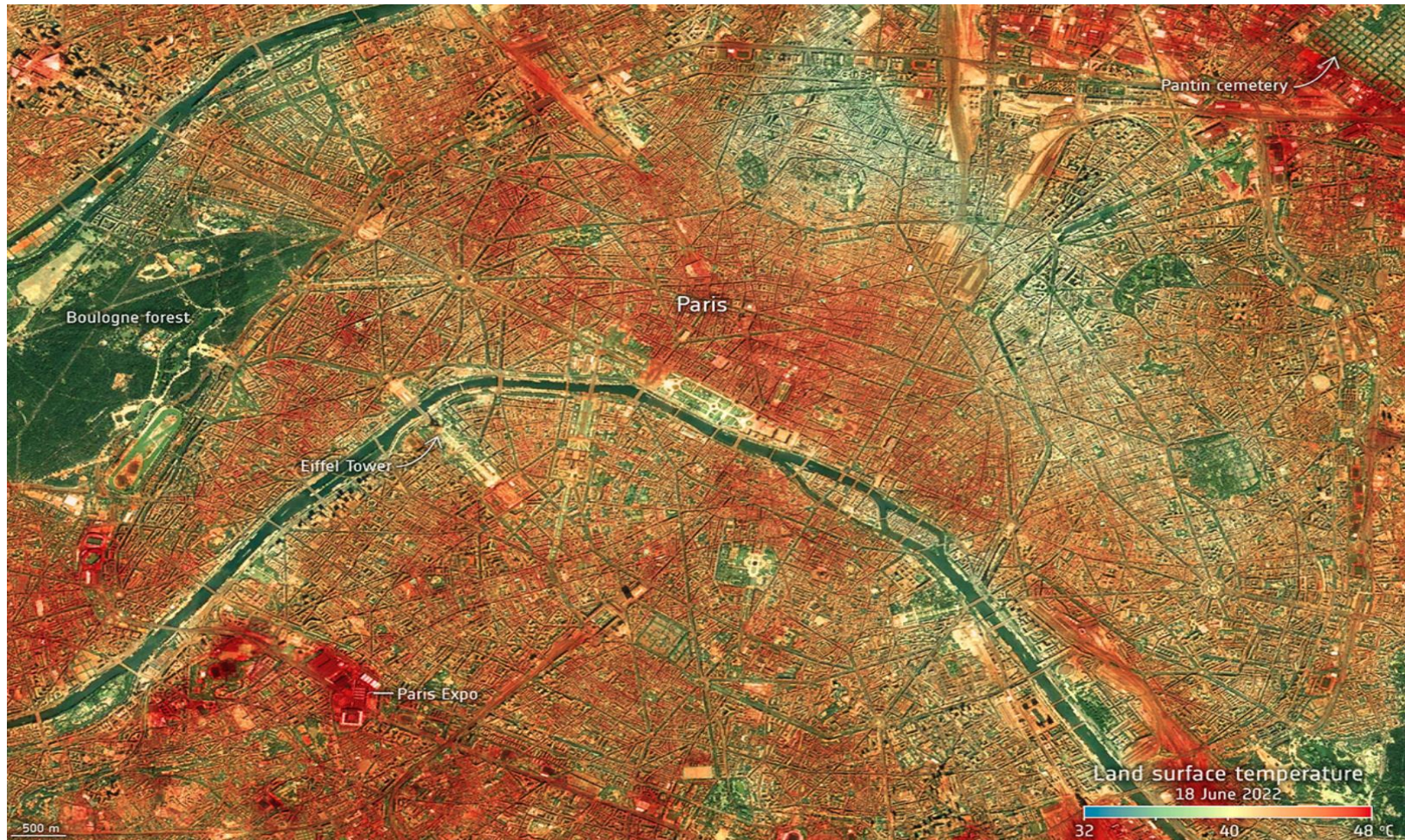


Städte im globalen Klimawandel



(Paris, Oberflächentemp. 18.6.2022, nachm.,
Quelle; NASA; R. Bachert 8.7.22)

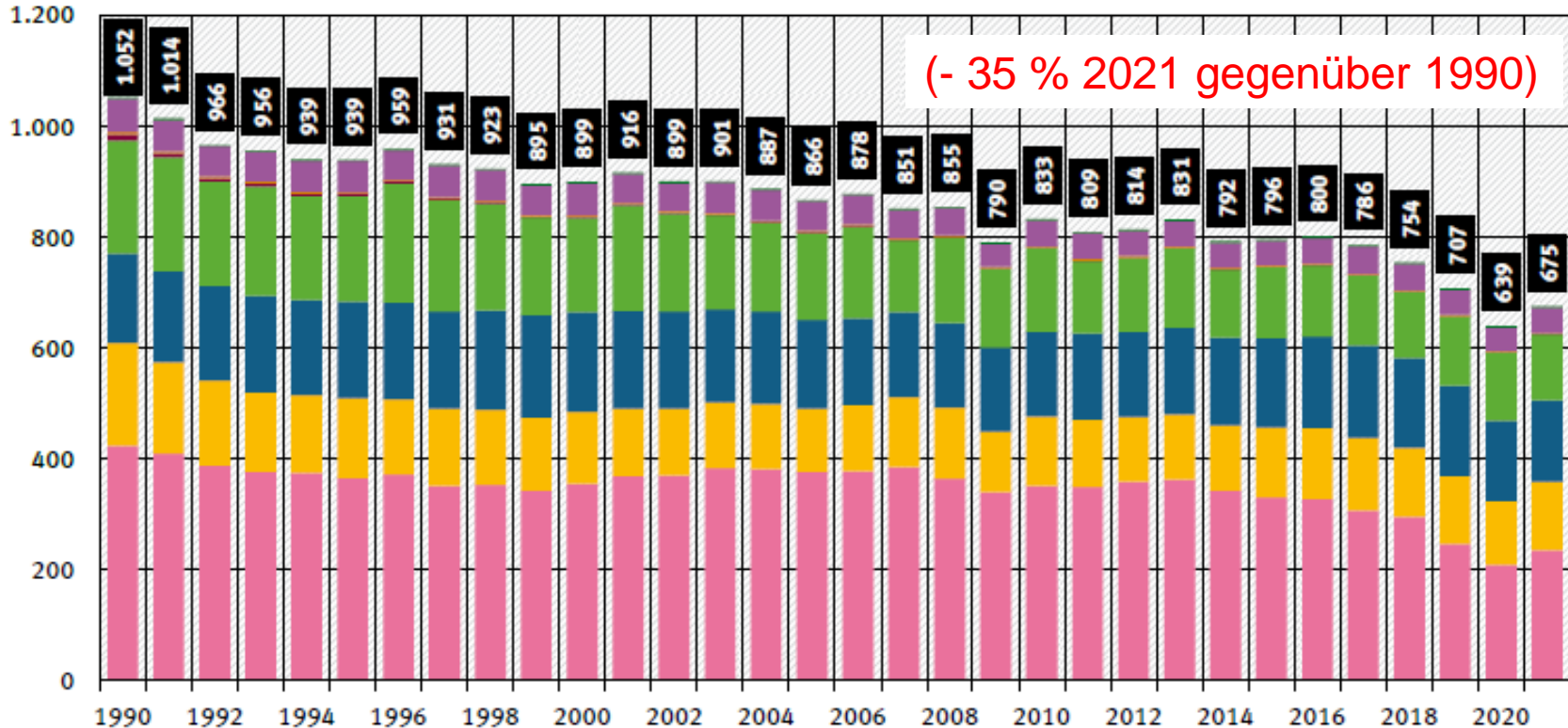
Univ.- Prof. (i. R.) Dr. rer. nat. Wilhelm Kuttler
Angewandte Klimatologie, Universität Duisburg-Essen

Gliederung

- Entwicklung der CO₂-Emission und der Lufttemperatur
- Städte – klimatisch/lufthygienische Charakterisierung
- Gegenwärtige und zukünftige klimatische Probleme von Städten: Hitze und Starkregen
- Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel
- Zusammenfassung

CO₂-Emission in Deutschland und weltweit

Kohlendioxidemission in Deutschland nach Kategorien (1990 - 2021 in Mio. t)



Energiewirtschaft

Verarbeitendes Gewerbe

Verkehr

Haushalte und Kleinverbraucher

Militär und weitere kleine Quellen

Diffuse Emissionen aus Brennstoffen

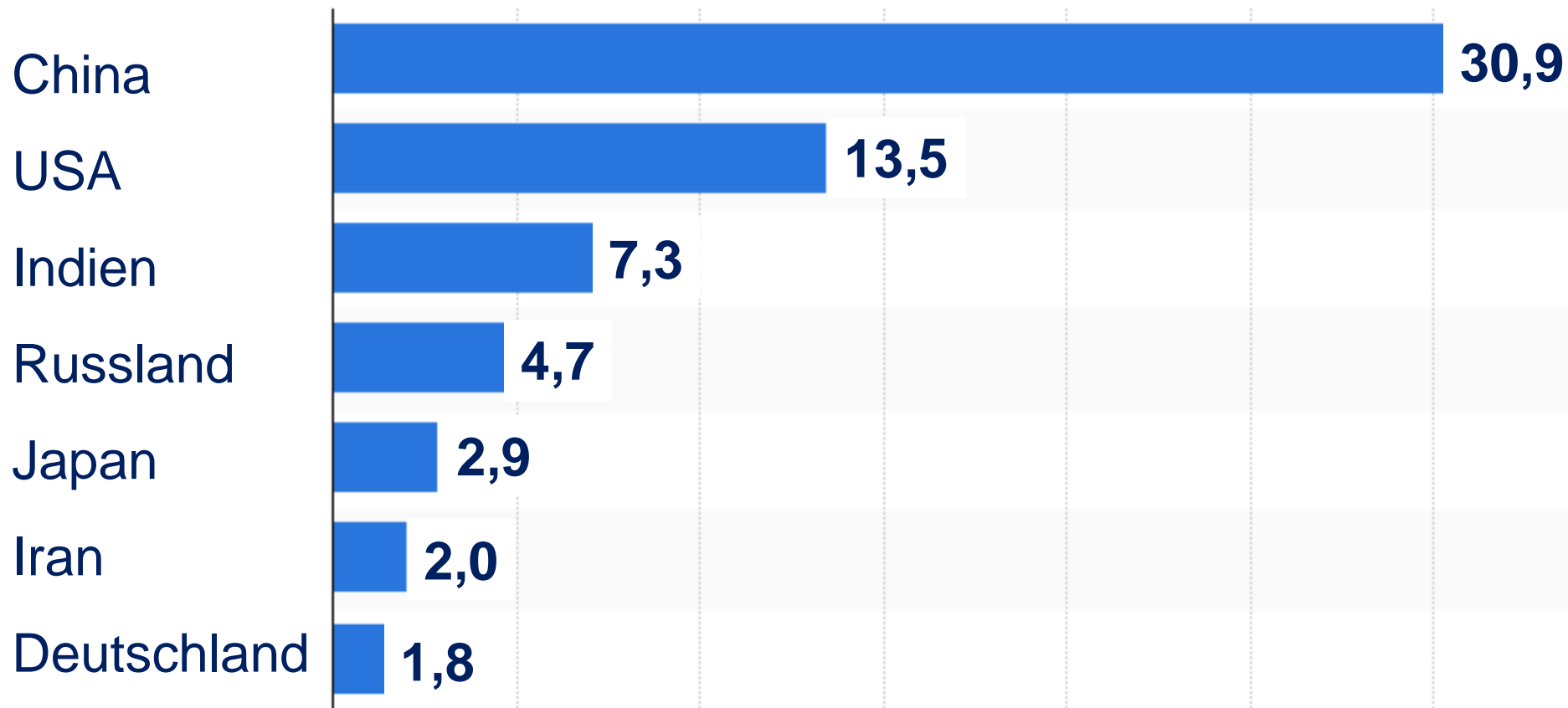
Industrieprozesse

Landwirtschaft

Kohlendioxid-Emissionen: ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 /verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2020 (Stand 01/2022), für 2021 vorläufige Daten (Stand 15.03.2022)

Anteil (in %) an der weltweiten Kohlendioxidemission (2021)



(Quelle: statista 2021)

CO₂- Emission in Deutschland (2021)

- 1,8 % an globaler Emission = 675 Mio. t/a
- Reduktion von 0,1 % \triangleq 37,5 Mio. t/a
- Vermeidungskosten von 1 t CO₂ \approx 1 000 Euro¹⁾
- Vermeidungskosten von 37,5 Mio. t/a \approx 37,5 Mrd. €/a

1) Emissionsdaten nach UBA (2022); CO₂-Vermeidungskosten berechnet nach Weimann (2021):
CO₂-Preise und Kosten der CO₂-Vermeidung bei Anwendung ordnungsrechtlicher Maßnahmen im
Vergleich zur Erweiterung des EUETS

Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland

Städte – klimatisch/lufthygienische Charakterisierung

Klimatische und lufthygienische Charakteristika von Städten

- Bevölk.: > 60 % weltweit urban; Energie/Ressource \uparrow
- Stadtoberfläche: (2 d \rightarrow 3 d; Innen-/Nachverdichtung; starke Versiegelung (Abfluss \uparrow , ET \downarrow))
- Materialbeschaffenheit: Überwieg. künstl.: ($\rho\uparrow$, $\lambda\uparrow$, $\zeta\uparrow$)
- Stadtatmosphäre: Emission von Spurenstoffen (z. B. NO_x, CO, PM, VOC, > 70 % CO_{2eq.}), Abwärme
- Niederschläge: Stadtzentrum \uparrow , urbane Leegebiete $\uparrow \uparrow$
- Stadt ./ Umland: $t_{(\text{Luft, Oberfl.})}\uparrow$; $v\downarrow$; $K_M\uparrow$; $L\uparrow$;
 $Q_H \gg Q_E \rightarrow Bo \gg 1$; $Q_F\uparrow$

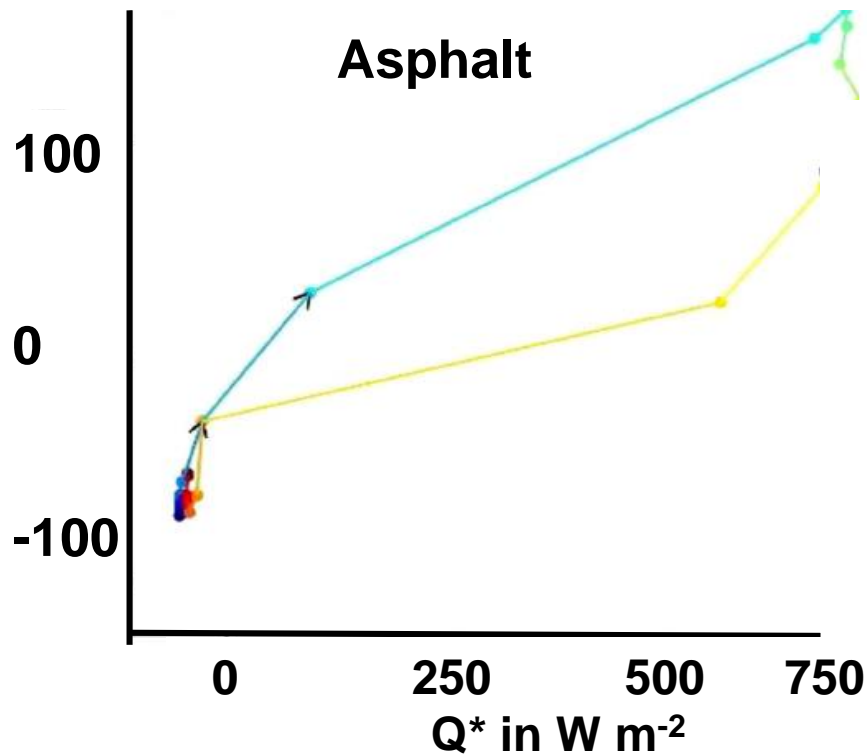
Wärmetransporte: Asphalt und Waldboden im Vergleich

Abhängigkeit des Bodenwärmeflusses (Q_G) von der Strahlungsbilanz (Q^*)

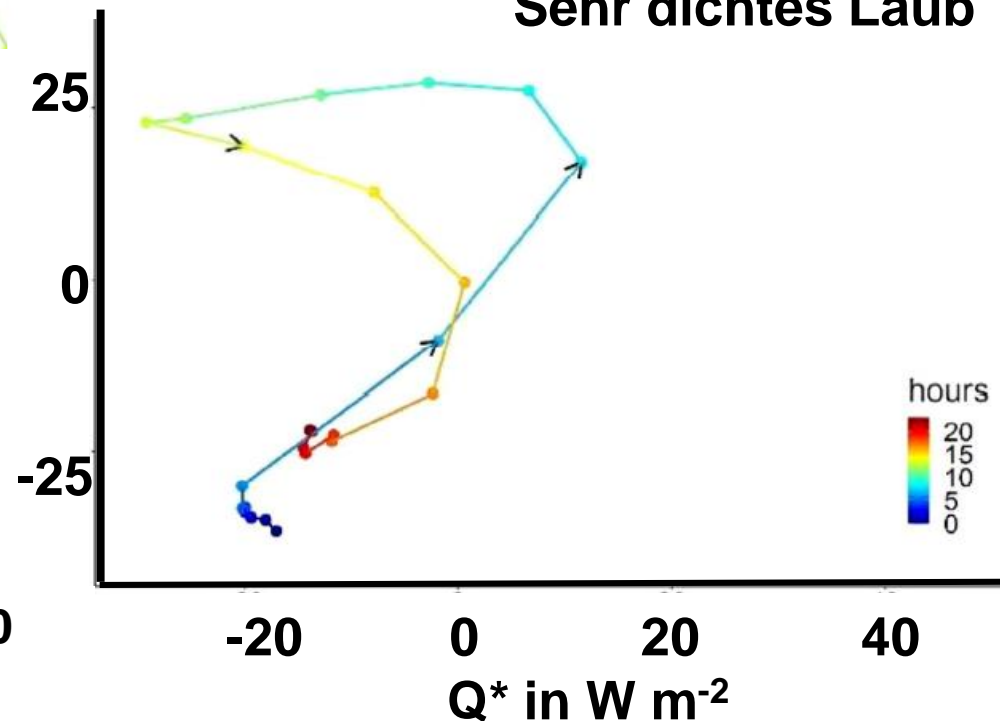
für eine Asphalt- und Waldbodenoberfläche

$$K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow = Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

Q_G in $W\ m^{-2}$



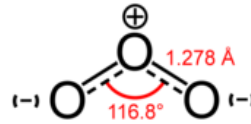
**Baum, 10 m hoch,
Sehr dichtes Laub**



(Quelle: Hertel/Schlink 2022; Werte für Sept.)

Luftqualitätsprobleme

Ozonbildung



- Durch NO₂, PAN und flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOCs) als wichtige Vorläufergase für die Ozonbildung sowie starke Einstrahlung/hohe Lufttemperaturen
- VOCs bestehen aus zwei Gruppen:
 - Anthropogene VOCs (AVOC) und
 - Biogene VOCs (BVOC) werden von bestimmten Bäumen und Sträuchern bei hohen Temperaturen abgegeben
 - AVOCs Emission ist kaum temperaturabhängig
 - BVOCs Emission (z. B. Isopren C₅H₈) ist dagegen in hohem Maße positiv mit der Temperatur korreliert, das heißt, „Klimawandel sensibel“
- Deshalb hat Isopren an heißen Tagen einen erheblichen Einfluss auf die Ozonproduktion
- Durch BVOC auch SOA-Bildung



Trockentoleranz, Isoprenemission und Allergiepotezial verschiedener Baumarten

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Trocken-Toleranz ¹⁾	Isopren-Emission ²⁾	Kritisches Allergie-Potential ³⁾
Acer campestre	Feldahorn	++		nein
Acer platanoides	Spitzahorn	+		nein
Carpinus betulus	Hainbuche	+		ja
Fraxinus excelsior	Gemeine Esche	+		ja
Ginkgo biloba	Ginkgo	++		k.A.
Platanus × acerifolia	Ahornblättrige Platane	++	hoch	ja
Populus alba	Silberpappel	++	hoch	nein
Populus tremula	Zitterpappel	+	hoch	nein
Prunus avium	Vogelkirsche	++		nein
Quercus petraea	Traubeneiche	+	hoch	ja
Quercus rubra	Roteiche	+	hoch	ja
Robinia pseudoacacia	Gemeine Robinie	++	hoch	nein
Tilia cordata	Winterlinde	+		nein

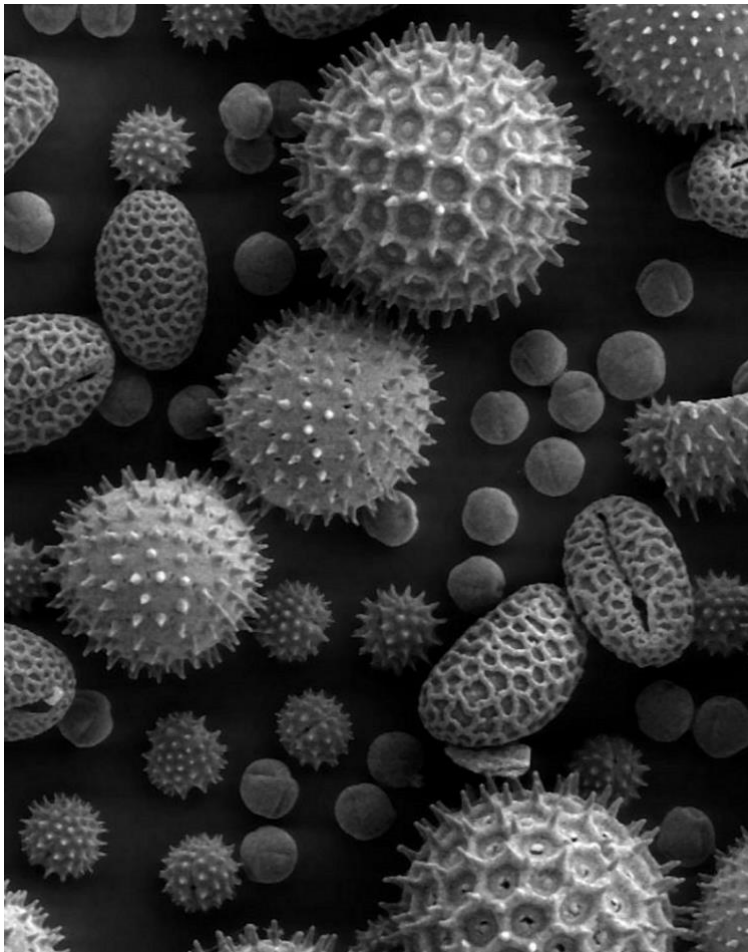
1) +, ++ = gute, sehr gute Trockentoleranz (Roloff et al. 2008)

2) hoch = Baumarten mit einer Isoprenemissionsrate > 10 µg Isopren/(g TS · h)

3) Als kritisch eingestufte Baumarten sollten nicht angepflanzt werden (Bergmann et al. 2012)

(Quelle: Kuttler 2013; Wagner 2014; Mücke et al. 2014; ergänzt)

Pollenallergische Reaktion durch hohe Lufttemperatur und hohe CO₂-Konzentration



Allergie auslösendes Protein in Beifusspollen (Amb a1) wird produziert durch

- Hohe Temperaturen und erhöhte CO₂-Konzentration;
- Beifuss ist eine Kohlenstoff limitierte (C₃) Pflanze → hohe Temperaturen und hohe CO₂ Konzentrationen stimulieren die Produktion des Allergie auslösenden Proteins

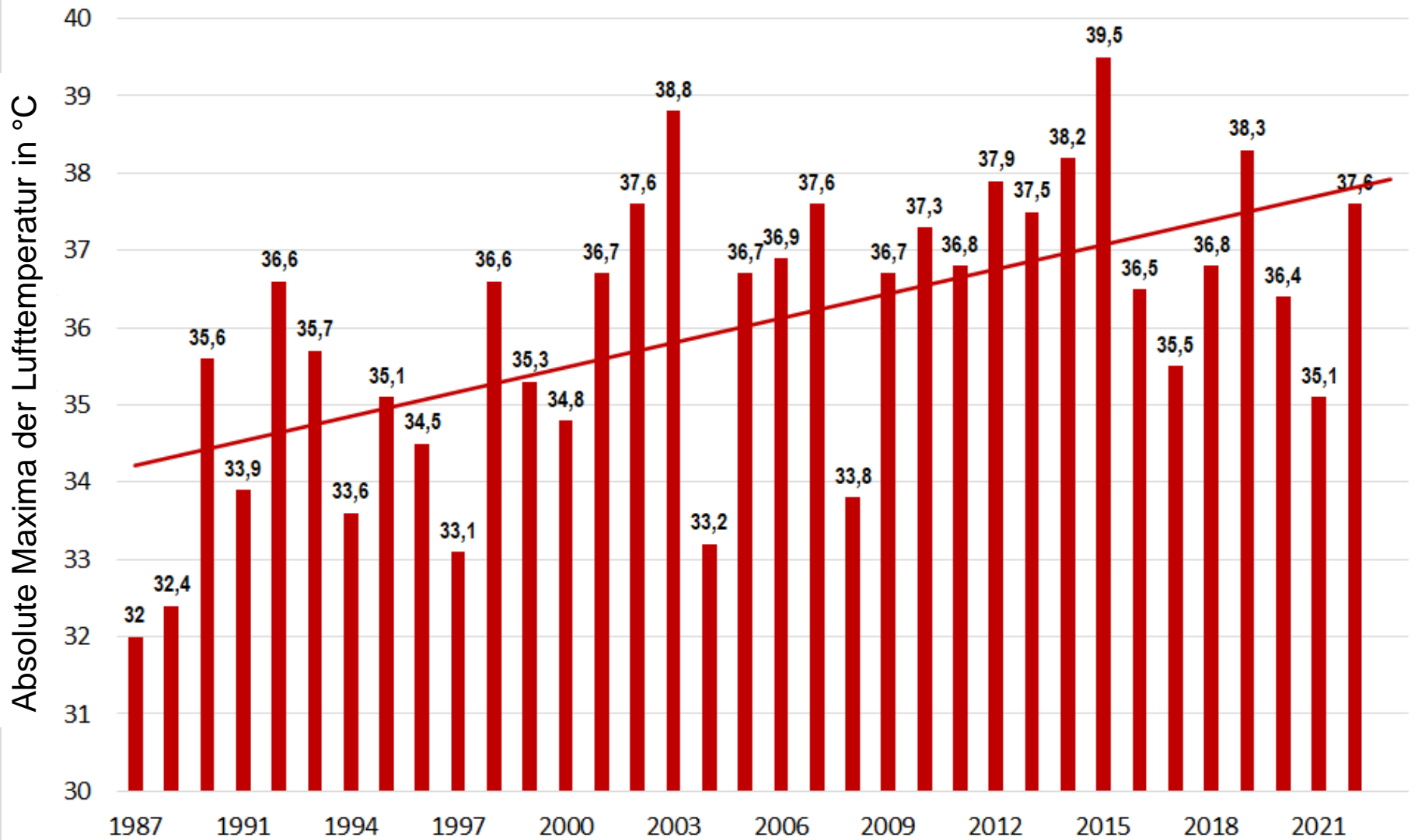
[Quelle: Ziska et al., 2003; verändert]

Stadtatmosphäre, hydrologisch

Gegenwärtige und zukünftige klimat. Probleme der Städte: Hitze und Starkregen

Hitze

Maximaltemperaturen in Stuttgart Mitte



(Daten: AfU Stuttgart, Grafik: Baumüller, 2022)

Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland

[$\leq 0,9\%$ Jahresgesamtmortalität Deutschland]

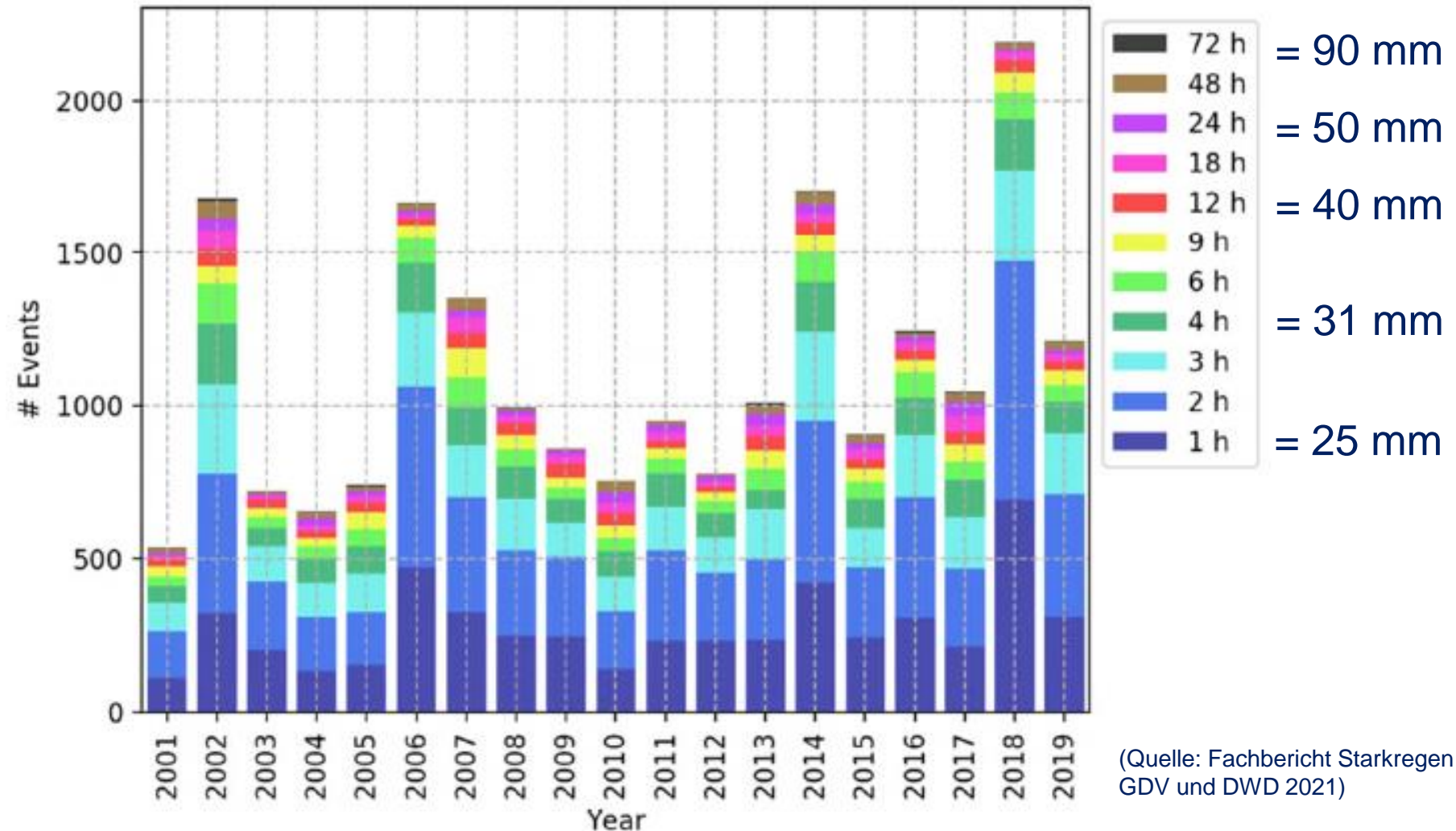


(zus.gestellt v. J. Baumüller 2022; Daten nach RKI)

Starkregen

Aufteilung der Starkregenereignisse (2001-2019) in Deutschland nach Dauerstufen (farblich kodiert)

Events 01.01.2001-31.12.2019

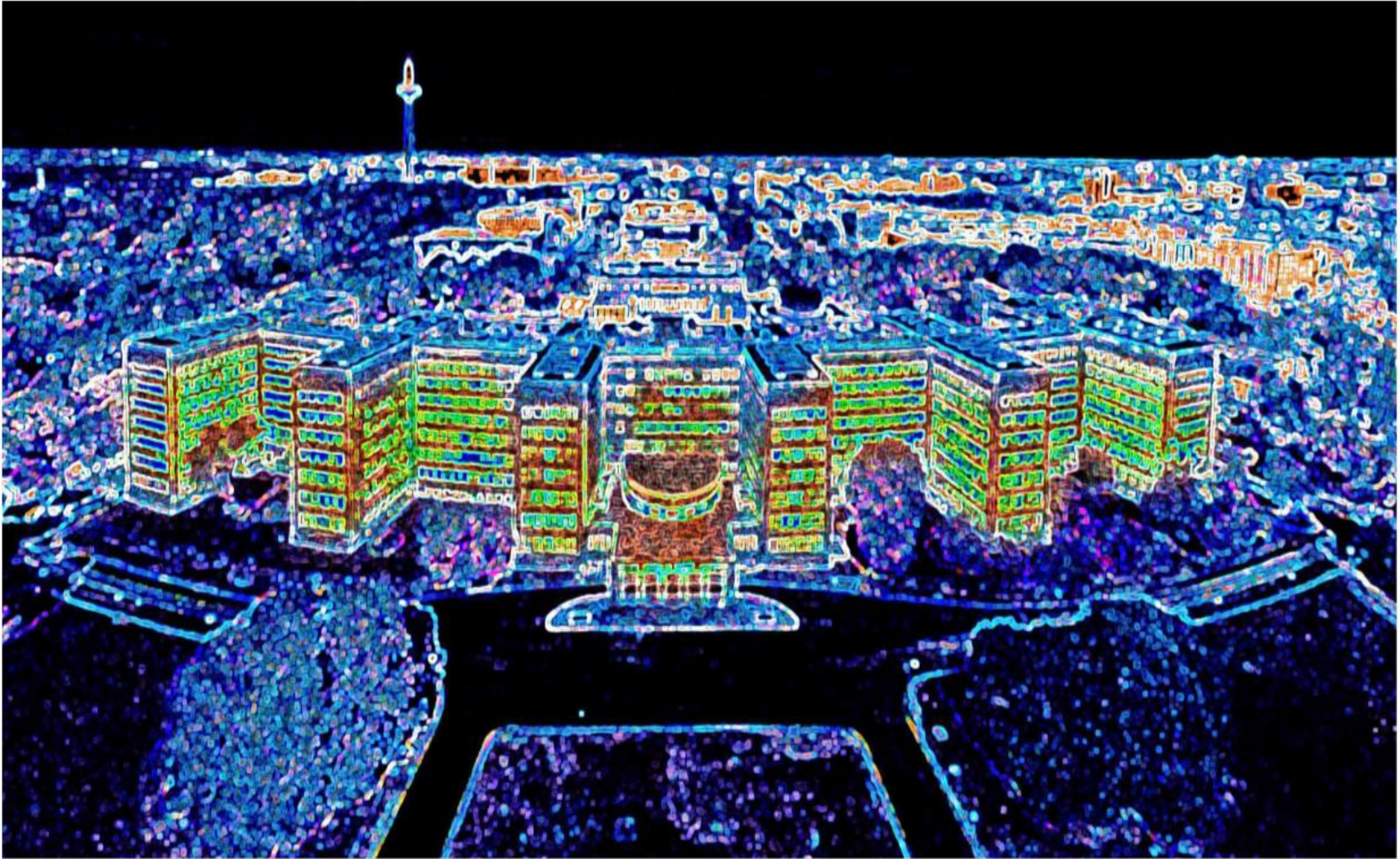


(Quelle: Fachbericht Starkregen GDV und DWD 2021)

Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel

- Gebäudehüllen aufhellen, verschatten, dämmen
- Versiegelung reduzieren/beseitigen
- Dach-/Fassadenbegrünung ausbauen
- Urbane Grün-/Wasserflächen schaffen/vergrößern
- Böden und Luft befeuchten
- Luftleitbahnen erhalten/anlegen
- Abfluss von Extremniederschlägen vermindern

Gebäudehüllen dämmen



Einleuchtend: Das IG-Farben-Haus wurde 1930 erbaut; es gehört daher zu den Frankfurter Uni-Gebäuden mit dem höchsten Energieverbrauch.

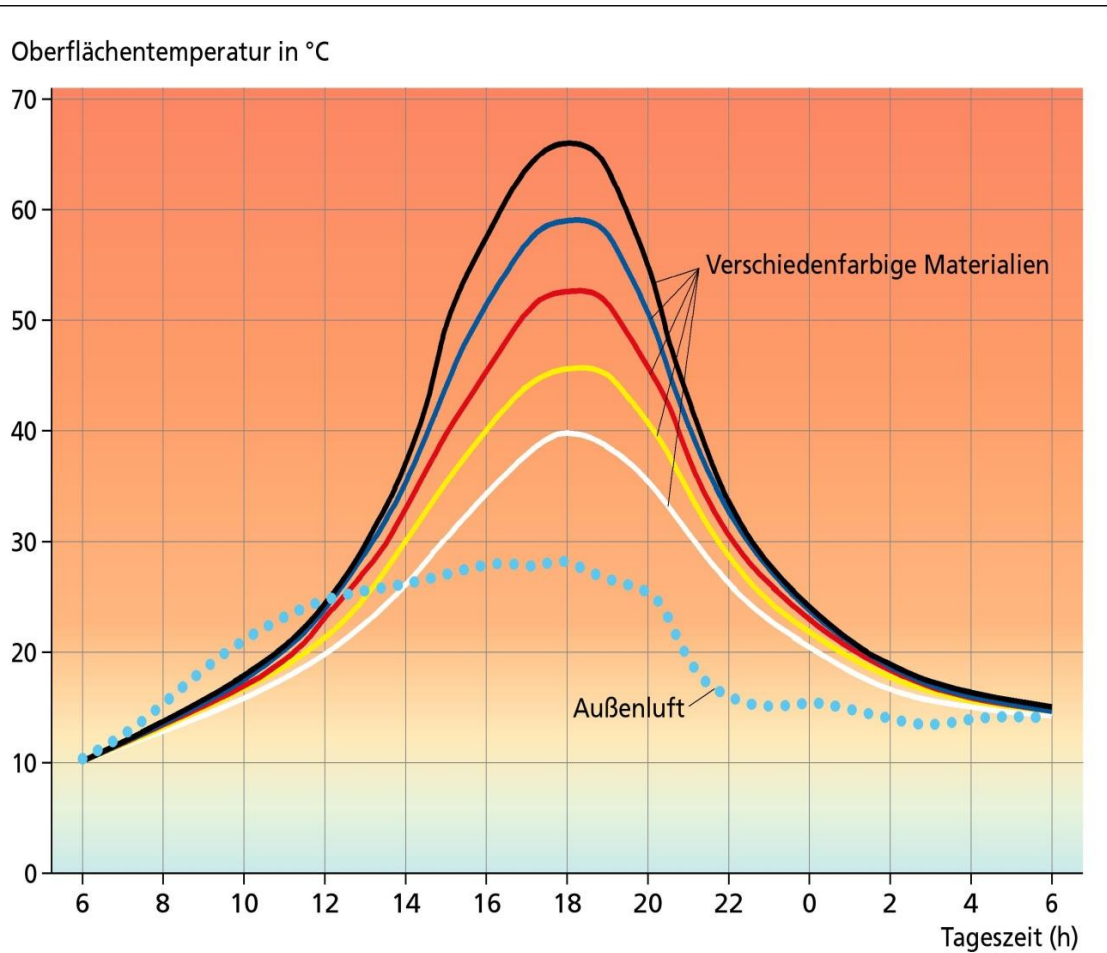
Illustration Uwe Dettmar

FAZ vom 17.01.2023

Oberflächen aufhellen

Einfluss der Außenwandfarbe von
Gebäuden auf die Oberflächentemperatur

Oberflächentemperaturen baugleicher Westwände in Abhängigkeit von Farbgebung und Tageszeit während eines sommerlichen Strahlungstages



$$t_{65\text{ °C}} = 740 \text{ W/m}^2$$

$$t_{40\text{ °C}} = 540 \text{ W/m}^2$$

Bei $\Delta P = 200 \text{ W/m}^2$,

- 5 h/d,
- 30 d/a
- 1 km² akkumulierte Wandfläche ergeben sich $3 \cdot 10^7 \text{ kWh/a}$, entspricht dem Jahresenergieverbrauch von 7.500 „Normfamilien“ (4.000 kWh/a).

(Quelle der Abb.: Gertis 1980, verändert.; eigene Berechnungen)

Versiegelung reduzieren/beseitigen

- wg. hohen Regenwasserabflusses
(vermiedene Verdunstungsenthalpie ΔH_v),
- wg. hoher Wärmeleitfähigkeit (λ) und
Wärmekapazität (ζ) von Baumaterialien

Urbane Grün-/Wasserflächen schaffen/vergrößern

Gebäudeoptimierung



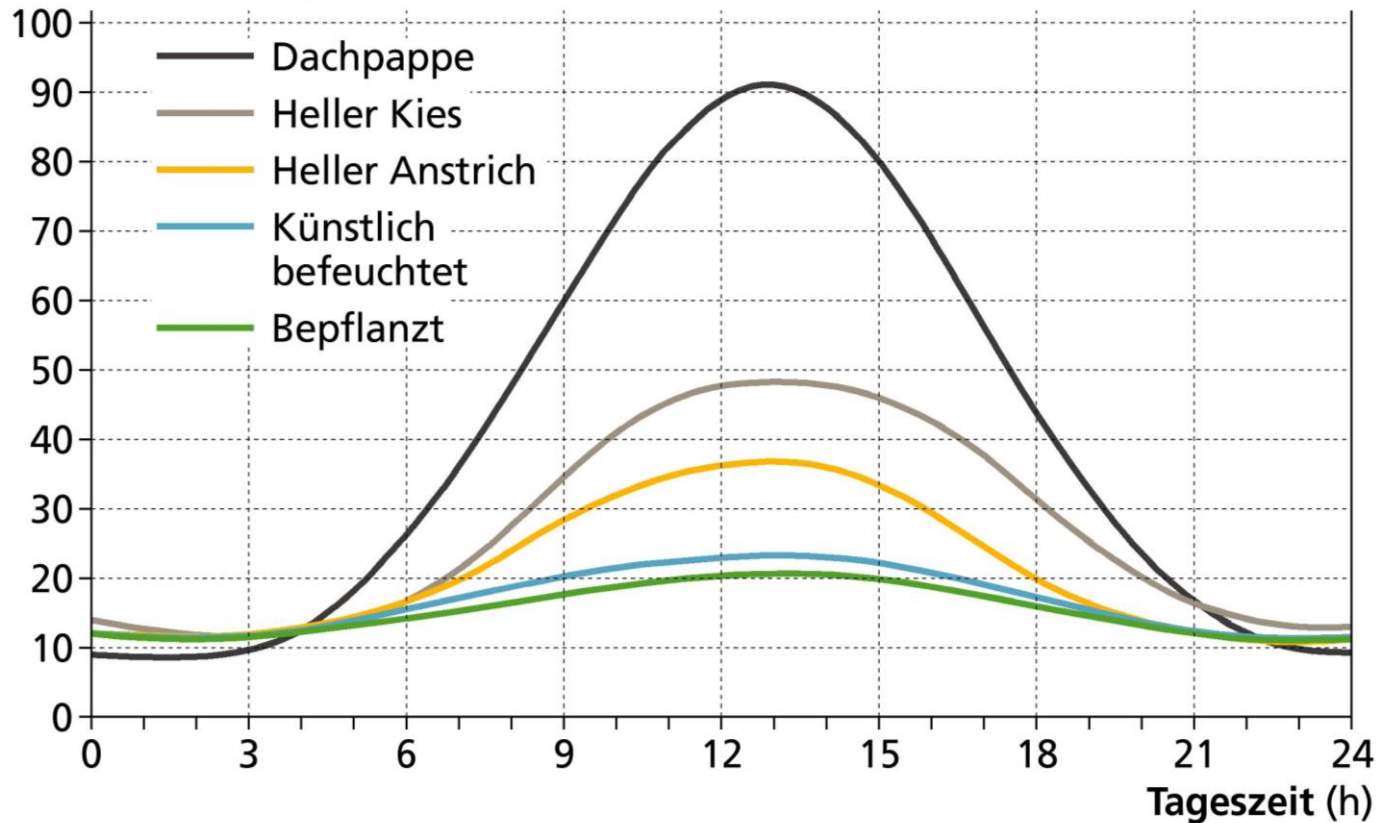
Quartiergestaltung



Dach-/Fassadenbegrünung

Oberflächentemperaturen von Dachabdeckungen während eines sommerlichen Strahlungstages in Berlin

Oberflächentemperatur (°C)



(Quelle: Horbert 2000, veränd.)

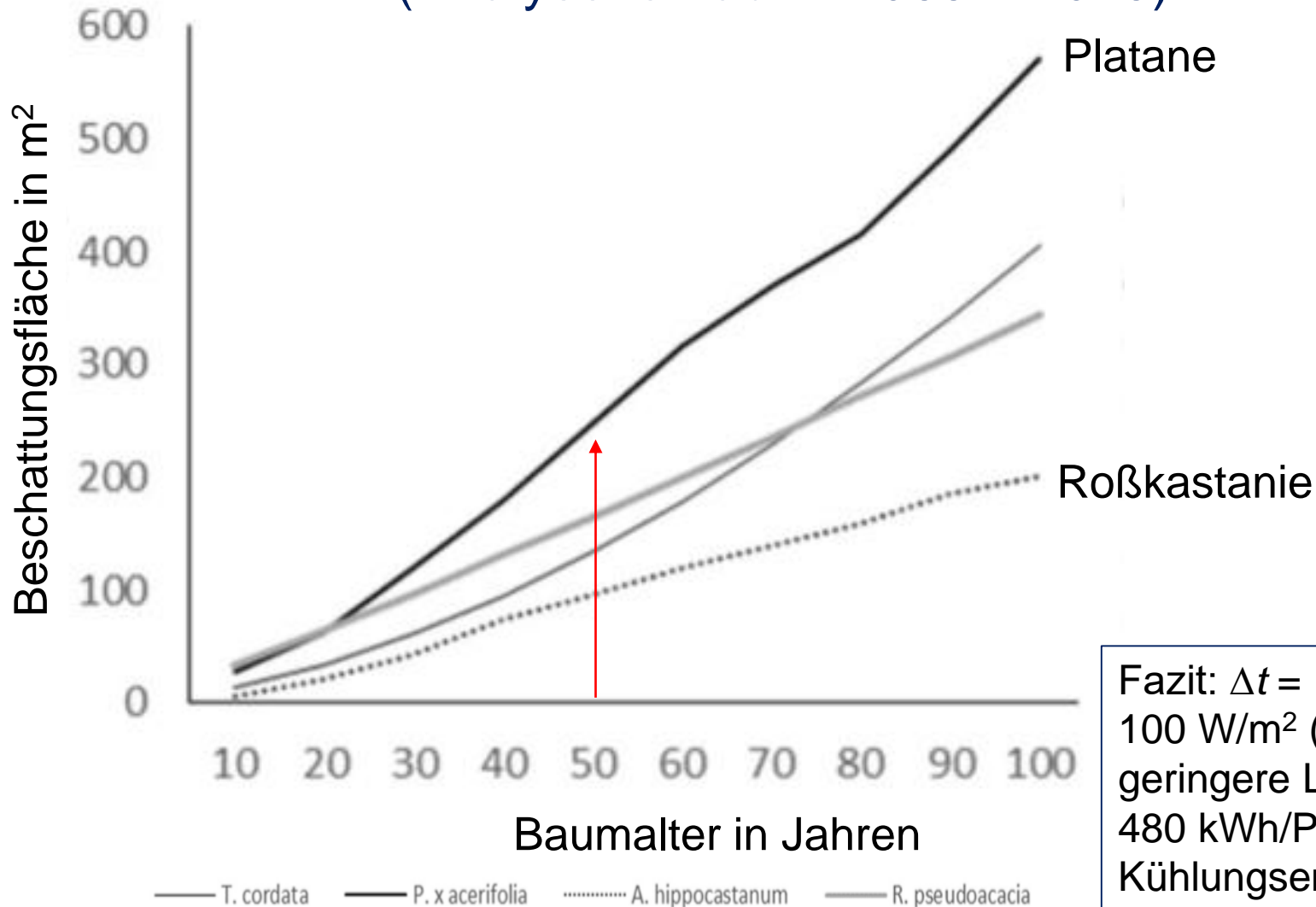
Bäume in der Stadt



Essen, Alte Bottroper Straße

(Foto: U. Kühn)

Mittlerer Beschattung (in m²) von Platane, Linde, Robinie, Roßkastanie im Juni in Abhängigkeit ihres Alters (Analysezeitraum: 1965 – 2015)

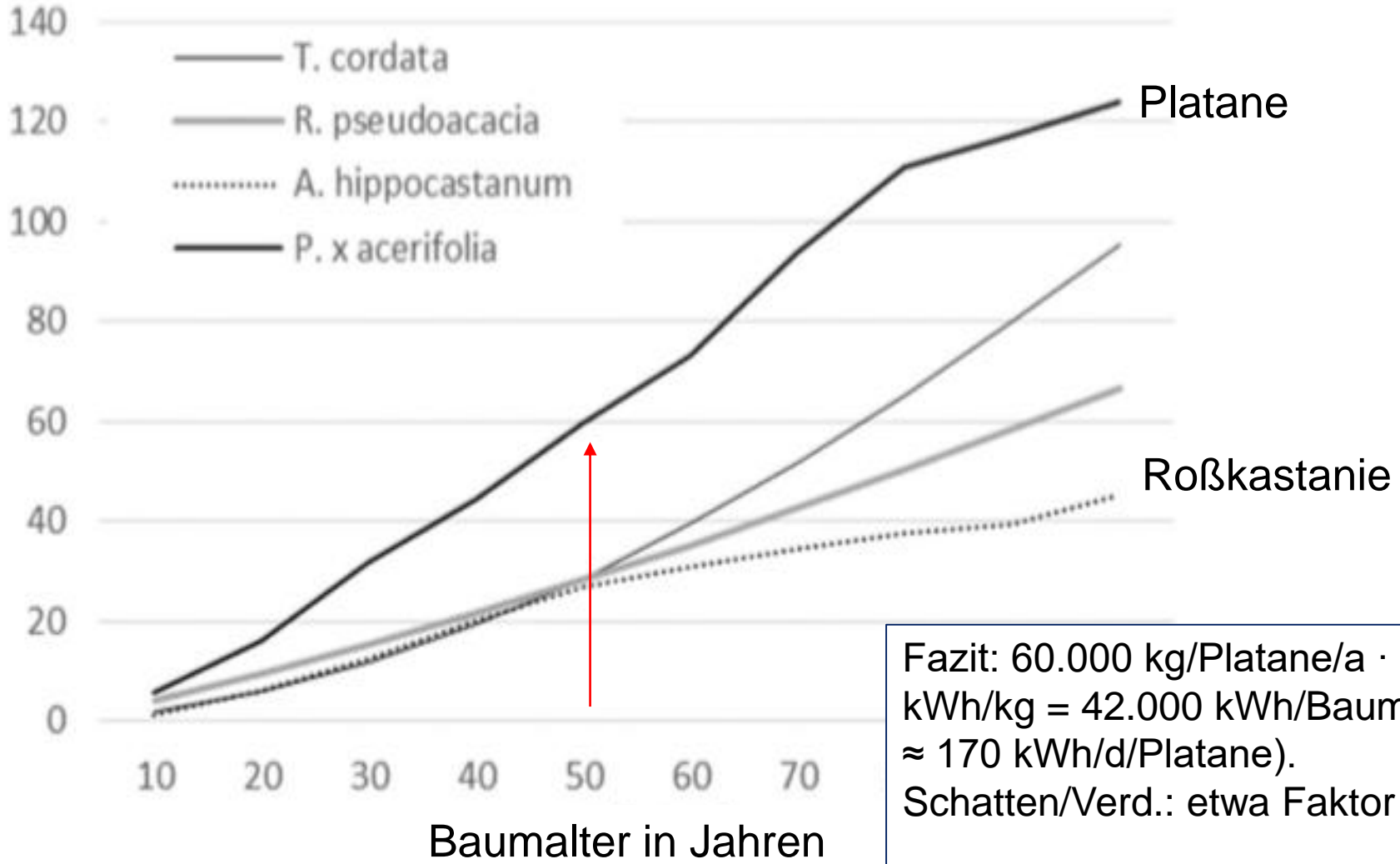


Fazit: $\Delta t = 15$ K ergibt
100 W/m² (S-Platane)
geringere Leistung; d.h.,
480 kWh/Platane/d an
Kühlungsenergie

(Quelle: Rötzer et al. 2019)

Mittlere jährliche Verdunstungsmengen (in m³/Baum) von Platane,³² Linde, Robinie und Roßkastanie in Abhängigkeit ihres Alters (Analysezeitraum: 1965 - 2015)

Verdunstungsmenge in m³/Baum



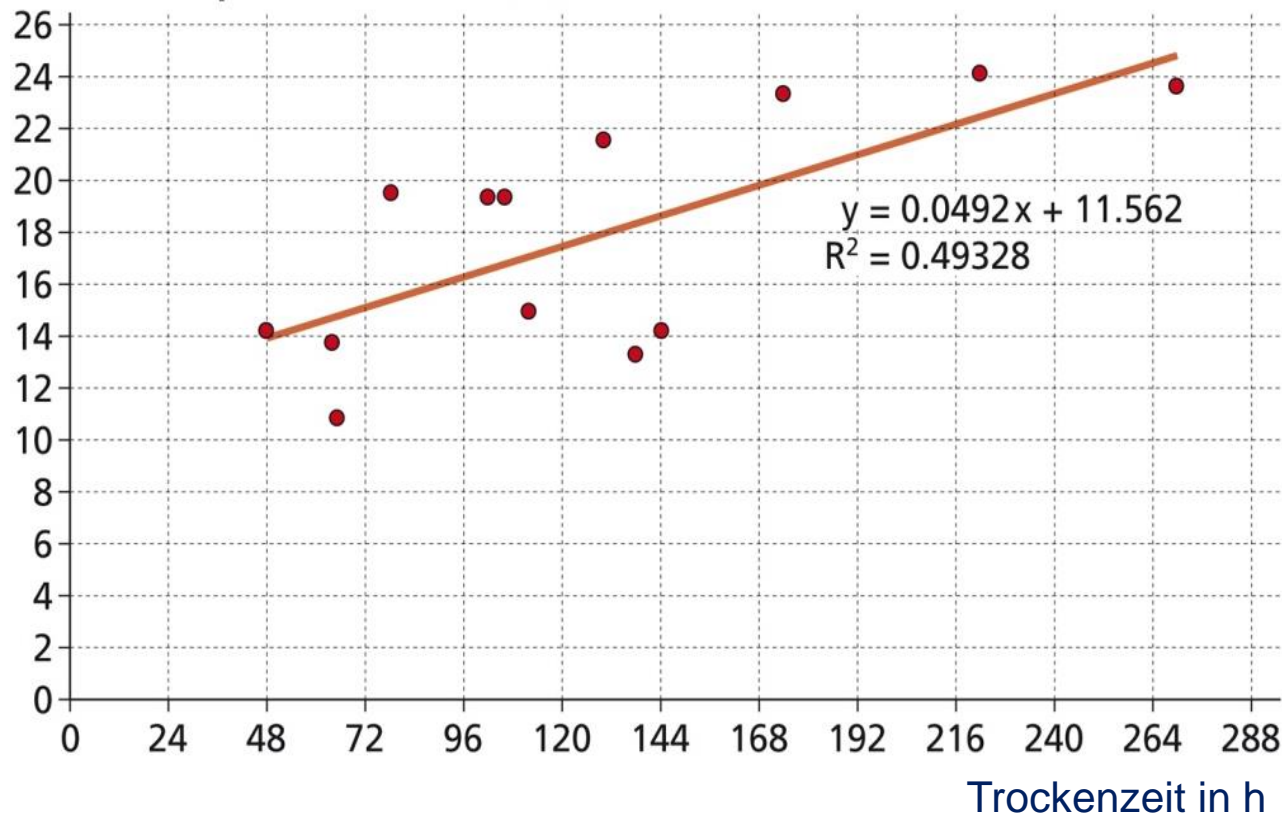
(Quelle: Rötzer et al. 2019)

Fazit: 60.000 kg/Platane/a · 0,7 kWh/kg = 42.000 kWh/Baum/a = ≈ 170 kWh/d/Platane).
 Schatten/Verd.: etwa Faktor < 3

Grünflächen bewässern

Oberflächentemperatur einer nach einem Niederschlagsereignis trockenfallenden Rasenfläche in der Stadt

Oberflächentemperatur in °C



1) 16., 22., 23., 26., 28., 30.09.; 15., 17., 21., 24., 27., 31.10. 2011

Standort: Klimastation der UDE



$$t_s: 14 \text{ °C} = 287 \text{ K} = 385 \text{ W/m}^2$$

$$t_s: 24 \text{ °C} = 297 \text{ K} = 441 \text{ W/m}^2$$

$$t_{s\ 14}: 4,6 \text{ kWh/m}^2$$

$$t_{s\ 24}: 5,3 \text{ kWh/m}^2$$

(Quelle: Kuttler 2013)

Oberflächen und Luft befeuchten



Source: Choo, 2007.

Traditionelles Uchimizu Ereignis (Wassersprenkeln) in Tokio gegen Sommerhitze

Wassernebel-Kühlsystem in Hiroshima, Japan



(Foto: J. Baumüller, 2012)

Luftleitbahnen zwischen Stadt und Umland sicherstellen



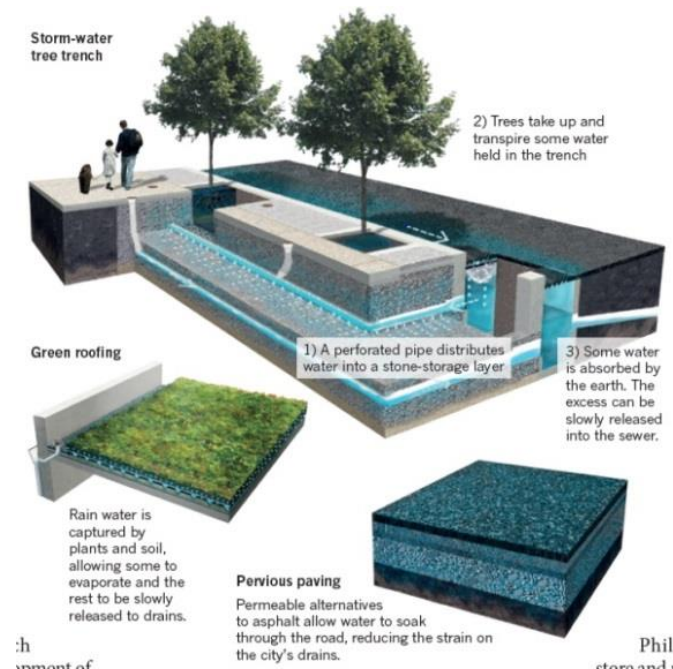
(Foto: W. Kuttler)

(Foto: W. Kuttler)

Starkregenmanagement

Starkregen bewältigen

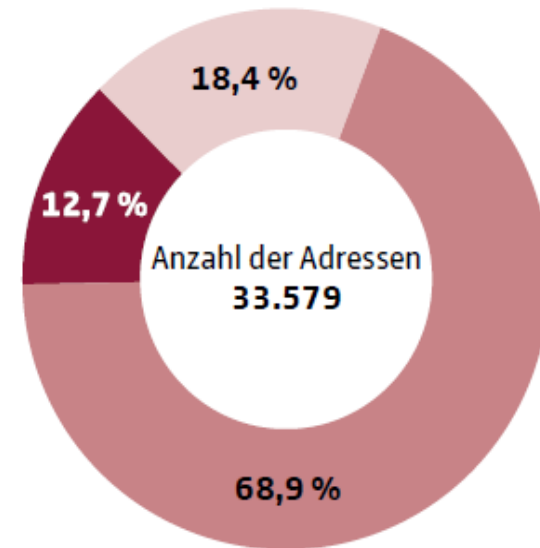
- Rückbau versiegelter Flächen
- Verbesserung der Regenwasserversickerung (auf Bodenzusammensetzung achten, Rigolen anlegen)
- Bau unterirdischer Regenwasserzweischenspeicher („Sponge Cities“)
- Kontrollierte oberirdische Wasserspeicherung in Tunneln, Senken und auf Straßen (Bordsteine erhöhen), etc.
- Abflüsse sichern
- Rückstauklappen einbauen



Starkregengefährdungskarte

Hagen

Verteilung der Adressen auf die Starkregengefährdungsklassen – SGK [%]



SGK1 geringere Gefährdung

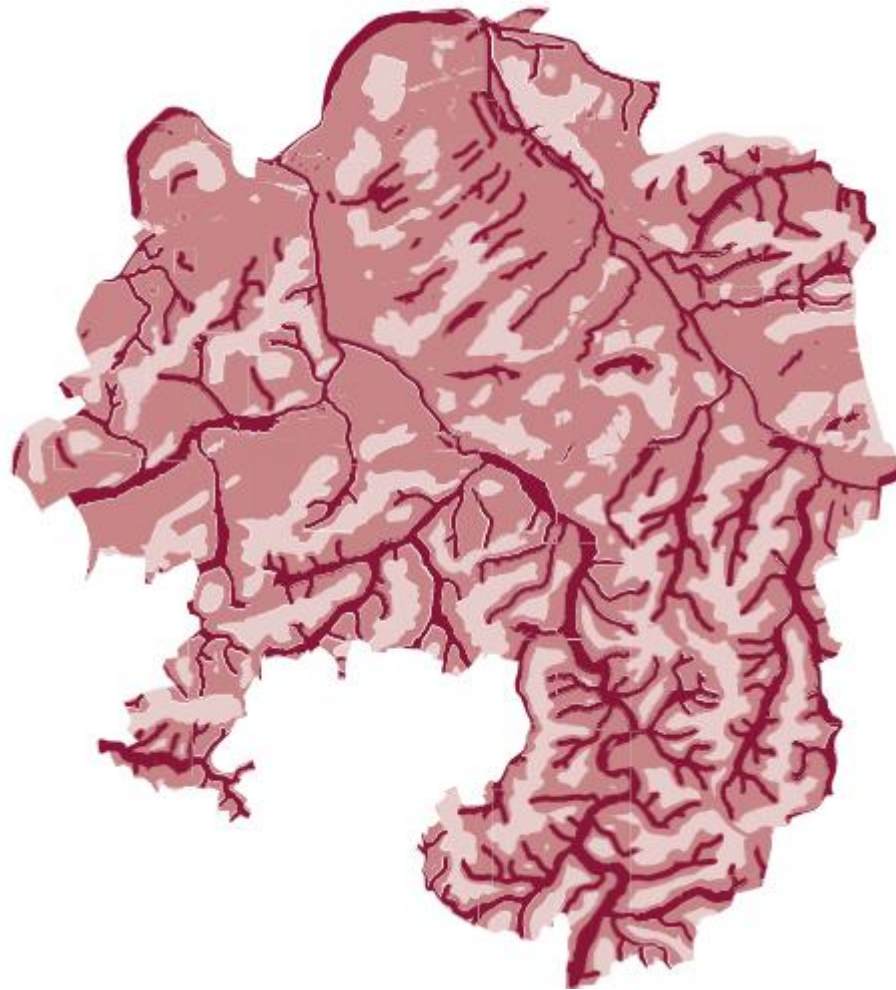
Gebäude liegt auf einer Kuppe oder am oberen Bereich eines Hangs

SGK2 mittlere Gefährdung

Gebäude liegt in der Ebene oder im unteren / mittleren Bereich eines Hangs, aber nicht in der Nähe eines Bachs

SGK3 hohe Gefährdung

Gebäude liegt im Tal oder in der Nähe eines Bachs



Zusammenfassung potenzieller Maßnahmen (1)

- **Perforierte Bauweise (hoch verdichtet, jedoch mit ausreichenden Grün- und Freiflächen versehen), Verschattungsmöglichkeiten, Bevorzugung von Passiv- und Plus-Energiehäusern**
(→ *minimaler Energieverbrauch im Sommer und Winter; Reduktion der CO₂-Emission*)
- **Stadt der kurzen Wege und optimale Anbindung an Personennahverkehr**
(→ *Reduktion von Kfz- und CO₂-Emissionen*)
- **Unterbindung/Reduzierung des suburbanen Wachstums („urban sprawl“)**
(→ *Sicherstellung der ruralen Kalt- und Frischluftproduktion; keine Ausweitung der urbanen Überwärmung*)

Zusammenfassung potenzieller Maßnahmen (1)

- **Urbane Durchgrünung (Dach, Fassade, ebenerdig) mit „low emitter“ Pflanzen; stärker wintergrüne Pflanzen berücksichtigen (auch zur Staubbindung)**
(→ *Reduktion der Oberflächen- und Lufttemperaturen sowie der biogenen Ozonvorläufergase*)
- **Bodennahe Durchlüftung bei Schwachwindlagen bis in die Innenstädte garantieren**
(→ *Frisch- und Kaltlufttransport aus dem ruralen Umland*)
- **Sinnvoller Einsatz regenerativer Energien**
(→ *Reduktion der CO₂ - Emission*)

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Umweltmeteorologie
Stadtentwicklung im Klimawandel
Environmental meteorology
Urban development in view of climate change

VDI 3787
Blatt 8 / Part 8

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Der Entwurf dieser Richtlinie wurde mit Ankündigung im Bundesanzeiger einem öffentlichen Einspruchsverfahren unterworfen.

The draft of this standard has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung.....	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	2
2 Auswirkungen des globalen Klimawandels auf urbane Siedlungsräume.....	3
2.1 Klimawandel global und regional.....	3
2.2 Stadtklima.....	8
3 Anforderungen an die Stadtentwicklung der Zukunft.....	17
4 Analyse der Auswirkungen des Klimawandels.....	20
4.1 Identifizierung hitzegefährdeter Siedlungsräume.....	23
4.2 Identifizierung von durch Starkregen/Hochwasser gefährdeter Räume.....	25
4.3 Identifizierung von durch Wind gefährdeter Räume.....	26

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	2
2 Impacts of global climate change on urban settlement areas.....	3
2.1 Global and regional climate change.....	3
2.2 Urban climate.....	8
3 Future urban development requirements.....	17
4 Analysis of the impacts of climate change.....	20
4.1 Identifying settlements at risk of overheating.....	23
4.2 Identifying areas at risk of heavy rainfall/flooding.....	25
4.3 Identifying areas susceptible to wind.....	26

Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit

DAS KLIMA VON ESSEN THE CLIMATE OF ESSEN

W. Kuttler, A. Miethke,
D. Dütemeyer, A.-B. Barlag



WESTARP
WISSENSCHAFTEN

(wikutt@outlook.de)