbar. Gorshkov et al. fassen das in einer einfachen Grafik (dortige Fig. 7.2 mit hiesiger Abb. 23 in deutscher Übersetzung) und textlich so zusammen (S. 214 f):

> *Wir haben gesehen, dass der kulturelle Informationsschatz der modernen Zivilisation zwar in der gleichen Größenordnung liegt wie der genetische Informationsschatz der natürlichen Biota, die natürliche Biota jedoch in der Lage ist, in einer Zeiteinheit 20 Größenordnungen mehr Informationen zu verarbeiten als die moderne Zivilisation. Es ist sinnlos, zu versuchen, den zuverlässigen Arbeitsmechanismus der biotischen Regulierung der Umwelt durch ein technologisches System zu ersetzen. Alle derartigen Versuche sind zum Scheitern verurteilt, und was noch wichtiger ist: Allein die Festlegung eines solchen Ziels ist gefährlich. Die einzige erfolgversprechende Strategie für die moderne Menschheit ist die Strategie der*

Erhaltung der verbleibenden natürlichen Biota und der Wiederherstellung ihres globalen Regulierungspotenzials.

***Abb. 23**: Konzentrat der Studie zur biotischen Regulierung (Fig. 7.2 bei Gorshkov et al.) aus informationstechnischer Perspektive.*



Den Informationsfluss in den globalen Biota haben die Autoren mit 10^{35} bit/s abgeschätzt. Das ist eine 1 mit 35 Nullen, für die das Internationales Einheitensystem nicht einmal einen Namen hat:

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000

Keine menschliche Rechnerfarmen-Agglomeration auf dieser Welt wird diese informationsverarbeitende Leistung der Natur jemals erreichen, aber zerstören kann sie der Mensch leicht.

Michael Siebert, Juni 2024

Anhang: Der Strahlungshaushalt der Erde und die Kühlleistung der Biota

Wo die Verdunstungsleistung von Pflanzen (Transpiration) schwer zu messen ist, gilt dies in der Folge noch mehr für die **Energie**, die von den Pflanzen für ihre Transpiration benötigt wird. Weitere Energie verbrauchen Pflanzen für die Photosynthese, die aus dem der Luft entnommenen CO_2 höherwertige Verbindungen für den Aufbau der Pflanze erzeugt. Für beide Prozesse dient die Sonnenstrahlung als einzige Energiequelle. Deshalb ist ein Blick auf den Energiehaushalt der Erde angesagt:

Quelle aller Energieströme auf der Erdoberfläche ist die Sonneneinstrahlung. Als kurzwellige elektromagnetische Strahlung vor allem im Nanometer-Bereich des Lichts durchdringen ungefähr 47 % dieser Strahlung die Erdatmosphäre und treffen auf die Erdoberfläche auf. Ca. 23 % werden von der Atmosphäre und den Wolken in den Weltraum zurück *reflektiert*, zudem werden 23 % von der Atmosphäre *absorbiert*. Außerdem

reflektieren helle Flächen an der Erdoberfläche (v.a. Eis und Schnee) weitere 7 %. Die beiden reflektierten Strahlungsanteile werden auch Albedo genannt und machen etwa 30 % der Einstrahlung aus. Im linken Teil der Abb. 24 sind diese Energieströme in gelber Farbe dargestellt (die Einheit der numerischen Angaben ist W / m²). Die dort bezifferten (global-durchschnittlichen) **161 W/m²** sind also der Energieeintrag, den die Sonne an die Erdoberfläche liefert.

Alles weitere vollzieht sich vornehmlich im Haushalt von langwelliger Wärmestrahlung (im Mikrometerbereich, in Abb. 24 rot dargestellt). Sie ist der Energieträger im Austausch zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre sowie Erdatmosphäre und Weltraum. Sie entsteht als Abstrahlung der von der Sonneneinstrahlung getroffenen Körper der Erdoberfläche bzw. der Atmosphärengase.

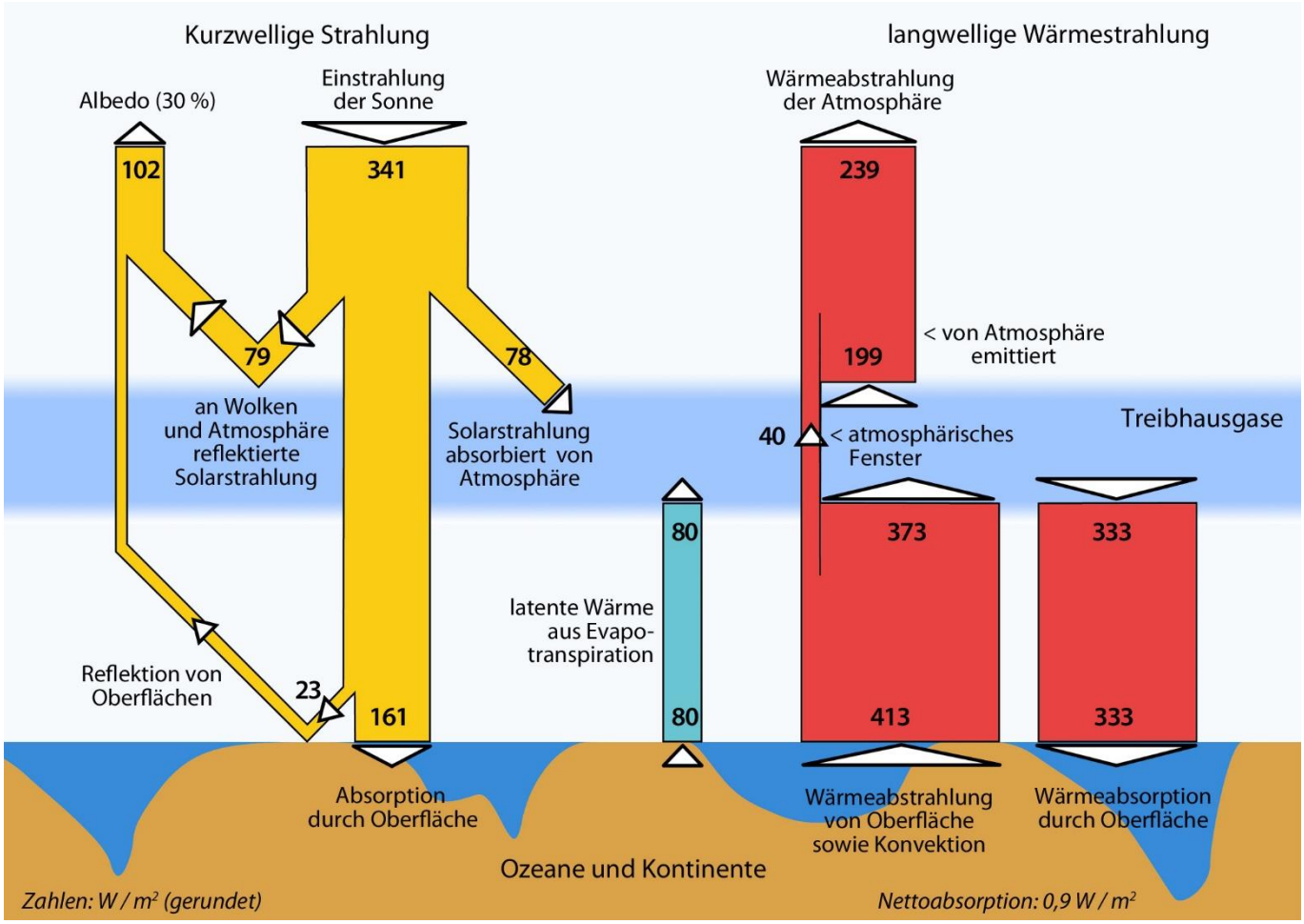


***Abb. 24**: Der Strahlungshaushalt der Erde[50]. Augenmerk sei auf die mittlere blaue Säule zur Evapotranspiration gerichtet. Mit ihr wird ungefähr die Hälfte der auftreffenden Sonnenenergie ‚neutralisiert'. Die andere Hälfte prägt das Wärmebild auf der Erde (= Saldo der beiden fetten roten Säulen rechts).*

---

[50] Abb. für diesen Text neu konstruiert, deutsch beschriftet und etwas vereinfacht. Die Darstellung basiert auf einem Modell, das Jeffrey Kiehl und Kevin E. Trenberth erstmals 1997 publiziert haben. Es wird nach den Anfangsbuchstaben der Autoren und dem Veröffentlichungsjahr auch kurz als „**KT97**" zitiert. Dies Modell wurde dann zur Grundlage der Arbeiten des Weltklimarats:

a) J. T. Kiehl / Kevin E. Trenberth: Earth's Annual Global Mean Energy Budget, in: AMS Journals (American Meteorological Society) Vol. 78, 02/1997 (Grafik dort noch schwarz-weiß als Fig. 7), online: http://www.geo.utexas.edu/courses/387H/PAPERS/kiehl.pdf. Es folgten leichte Weiterentwicklungen, nun auch mit Farbabbildungen:

b) K. Trenberth / J Fasullo / J. Kiehl: Earth's global Energy Budget, in: Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS), Vol. 90, 03/2009, S. 311 ff, online: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/90/3/2008bams2634_1.xml

c) 2011 erschien eine Überprüfung des Modells auf Grundlage von 8 Neuanalysen [reanalysis]: K. Trenberth / J. Fasullo / J. Mackkarbo: Atmospheric Moisture Transports from Ocean to Land and Global Energy Flows in Reanalyses, Journal of Climate 09/2011, S. 4907, dort Fig. 10, online: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/18/2011jcli4171.1.xml.

Die Energiebilanzen sind (fast) ausgeglichen (Werte in Klammern folgen entsprechend Abb. 24 der Einheit W / m²):

1. Energieaustausch an der **Grenze zum Weltraum**: Solareinstrahlung (341) – Wärmeabstrahlung (239) – Albedo (102) = **0**.
2. Energiebilanz der **Atmosphäre**: absorbierte Solarstrahlung (78) + latente Wärme aus Evapotranspiration (80) + Wärmeabstrahlung der Erde nebst Konvektion (373) – Wärmerückstrahlung zur Erde (333) – Wärmeabgabe der Atmosphäre in den Weltraum (199) = **-1**
3. Energieflüsse an der **Erdoberfläche**: Absorption von Solarstrahlung (161) + Wärmeabsorption aus der Atmosphäre (333) – latente Wärme aus Evapotranspiration (80) – Wärmeabstrahlung der Oberfläche nebst Konvektion (413) = **1**

Es bleibt also ein ‚Rest' von rund 1 W/m², der nicht in den Weltraum zurückgeht, sondern von der Erde absorbiert wird. Er bezeichnet das Energie*ungleichgewicht* der Erde. Der positive Wert in der Erdoberflächenbilanz (entsprechend negativ in der Atmosphärenbilanz) ist ein Hinweis auf Erderwärmung und rührt vor allem aus dem Treibhauseffekt. Prinzipiell sorgt dieser Treibhauseffekt dafür, dass auf der Erde gute Lebensbedingungen herrschen. Daran ist vor allem Wasserdampf in der Atmosphäre beteiligt. Verändert wird das Geschehen durch die ‚bösen' Treibhausgase wie CO_2, Methan oder Lachgas, deren Anteil sich durch menschliche Eingriffe stetig erhöht.

Die auf die Erdoberfläche auftreffenden 47 % der Sonneneinstrahlung werden dort absorbiert bzw. in Wärmeabstrahlung (im Mikrometerbereich) umgewandelt. Dies gilt aber nicht für den Anteil der Sonneneinstrahlung, der zur Verdunstung von Wasser bzw. zur Transpiration der Pflanzen sowie deren Photosynthese-Leistungen verbraucht wird. Diese von Evapotranspiration und Biomasseaufbau konsumierte Sonnenenergie wird auf der Erdoberfläche nicht in Wärme umgesetzt, sondern quasi ‚neutralisiert'. Die verbrauchte Energie ist nur „latent" im produzierten Wasserdampf (sowie in der aus dem CO_2 der Luft erzeugten Biomasse) gespeichert. Der Wasserdampf steigt auf und gibt erst in der Atmosphäre durch Kondensation seine gespeicherte ‚latente' Energie wieder ab. Dieser Vorgang erzeugt den Kühlungseffekt an der Erdoberfläche, der zum Teil durch die Biota bewirkt wird.

Das Diagramm zum Strahlungshaushalt der Erde (Abb. 24) liefert für diesen eminent wichtigen Kühlvorgang leider nur die sehr allgemeine Komponente „latente Wärme aus Evapotranspiration". Darin sind sowohl die Verdunstungen aus Ozeanen, Seen, Gewässern und offenen Landflächen (Evaporation) als auch pflanzliche Transpiration enthalten. Dennoch ist festzuhalten: Evapotranspiration sorgt durch den Verbrauch von 50 % der eingestrahlten Energie dafür, dass die Erde nicht überhitzt, weil sie Sonnenstrahlung in latente, also auf der Erdoberfläche nicht fühlbare Wärme umwandelt.

Etwas weiter geht die Gorshkov-Studie, deren Daten allerdings nicht direkt vergleichbar sind, weil sie nicht auf den (globaldurchschnittlichen) Quadratmeter heruntergerechnet, sondern als globale Energieströme mit der Einheit 10^{12} W (entspricht Terawatt bzw. Billionen Watt) ausgewiesen werden[51]:

	Energiequelle / -senke	Terawatt (10^{12} W)	Anteil an Sonneneinstrahlung %
1	Von der Sonne auf die Erde übertragene Sonnenenergie	170.000	100
2	Von der Erdoberfläche absorbierte Sonnenenergie	80.000	47
3	Verdunstung von der gesamten Erdoberfläche	40.000	24
4	Verdunstung von Land (Evapotranspiration)	5.000	3
5	Transpiration der Biota (entspricht 3/5 der Landverdunstung)	3.000	2
6	Photosynthese der Biota	100	0,06

[51] Gorshkov et al., Table 7.1: Energy fluxes at the Earth's surface; Tabelle hier übersetzt und vereinfacht.

Der 47 %-Anteil der von der Erde absorbierten Sonnenstrahlung (Zeile 2) und der 24 %-Anteil der in Verdunstung umgesetzten Energie (Zeile 3) stimmt mit dem KT97-Modell (Abb. 24) i.W. überein. Der Anteil der Verdunstung über Land (Zeile 4) scheint aber stark untersetzt, weil er mit nur 1/8 der Gesamtverdunstung weit unter dem Landflächenanteil von ca. 29 % liegt und damit auch nicht den Mengenverhältnissen der Wasserkreisläufe entspricht – vgl. Abb. 9. Dort wurde der Verdunstungsanteil über Land entsprechend dem Flächenanteil mit ebenfalls ca. 29 % angenommen. Ferner wird in der Gorshkov-Tabelle der Anteil der Transpiration (Zeile 5) nur mit ca. 3/5 sehr niedrig angesetzt. Da scheint also noch Forschungsbedarf zu bestehen. Eine neuere Studie bestätigt diese Vermutung[52]:

> *Schätzungen der Transpiration auf globaler Ebene durch Klimamodelle sind aufgrund großer Unsicherheiten bei der stomatären Durchlässigkeit und des Mangels an Messungen auf Einzugsgebietsebene, die für die Kalibrierung von Modellen erforderlich sind, schlecht abgesichert, was zu einer Bandbreite von Vorhersagen führt, die 20 bis 65 Prozent der gesamten terrestrischen Evapotranspiration (14.000 bis 41.000 km³ pro Jahr) umfassen…*
>
> *Auf der Grundlage unserer Analyse eines globalen Datensatzes großer Seen und Flüsse kommen wir zu dem Schluss, dass die Transpiration 62.000 ± 8.000 km³ Wasser pro Jahr in die Atmosphäre zurückführt und dabei die Hälfte der gesamten von Landoberflächen absorbierten Sonnenenergie nutzt[53] …*
>
> *Die Dominanz der Transpirationsströme bei der kontinentalen Evapotranspiration legt nahe, dass bei der Entwicklung von Klimamodellen im Hinblick auf die Vorhersage von Wasserressourcen Verbesserungen bei der Simulation biologischer Ströme gegenüber physikalischen (Verdunstungs-)Strömen Vorrang haben sollten.*

Wechseln wir die Perspektive auf die Mikroebene. Auch dort ist die Informationslage mau. Es finden sich hin und wieder Beispiele wie diese[54]:

> *Mithilfe der Sonnenenergie können einzelne Bäume Hunderte Liter Wasser pro Tag verdunsten. Dies entspricht einer Kühlleistung von 70 kWh pro 100 Liter verdunstetem Wasser (genug, um zwei durchschnittliche zentrale Klimaanlagen pro Tag zu betreiben).*

Für die Ergänzung von kühlenden Bäumen und deren Wasserversorgung in Städten sind solch unklare Angaben über „einzelne Bäume“ (welcher Größe, Blattmasse usw.?) natürlich keine Planungsgrundlage. Auch hier besteht also noch erheblicher Bedarf an Daten, mit denen funktionierende, natürliche (biotische) ‚Kühlsysteme‘ in den Städten entwickelt werden können. Auch das (inzwischen eingestellte) Darmstädter Projekt „Schlaues Wasser“ blieb insofern vage[55].

---

[52] Jasechko, S. et al. (2013): Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. In: Nature Earth and Environmental Sciences, nature 496 vom 3.4.2013, S. 347-350. DOI: 10.1038/nature11983 bzw. direkter: https://www.nature.com/search?q=Terrestrial+water+fluxes+&journal=

[53] Im Strahlungshaushaltsmodell der Abb. 24 wären das 161 W / m² Gesamteinstrahlung * 29% Landmassenanteil / 2 = 23 W / m², mit denen die Pflanzen-Transpiration am blauen Balken der Evatranspiration in der Mitte des Diagramms beteiligt wäre. Im Kontext der Gorshkov-Berechnungen wären das 40.000 TeraW Gesamtverdunstung * 29% Landmassenanteil / 2 = 5.800 TeraW, also fast die doppelte Energiemenge wie jene 3.000 TeraW, die 2000 (Erscheinungsjahr der Studie) noch von Gorshkov et al. angenommen wurden (vgl. vorangehende Tabelle).

[54] David Ellison et al.: Trees, forests and water: Cool insights for a hot world; in: Global Environmental Change Vol. 43 2017, S. 51 ff, online: https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/43/suppl/C

[55] vgl. etwa die Ausführungen zum „Anwendungsfeld Wasserkreislauf“ im „Schlaues Wasser“-Strategiepapier, S. 58 ff, online: https://smartwater.darmstadt.de/uploads/2023/06/Schlaues_Wasser_Strategie.pdf