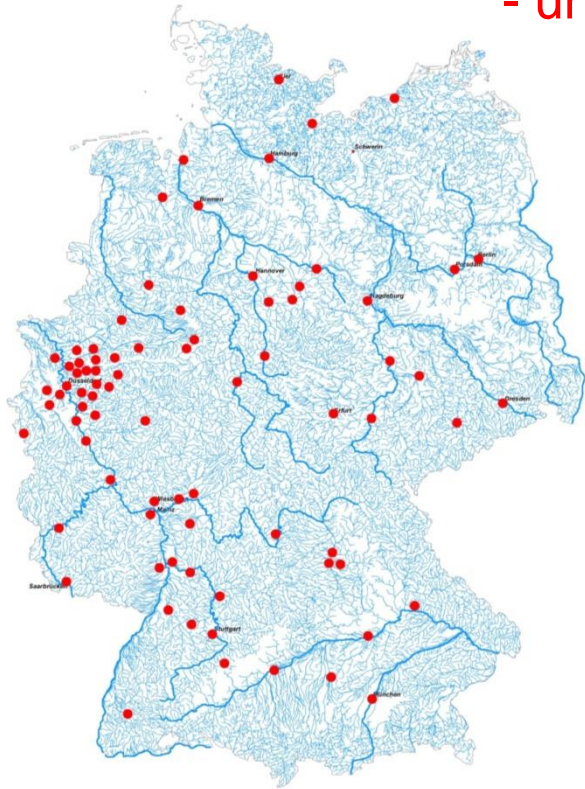


Das Fließgewässerpotenzial in den 80 deutschen Großstädten



- und die Rolle der Wasserkraft zu dessen Erschließung -



- Einwohner- und Flächenstruktur in Deutschland
- Wärmebedarf und Temperaturbereiche
- Gewässernetz und Verteilung Fließgewässer
- Wärmepotenzial Fließgewässer
- Temperaturentwicklung Fließgewässer
- Wärmepotenzial aus Fließgewässern in den 80 Großstädten
- Potenzial zur Fließgewässerwärmegewinnung aus Wasserkraftanlagen in den 80 Großstädten



Technische Universität Braunschweig
Arbeitsgruppe Regenerative Energien
Institut für Statik und Dynamik

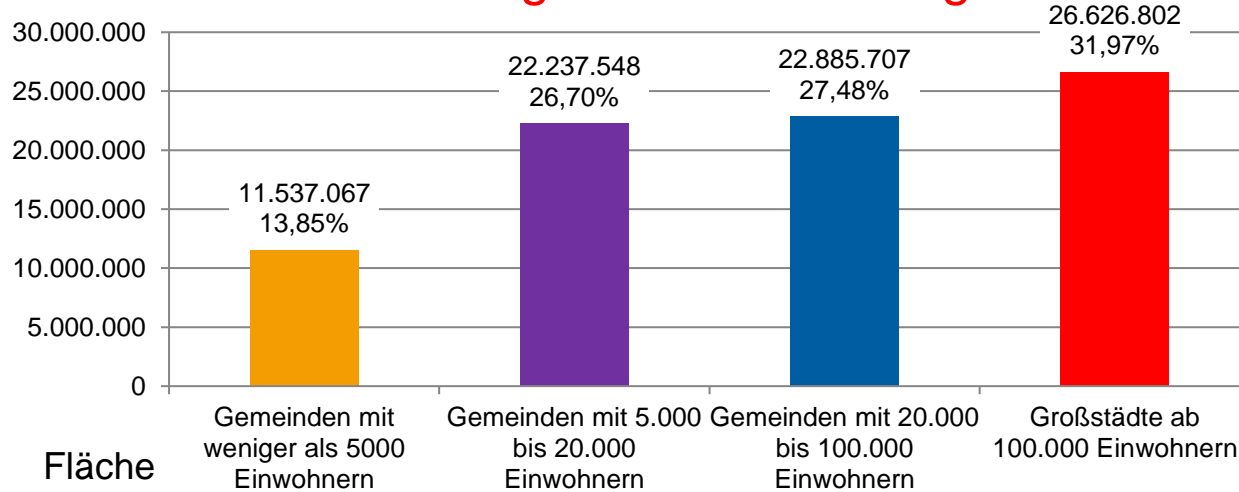
Gefördert durch:

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

Einwohner- und Flächenstruktur in Deutschland

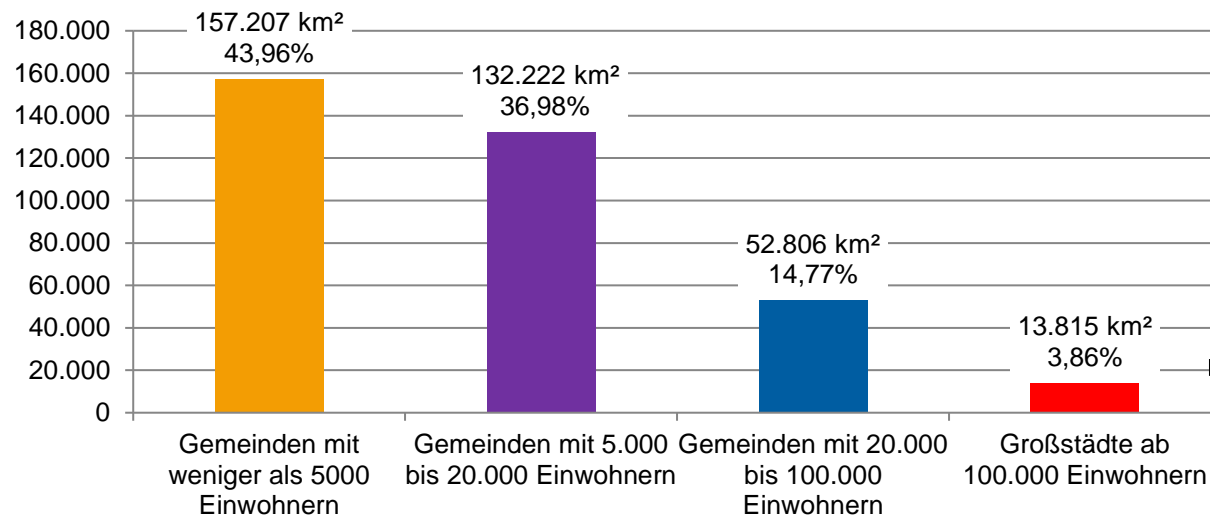
Einwohneranzahl Einteilung nach Gemeindegrößenklassen



Einwohnerstruktur der Gemeinden in Deutschland

- 80 Großstädte
- 614 Mittelstädte
- 2.261 Kleinstädte/D
- 7.830 Dörfer/KlSt

Fläche in [km²]



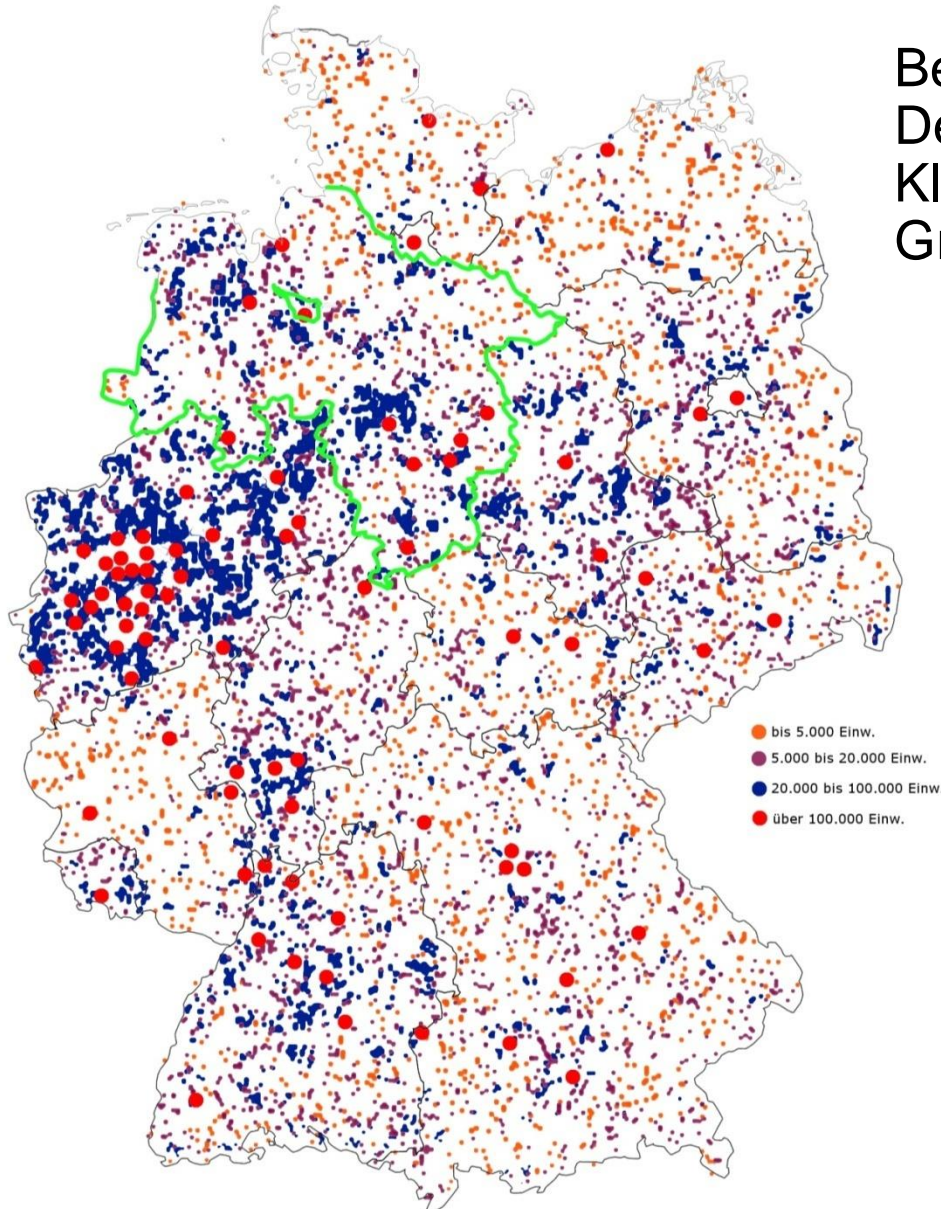
Flächenstruktur der Gemeinden in Deutschland

- 2.057 Städte
- 8.732 Dörfer

Großer Wärmebedarf bei geringer Fläche

→ 32 % der Bevölkerung auf 3,85 % Fläche von Deutschland

Einwohner- und Flächenstruktur in Deutschland



Bevölkerungsverteilung in Deutschland nach Groß-, Mittel- und Kleinstädten sowie Dörfern mit Grenzen der Bundesländer

1. Nordrhein-Westfalen

30 Großstädte

178 Mittelstädte

2. Baden-Württemberg

9 Großstädte

94 Mittelstädte

3. Niedersachsen

8 Großstädte

82 Mittelstädte

4. Bayern

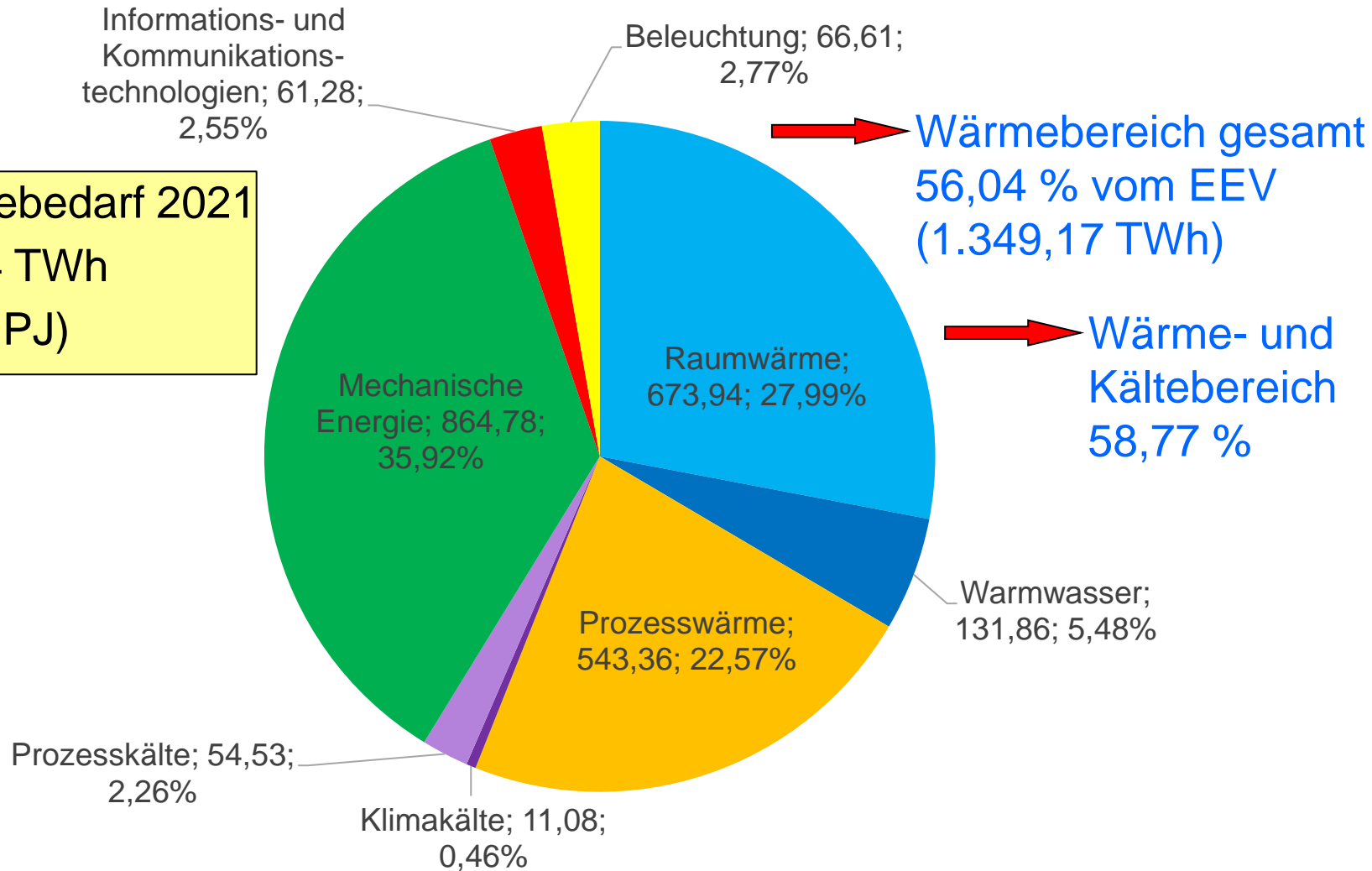
8 Großstädte

67 Mittelstädte

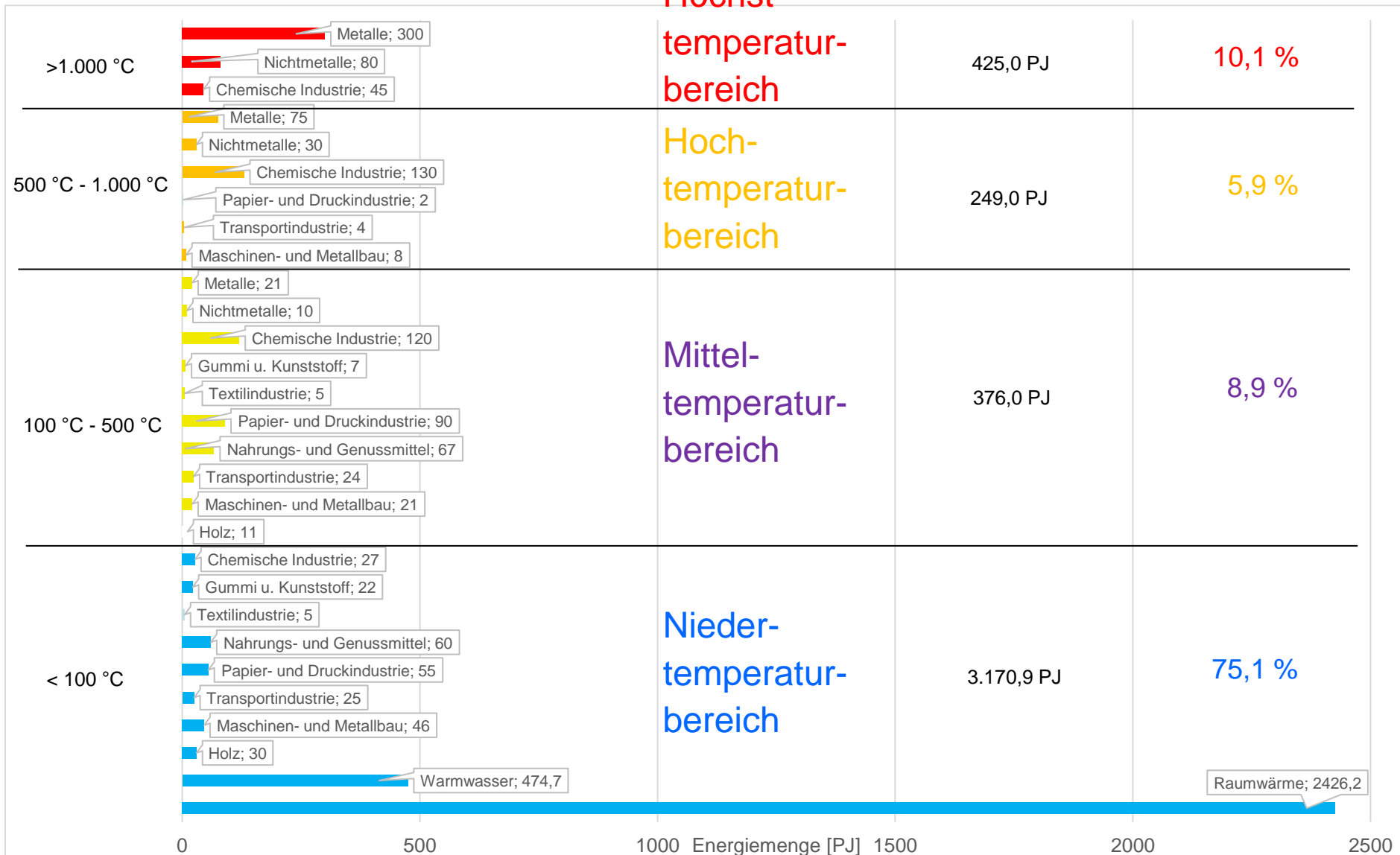
Endenergiebedarf in Deutschland

Endenergieverbrauch (EEV) in Deutschland 2021 in [TWh]

Endenergiebedarf 2021
2.407,44 TWh
(8.666,8 PJ)



Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Anwendungen



Energieverbrauch nach Wärmebereichen

Niedertemperaturbereich:

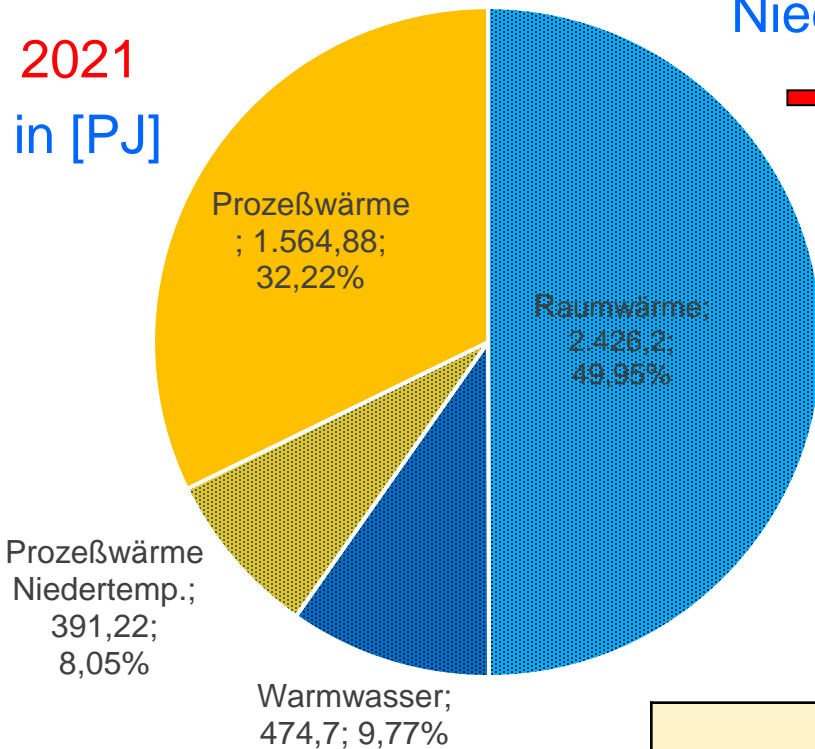
→ 67,8 % des Wärmebedarfs liegen im Niedertemperaturbereich

→ d.h. 914,5 TWh

→ 38 % des Endenergiebedarfs

Hoch- und Mitteltemperaturbereich:

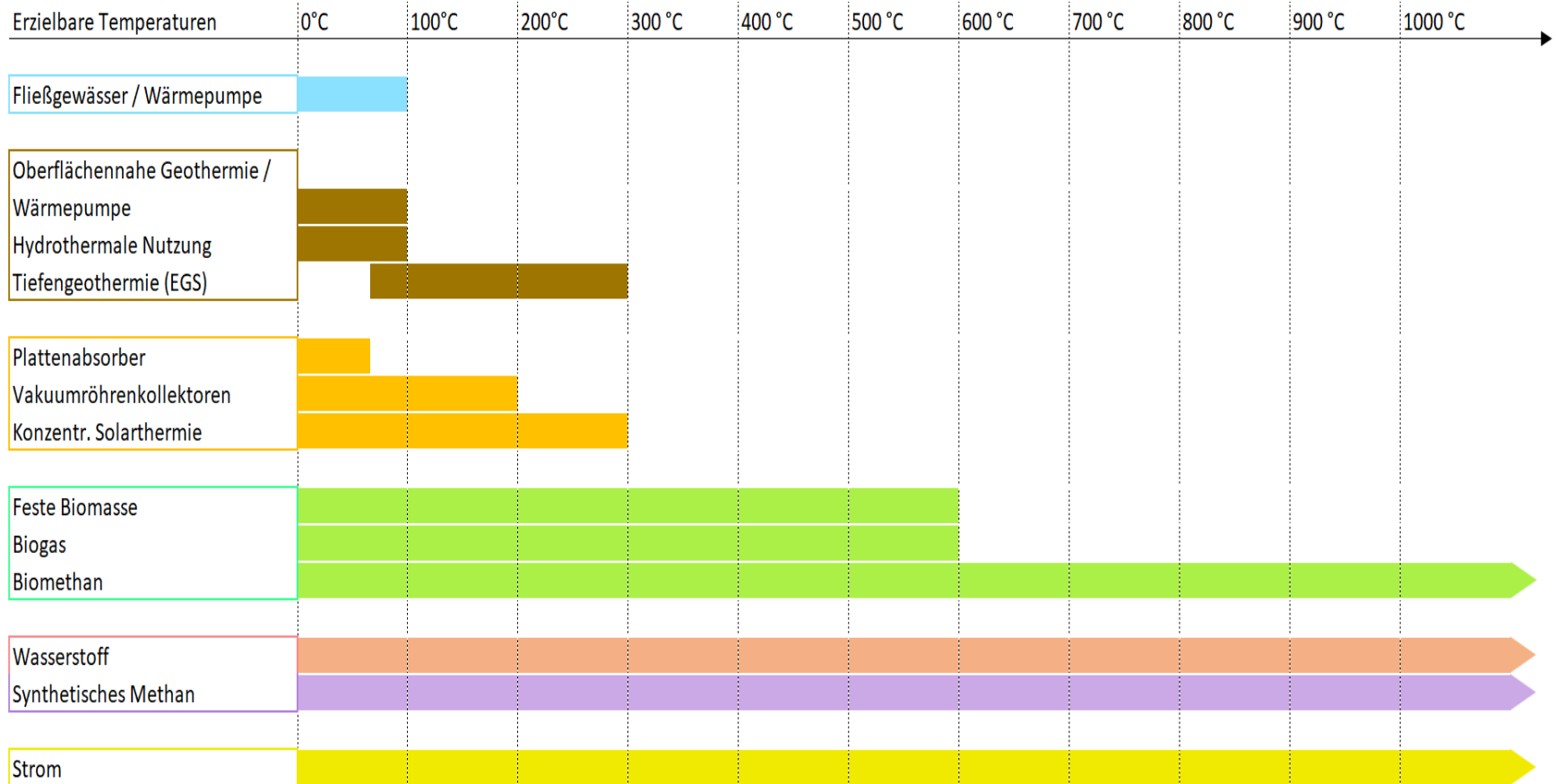
→ 32,2 % des Wärmebedarfs



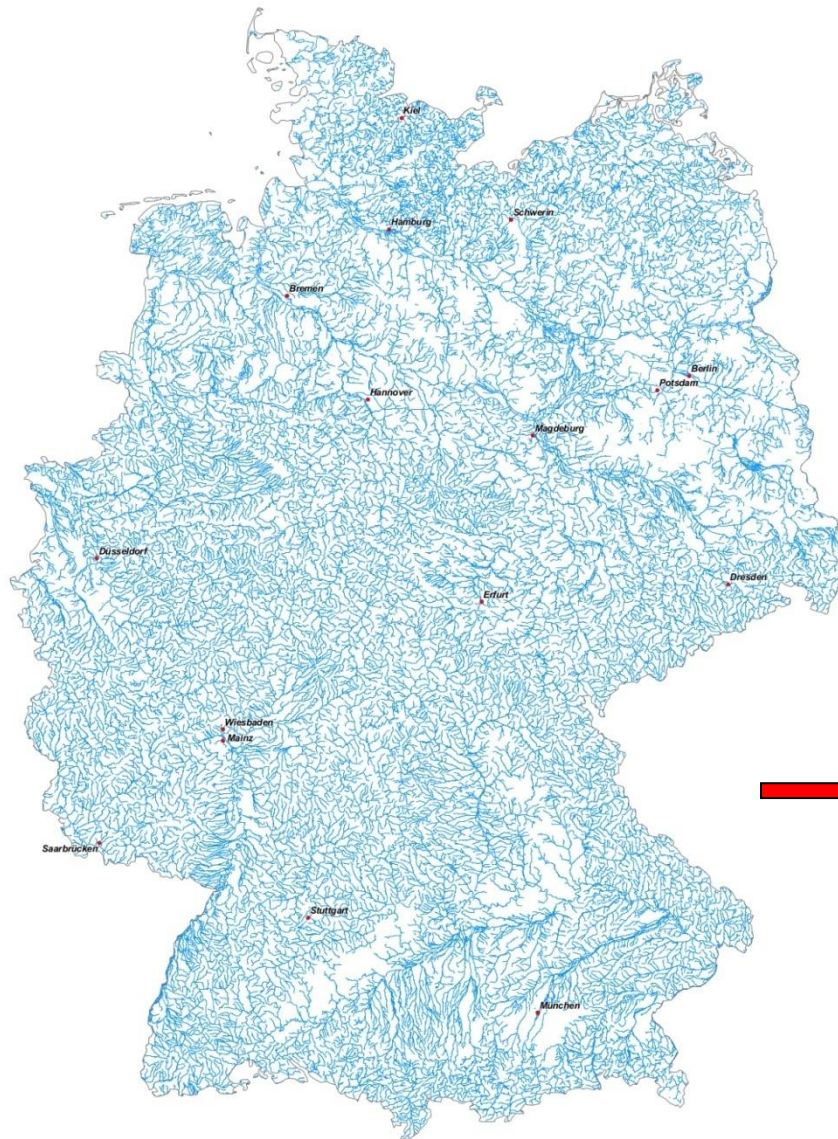
20 % der Prozesswärme sind im Niedertemperaturbereich

Wärmebereich	Wärmebedarf		
	in [PJ]	in [TWh]	in [%]
Raumwärme	2.426,2	673,94	49,95
Warmwasser	474,7	131,86	9,77
Prozesswärme			
Niedertemperaturbereich	391,22	108,67	8,05
Teilsumme	3.292,12	914,48	67,78
Prozesswärme höhere Temperaturbereiche	1.564,88	434,69	32,22
Gesamtsumme	4.857,1	1.349,17	100,00

Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Wärmequellen



Gewässernetz in Deutschland



400.000 km Fließgewässernetz

- 141.726 km Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ (35,43 %)
- 258.274 km Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$ (64,57 %)



Flächendeckend, dezentral und ganzjährige Verfügbarkeit



Verteilung der Fließgewässer in Deutschland

Gesamtlänge der Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$

Nr.	Bundesland	Länge Fließgewässer mit $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ [34] [km]	Fläche Bundesland [km ²]	Flächen- schlüssel [km/km ²]
1	Bayern	25.510	70.550	0,3616
2	Niedersachsen	22.557	47.616	0,4737
3	Nordrhein-Westfalen	13.878	34.113	0,4068
4	Baden-Württemberg	13.176	35.751	0,3685
5	Brandenburg	11.485	29.654	0,3873
6	Hessen	8.320	21.115	0,3940
7	Sachsen-Anhalt	8.131	20.452	0,3976
8	Mecklenburg-Vorpommern	7.971	23.213	0,3434
9	Rheinland-Pfalz	7.876	19.854	0,3967
10	Schleswig-Holstein	7.486	15.802	0,4737
11	Sachsen	7.286	18.450	0,3949
12	Thüringen	6.022	16.202	0,3717
13	Saarland	911	2569	0,3546
14	Hamburg	498	755	0,6596
15	Berlin	345	892	0,3868
16	Bremen	274	419	0,6539
	Gesamtlänge	141.726	357.407	0,3965
	Gesamtlänge Gewässer	400.000		1,1192
	Gewässer $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$	258.274		0,7226

➡ auf 1 km² kommen in Deutschland 1.119,2 m Fließgewässer

➡ davon 722,6 m kleine und 396,5 m Gewässer mit $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$

mittlerer Durchfluss und Durchflussvariabilität

Der Gewässerabfluss ist verhältnismäßig gleich verteilt:

- ca. 2/3 des Abflusses erfolgen im Winterhalbjahr
- ca. 1/3 des Abflusses erfolgen im Sommerhalbjahr

➔ Ausnahme alpiner Bereich

hier erfolgt der Hauptabfluss im Sommerhalbjahr

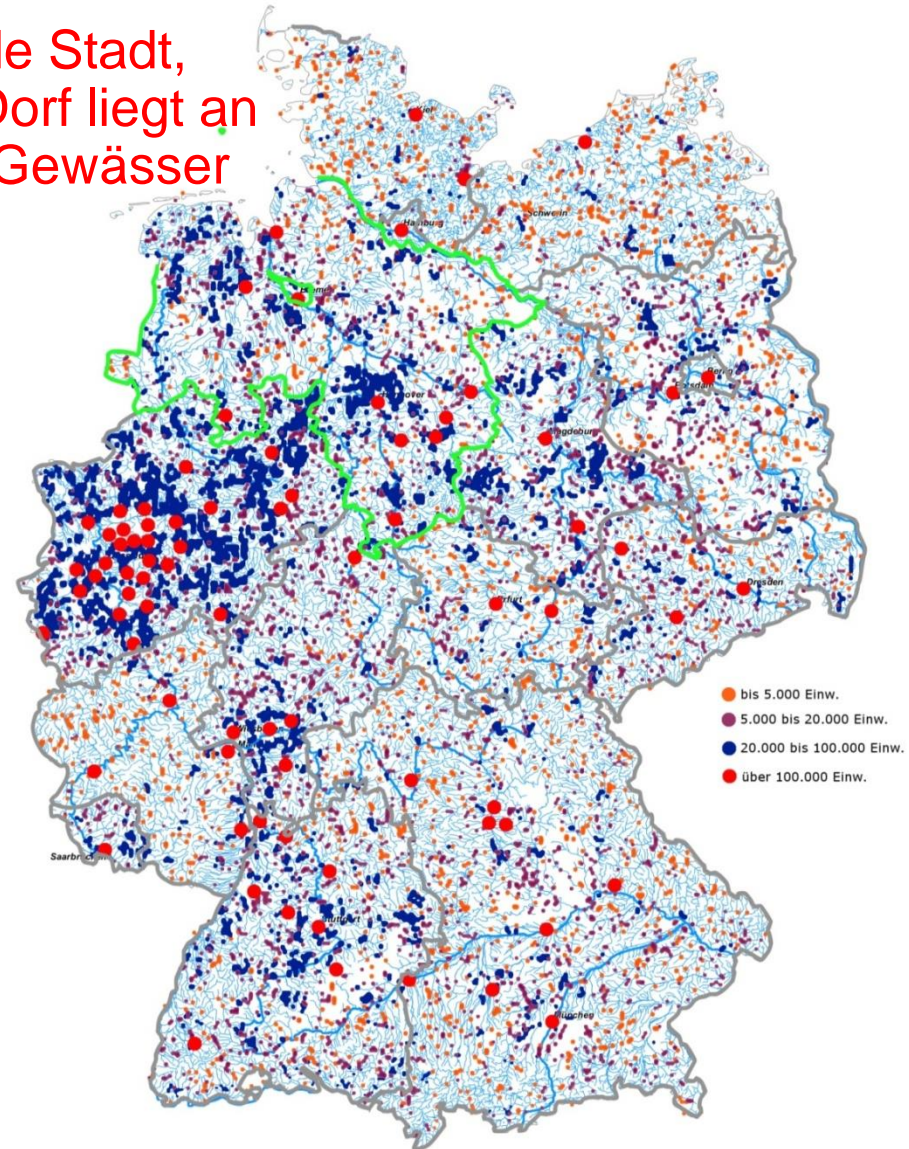
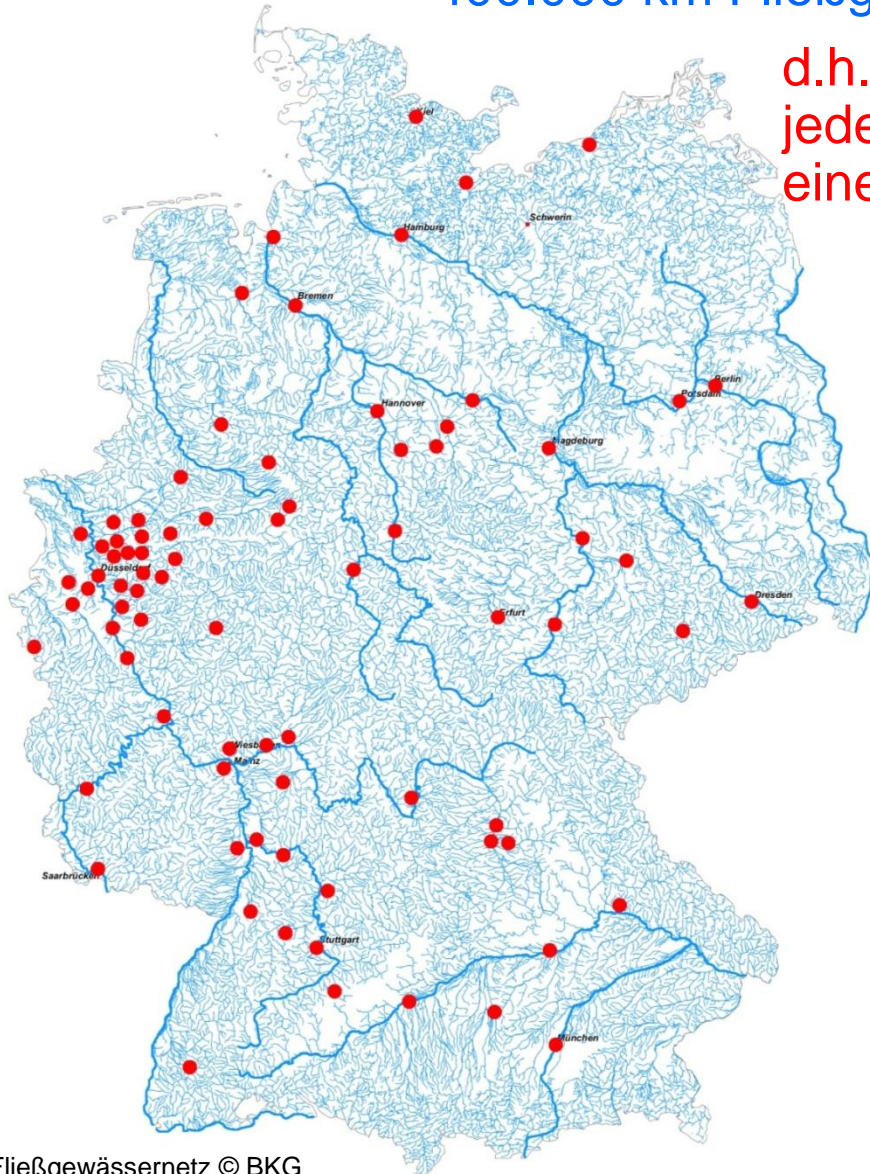


Gewässernetz und Verteilung der Gemeinden in Deutschland



400.000 km Fließgewässernetz

d.h. jede Stadt,
jedes Dorf liegt an
einem Gewässer



- bis 5.000 Einw.
- 5.000 bis 20.000 Einw.
- 20.000 bis 100.000 Einw.
- über 100.000 Einw.

Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland



mittlerer Abfluss über die
Gebietsgrenzen ca. $5.870 \text{ m}^3/\text{s}$

185 Milliarden m^3 jährlicher Abfluss

Wärmepotenzial aus Fließgewässern
in Deutschland **430-646 TWh/a**

($\Delta T = 2$ bis 3 K) – bei
Zweifachnutzung **860 bis 1.300 TWh/a**
möglich

100 bis 150 GW thermische Leistung

➡ **d.h. Fließgewässer können:**

- 94 % des Wärmebedarfs im
Niedertemperaturbereich
- 64 % des Gesamtwärmebedarfs
- 35,8 % des Endenergiebedarfs in
Deutschland liefern

Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

Aquathermiepotenzial

Gesamtjahr							
Abfluss- charak- teristik	Abfluss Deutschland [m³/s]	<i>delta T</i> 1,0 K	<i>delta T</i> 2,0 K	<i>delta T</i> 3,0 K	<i>delta T</i> 1,0 K	<i>delta T</i> 2,0 K	<i>delta T</i> 3,0 K
		Wärmeleistung [MW]			Wärmeerzeugung Gesamtjahr [TWh]		
MQ	5.868,13	Einfach-Entnahme					
		24.587	49.175	73.762	215,386	430,773	646,159
		Zweifach-Entnahme					
		49.175	98.350	147.525	430,773	861,545	1.292,318

Prozentuale Verteilung

Wärmepotenzial $\Delta T = 2K$	[TWh]	430,773	861,545
	2021	[%]	[%]
Endenergiebedarf	2407,44	17,89	35,79
Wärmebedarf	1349,17	31,93	63,86
Niedertemperaturbereich	914,48	47,11	94,21

Entwicklung der Wassertemperaturen der Fließgewässer



Untersuchung der Wassertemperaturentwicklung von:

- 22 Fließgewässern
- an 53 Meßpegeln



alle großen Fließgewässer in Deutschland erfasst



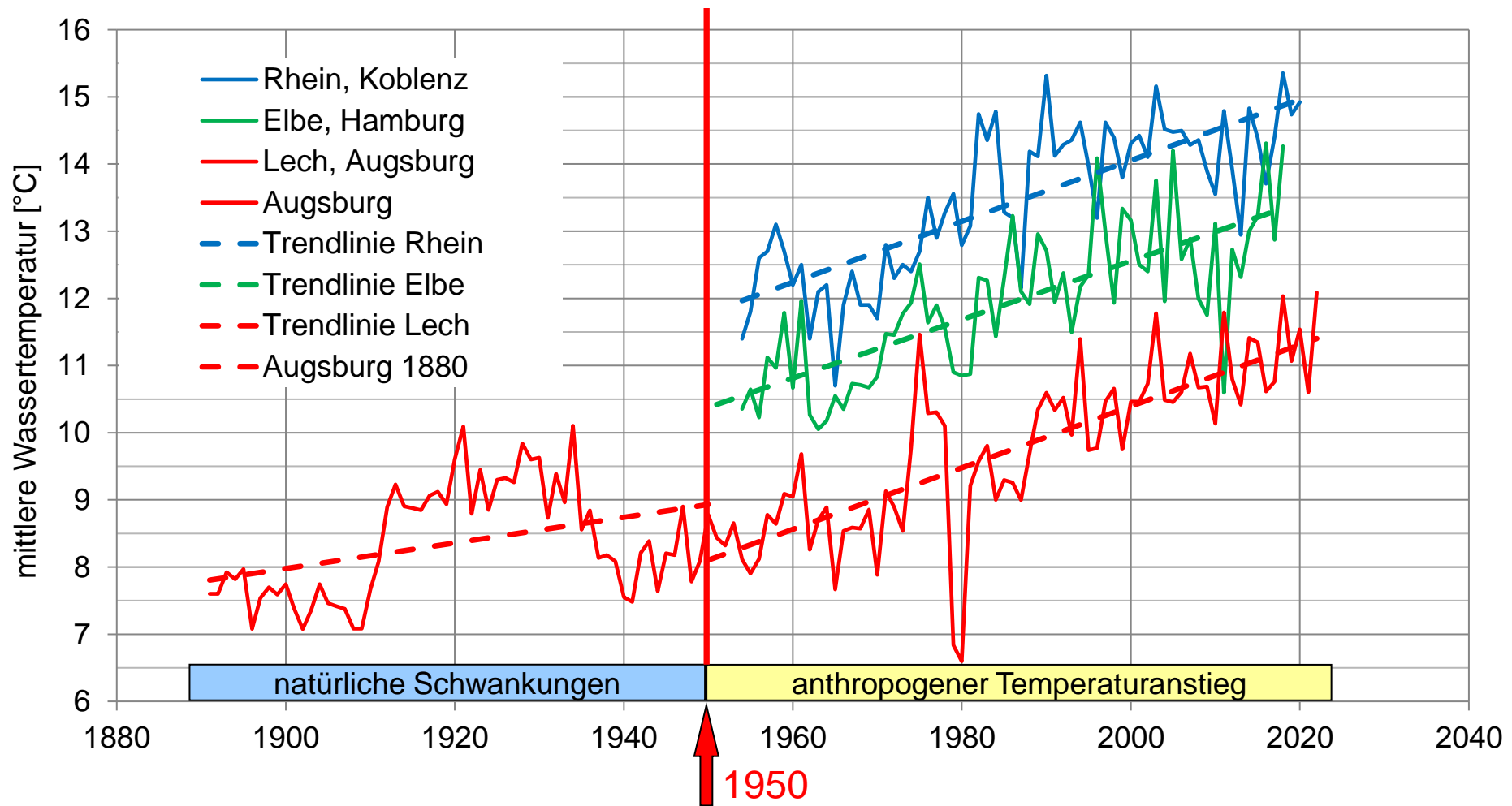
mit Ausnahme der Ems



alle Fließgewässer zeigen bezüglich der Entwicklung der Wassertemperatur den gleichen Trend

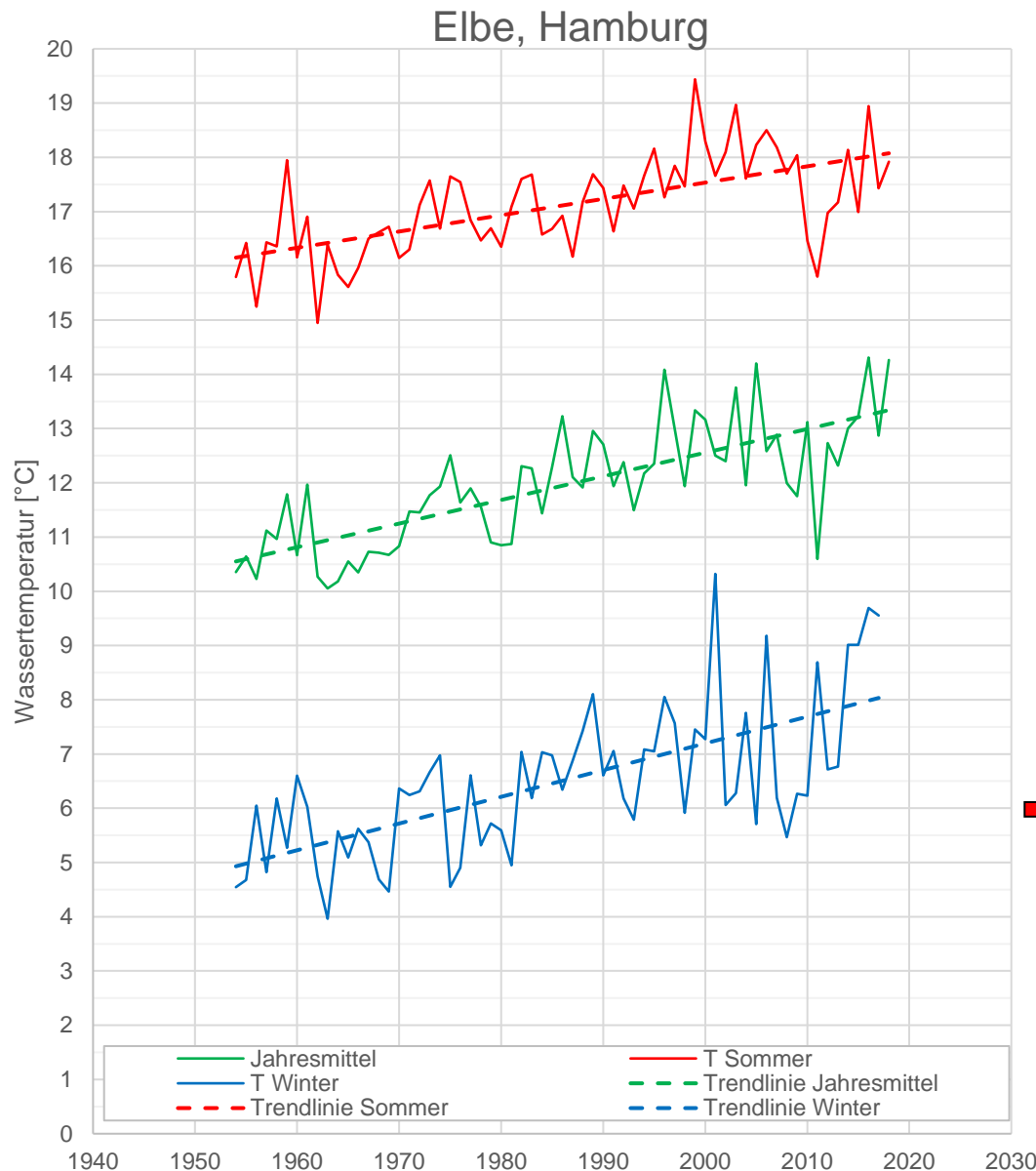
Entwicklung der Wassertemperaturen der Fließgewässer

Wassertemperaturentwicklung Rhein, Elbe und Lech



Zunahme der mittleren Temperatur der Fließgewässer in Deutschland seit 1950 um **3 bis 4°C** (bis 2050 Zunahme um weitere 1°C)

Entwicklung der Wassertemperaturen der Fließgewässer



Zunahme der mittleren Wassertemperatur

1.) Winterhalbjahr:

2 bis 3 K

2.) Sommerhalbjahr:

3 bis 5 K

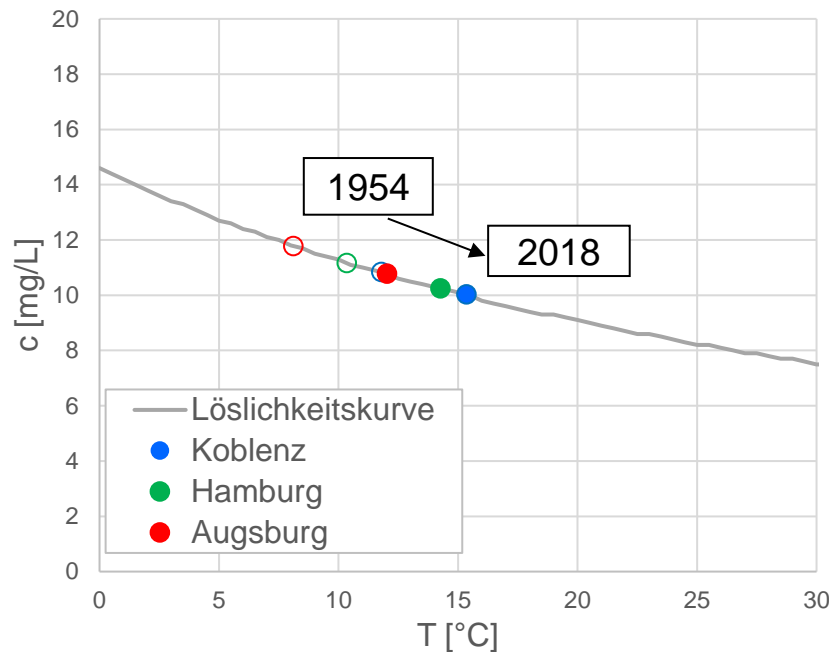


Entzugstemperatur von 2 bis 3 K ist in der Heizperiode ökologisch verträglich möglich

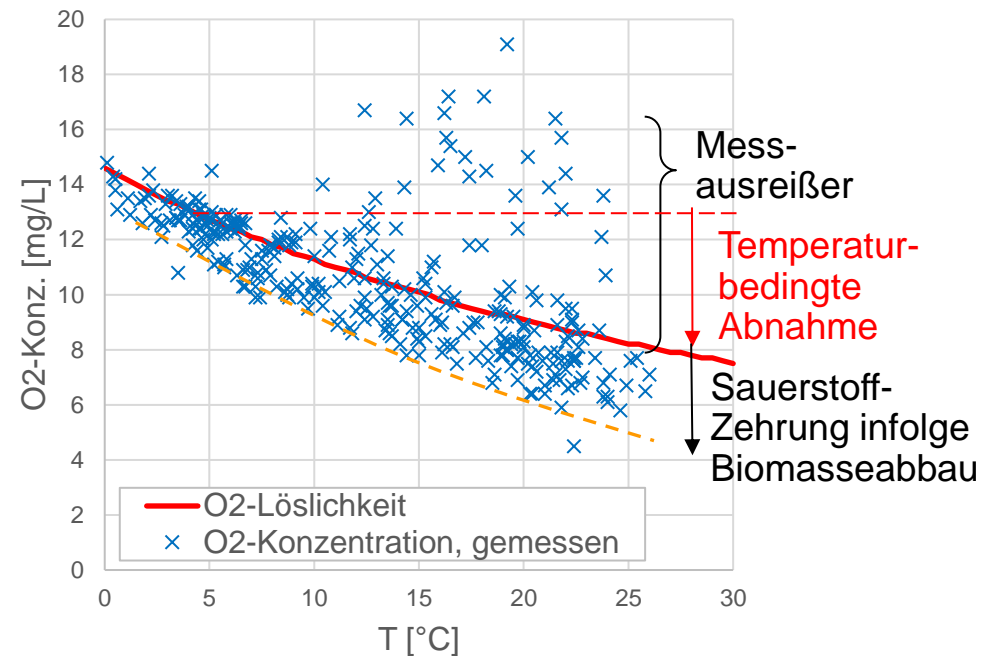
Einfluss Wassertemperaturen auf Sauerstoffgehalt

Löslichkeit des Luftsauerstoffs im Wasser in Abhängigkeit der Wassertemperaturen

Löslichkeit des Luftsauerstoff



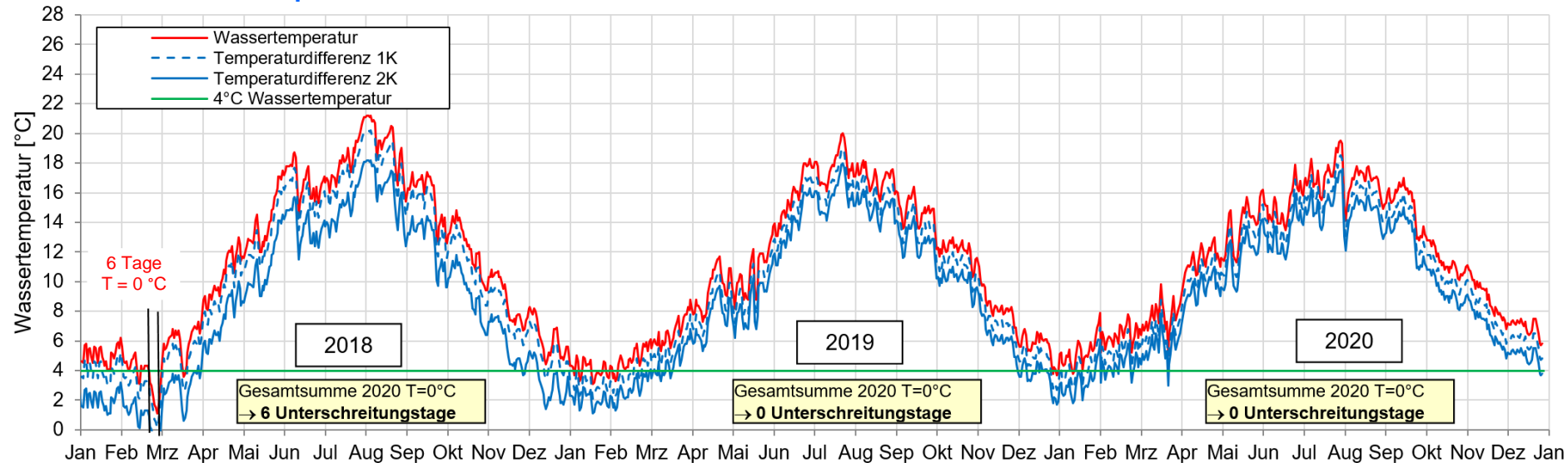
Sauerstoffkonzentration Kahl Main



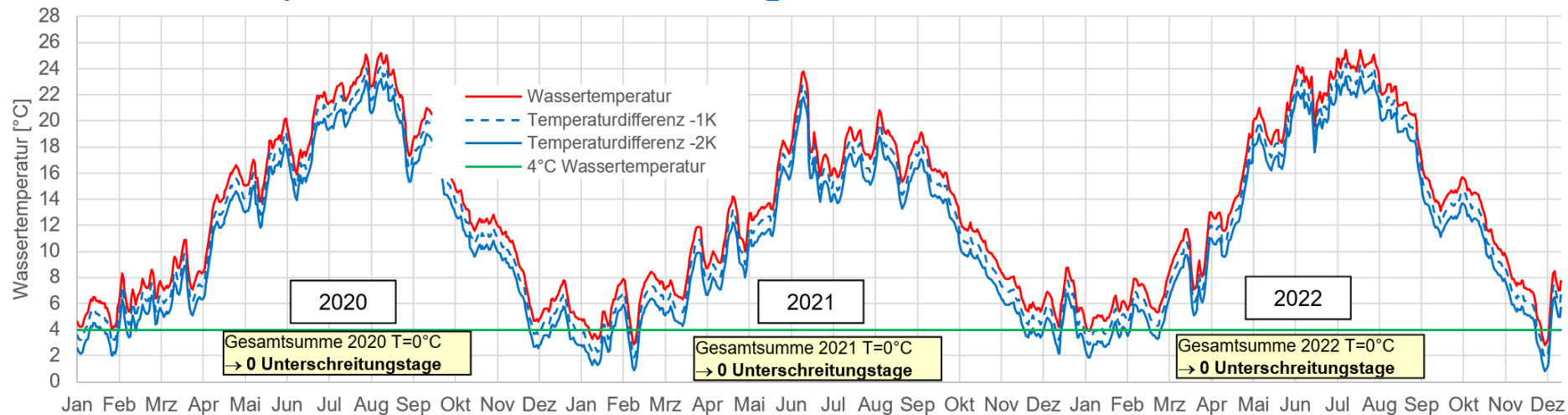
- ➔ Betrachtung eines Zeitraums von 64 Jahren
- ➔ Zunahme der mittleren Wassertemperaturen von 3,5 bis 4° C
- ➔ Abnahme des Sauerstoffgehalts von 7,5 bis 8,4 %

Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur

Gewässertemperatur der Isar in München für 2018 bis 2020

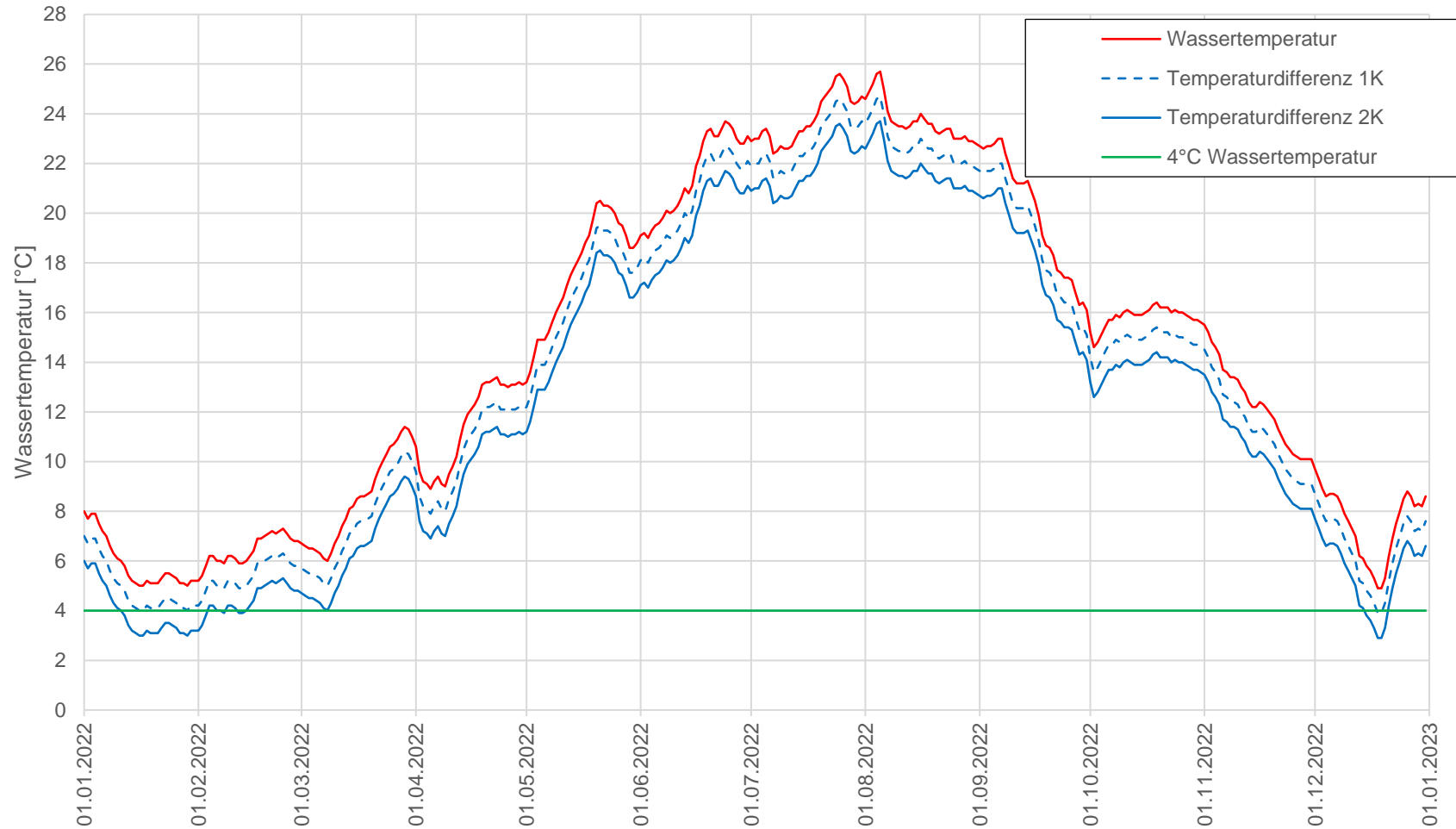


Gewässertemperatur des Neckar in Stuttgart für 2020 bis 2022



Jahresgang der Wassertemperaturen

Wassertemperatur Karlsruhe Rhein 2022





Fließgewässer-Wärmepotenzial - Betrachtung 80 Großstädte

Wärmepotenzial und Wärmebedarf für die 15 größten Städte

Nr.	Stadt	Einwohner	Fließgewässer	Wärmeleistung [MW]	Wärmeerzeugung [MWh]	Anteil an Wärmeversorgung [%]
1	Berlin	3.677.472	Spree, Havel, Panke, Dahme	654	3.325.379	16
2	Hamburg	1.853.935	Elbe	7.676	39.058.007	384
3	München	1.487.708	Isar	679	3.453.228	42
4	Köln	1.073.096	Rhein	19.552	99.478.958	1.690
5	Frankfurt a.M.	759.224	Main	2.223	11.309.676	272
6	Stuttgart	626.275	Neckar	550	2.826.592	82
7	Düsseldorf	619.477	Rhein	20.003	101.773.092	2.995
8	Leipzig	601.866	Weißer Elster, Pleiße, Parthe	269	1.368.662	41
9	Dortmund	586.852	Ruhr, Emscher	825	4.197.458	130
10	Essen	579.432	Ruhr, Emscher	1.003	5.100.998	160
11	Bremen	563.290	Weser	3.927	19.982.577	647
12	Dresden	555.351	Elbe	3.334	16.964.577	557
13	Hannover	535.932	Leine, Ihme	563	2.865.602	97
14	Nürnberg	510.632	Pegnitz	244	1.239.140	44
15	Duisburg	495.152	Rhein	20.968	106.684.725	3.928

➡ Ergebnisse für Heizperiode für Auswertung von MQ_{Winter}

➡ Ansatz der Heizperiode laut Rechtsprechung von 212 Tagen pro Jahr

➡ Gesamtwärmepotenzial pro Jahr ist nochmal größer



Fließgewässer-Wärmepotenzial - Betrachtung 80 Großstädte

Wärmepotenzial und Wärmebedarf für die 16 bis 30 größten Städte

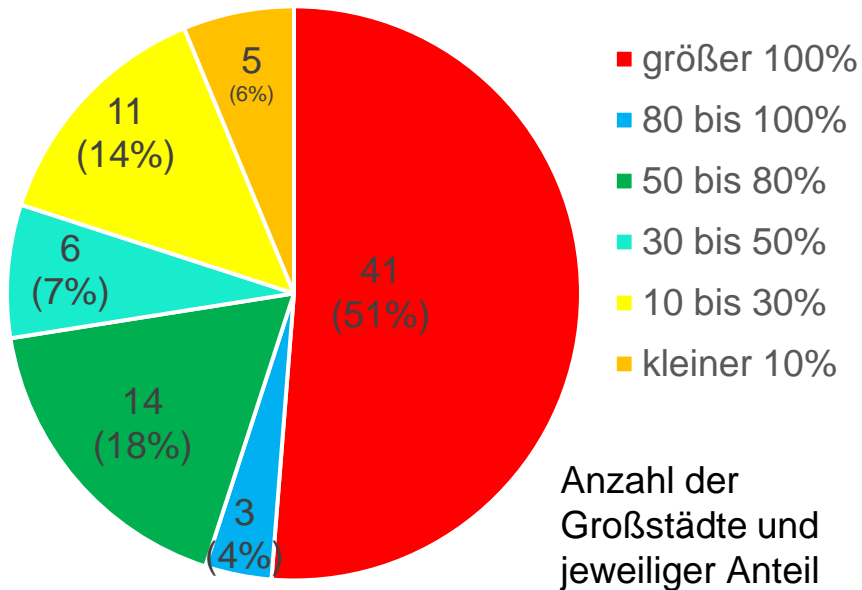
Nr.	Stadt	Einwohner	Fließgewässer	Wärmeleistung [MW]	Wärme-erzeugung [MWh]	Anteil an Wärmeversorgung [%]
16	Bochum	363.441	Ruhr	828	4.211.066	211
17	Wuppertal	354.572	Wupper	135	687.519	35
18	Bielefeld	334.002	Johannisbach / Aa	52	264.363	14
19	Bonn	331.885	Rhein	19.486	99.145.962	5.446
20	Münster	317.713	Münstersche Aa	345	1.755.812	101
21	Mannheim	311.831	Rhein, Neckar	11.478	58.398.807	3.414
22	Karlsruhe	306.502	Rhein, Alb	9.574	48.714.087	2.897
23	Augsburg	296.478	Lech	784	3.986.601	245
24	Wiesbaden	278.950	Main	13.500	68.686.825	4.489
25	Mönchengladbach	261.001	Gladbach, Niers, Schwalm	21	105.221	7
26	Gelsenkirchen	260.126	Emscher	126	640.315	45
27	Aachen	249.070	Inde, Wildbach	39	200.778	15
28	Braunschweig	248.823	Oker, Schunter, Wabe	125	635.298	47
29	Kiel	246.243	Schwentine	105	532.011	39
30	Chemnitz	243.105	Chemnitz	50	256.634	19

→ Ergebnisse für Raumwärmeversorgung Haushalte

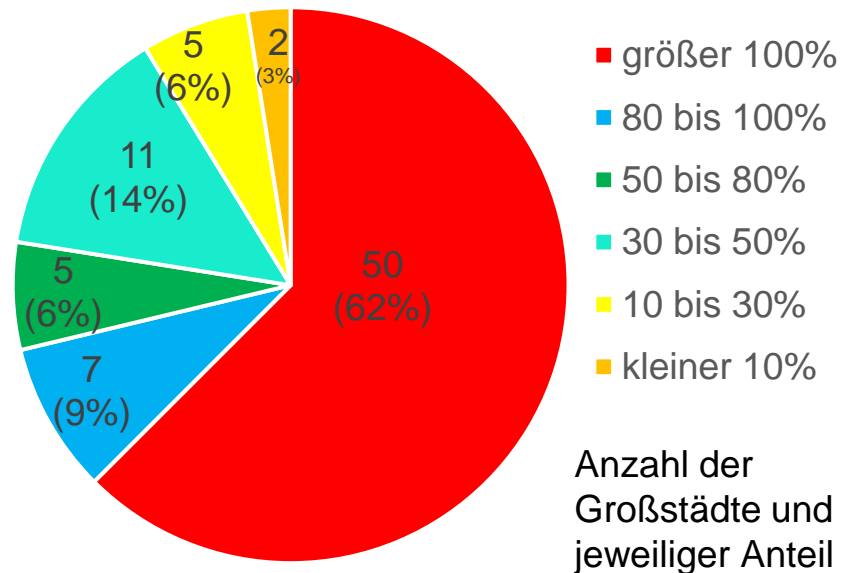
→ Auswertung für 1-mal Entnahme der Fließgewässerwärme

Auswertung 80 Großstädte

Fließgewässerwärmepotenzial bezogen auf den gesamten Raumwärmebedarf



Fließgewässerwärmepotenzial bezogen auf den Raumwärmebedarf Haushalte



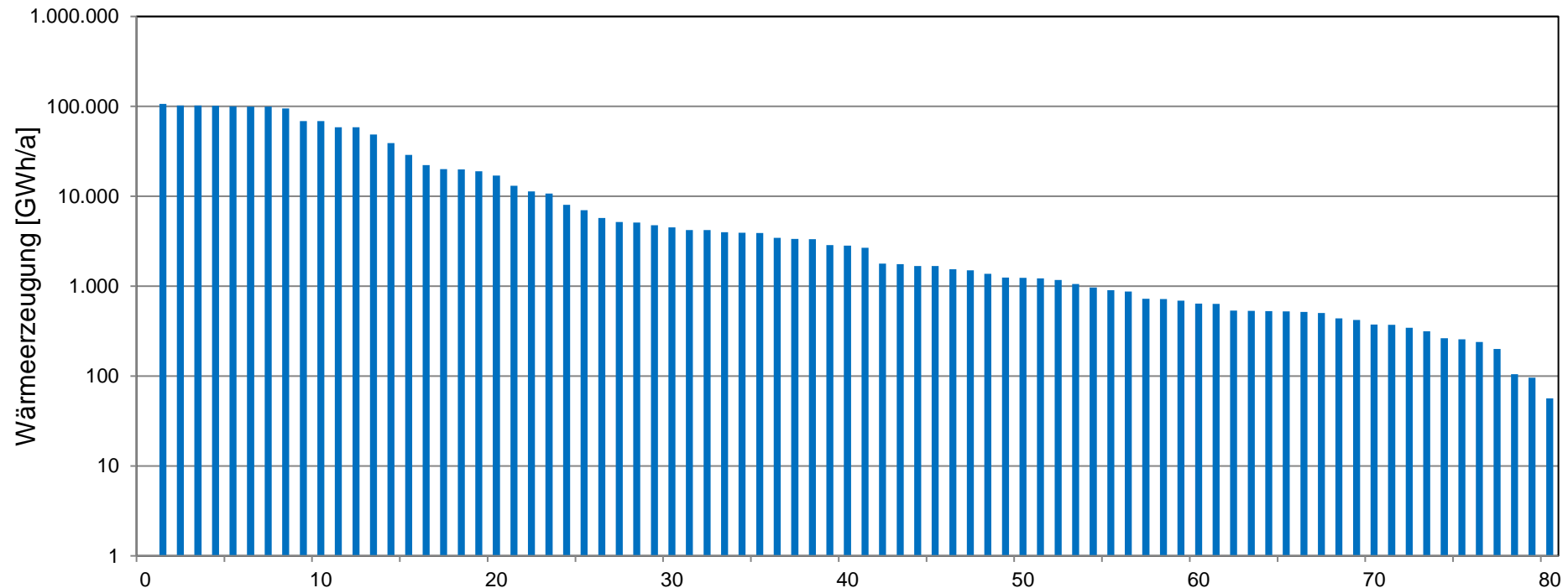
73 % der Großstädte, d.h. 58 Städte, können ihren Wärmebedarf zu über 50 % mit Aquathermie erschließen

89 % zu 20 % oder mehr

→ d.h. die Aquathermie ist für fast jede Großstadt in Deutschland von Bedeutung

Auswertung 80 Großstädte

Fließgewässerswärmepotenzial in der Heizperiode der 80 Großstädte
in Deutschland nach der Größe sortiert

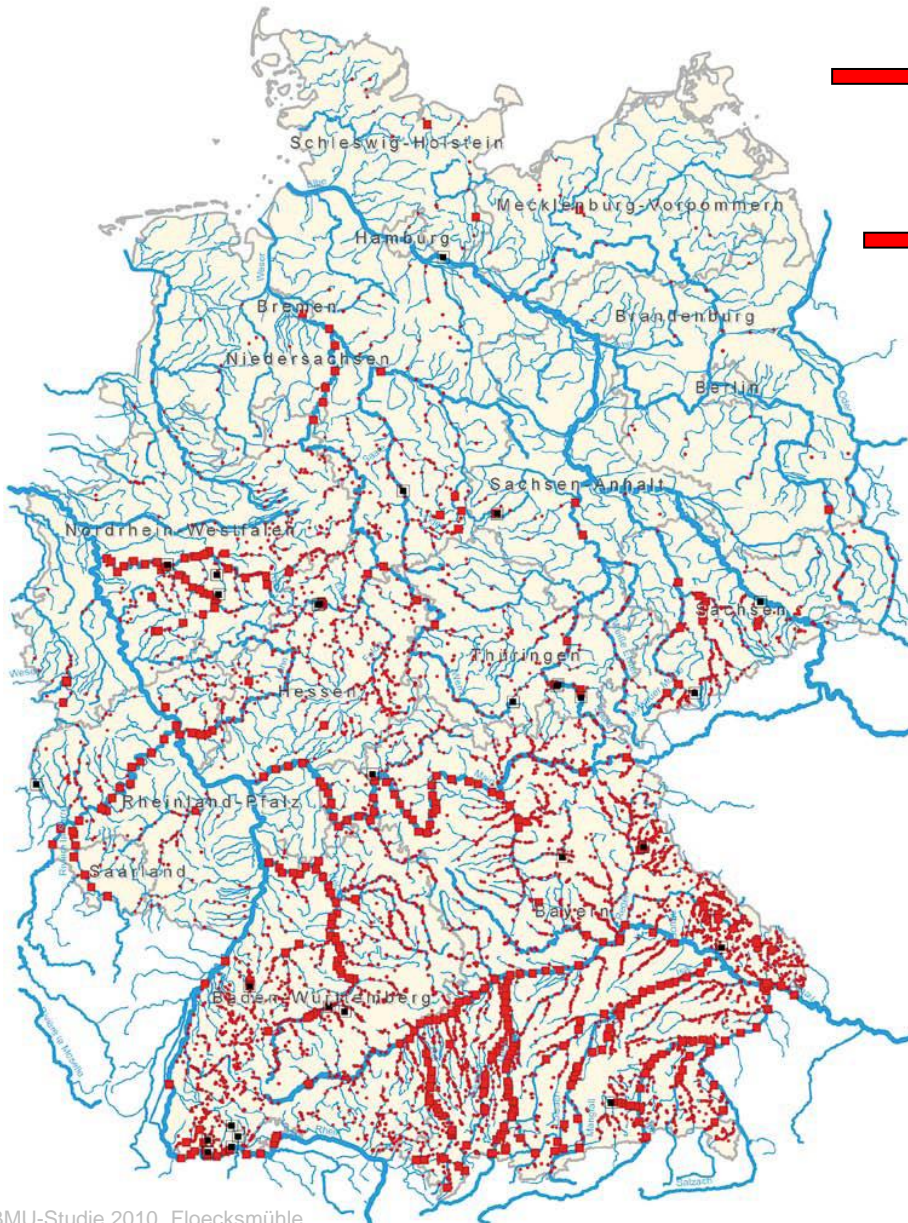


➡ **279 GW** Gesamtwärmeleistung für die 80 Großstädte

➡ mit **1.419,5 TWh** Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Heizperiode

Bei Raumwärme Haushalte haben nur 2 Städte ein Potenzial von max. 10 %

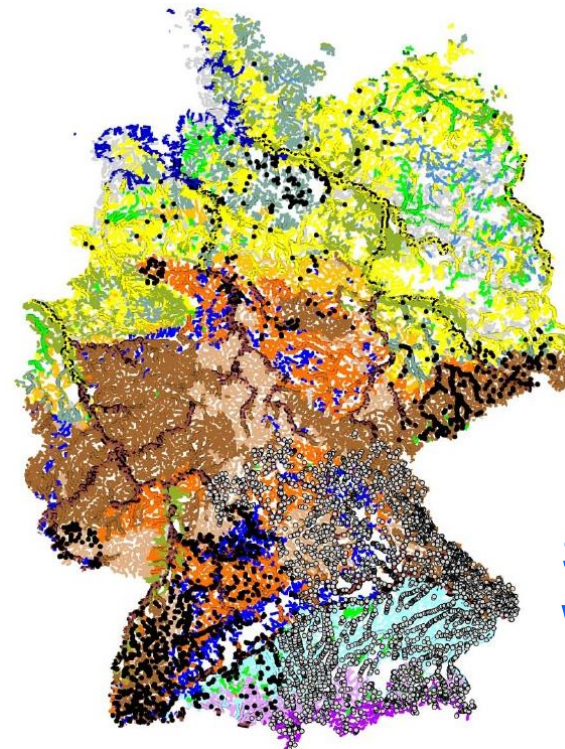
Erschließung des Aquathermiepotenzials



→ 7.600 verbrauchernahe
Wasserkraftanlagen in Betrieb

→ 1895: 54.259 Wasserkraftanlagen

Entwicklung von kombinierten
Wasser-Wärme-Kraftwerken



200.000
Querbauwerke

flächen-
deckende
Verfügbarkeit
in ganz
Deutschland

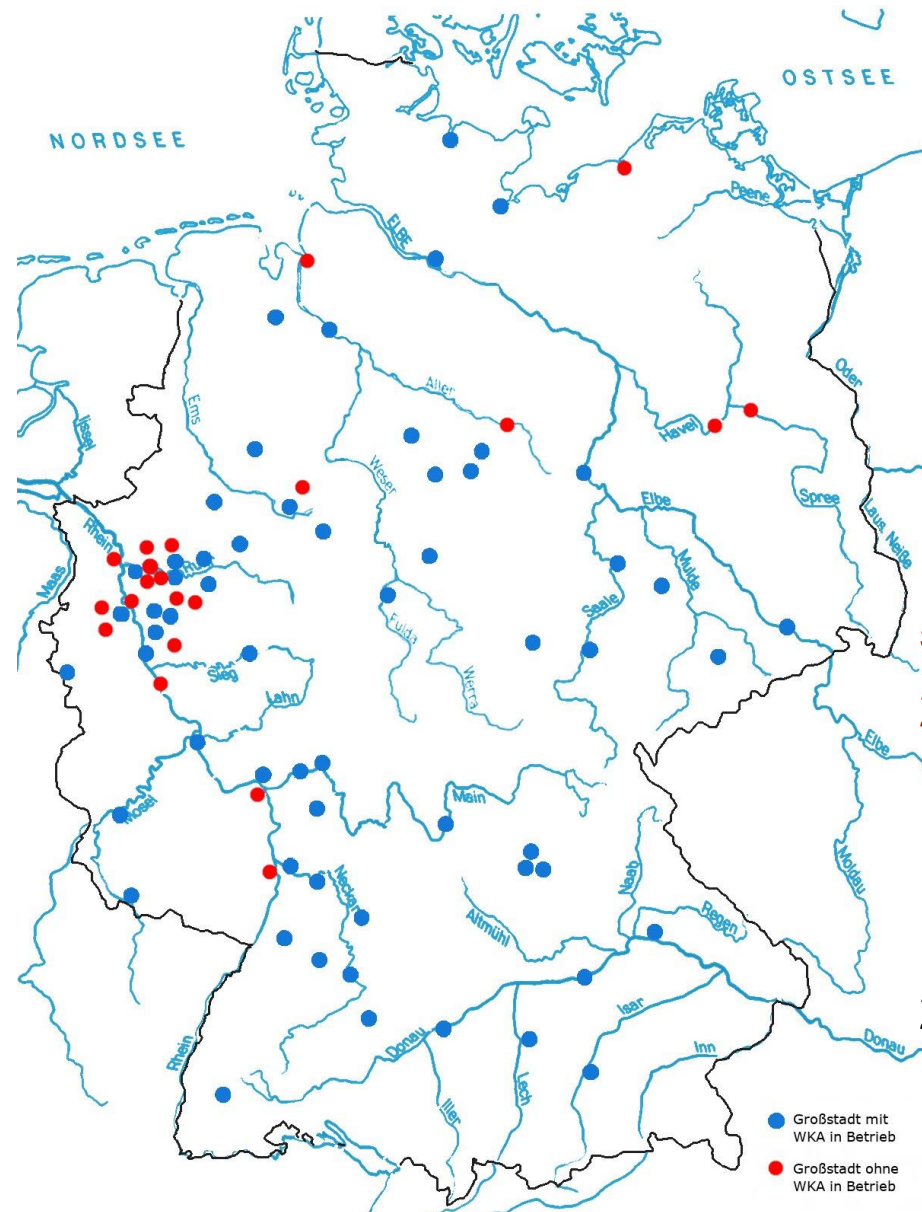
Sicherung des
Wassers in der
Fläche



Vorteile der Nutzung von WKA für eine Wärmegewinnung

- 1.) Wasserrechte für die Entnahme, Wiedereinleitung und energetische Nutzung des Wassers liegen bereits vor
➡ **Wärmegewinnung stellt nur eine Erweiterung der Rechte dar**
- 2.) Notwendige Entnahme- und Wiedereinleitungsvorrichtungen, Rechenanlagen, Abstiegs- und Aufstiegsanlagen sind vorhanden
➡ **weiterer Eingriff in die Natur ist gering**
- 3.) es besteht i.a. ausreichend Platzbedarf für Großwärmepumpe und sonstige Vorrichtungen zur Wärmegewinnung
- 4.) Wasserkraftwerke befinden sich häufig in Ortschaften und Städten und werden oftmals von Stadtwerken betrieben
- 5.) Günstige Energiebereitstellung direkt aus dem Wasserkraftwerk möglich
- 6.) Infrastruktur für die Wärmegewinnung vor Ort vorhanden z.B. Wohnnutzung und/oder Gewerbenutzung der Gebäude
➡ **einfacher Anschluss der WP an bestehendes Heizungssystem**

Auswertung 80 Großstädte – Nutzung WKA



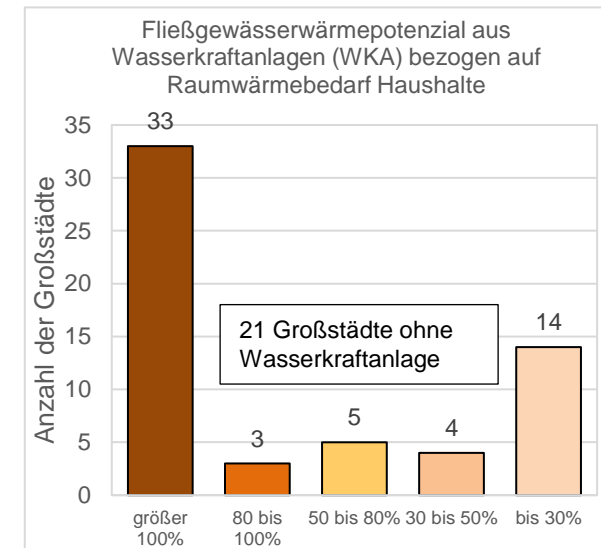
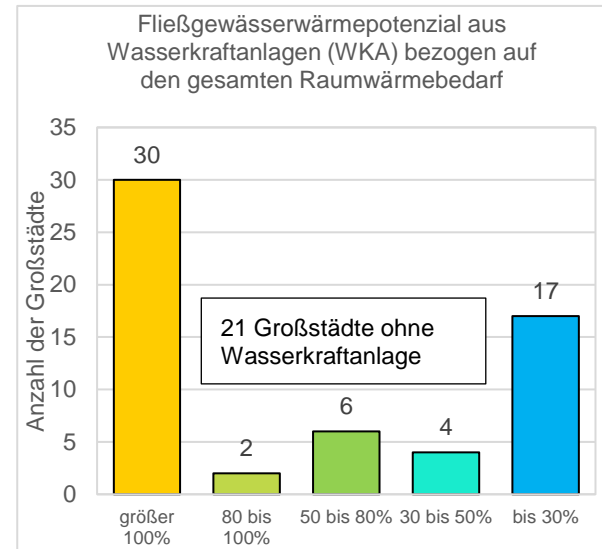
59 Großstädte
271 WKA

1.) Strom:

- 298,4 MW
- 1,419 TWh/a

2.) Wärme:

- 59.325 MW
- 301,8 TWh/a



Erschließung des Fließgewässerwärmepotenzials

Entwicklung kombinierter Wasser-Wärme-Kraftwerke

- 1.) ein Abfluss von **10 l/s** liefert bei einer Temperaturabsenkung von 2 bis 3 K **100 bis 150 kW** Wärmeleistung
- 2.) ein Abfluss von 100 l/s liefert bei einer Temperaturabsenkung von 2 bis 3 K 1 bis 1,5 MW Wärmeleistung und 1 m³/s liefert 10 bis 15 MW



20 MW Wärmeleistung
25 kW elektrische Leistung



d.h. jede kleine Wasserkraftanlage

mit **4 bis 10 kW** elektrische Leistung

liefert **1 bis 10 MW** thermische Leistung

Anlagen von **10 bis 100 kW**

liefern **1 bis 100 MW** thermische Leistung



jede Wasserkraftanlage kann einen maßgeblichen Beitrag zur kommunalen Wärmeversorgung liefern