

Industrielle Prozesswärme klimaneutral erzeugen – Das 4-Stufen-Modell von IN4climate.NRW

Dietmar Schüwer, Wuppertal Institut



21. März 2024

Anuga FoodTec
Science Community: Klimaneutrale Prozesswärme
der DENEFF, ECF und EHPA

Die Mission des Wuppertal Instituts: „Forschung für eine nachhaltige Zukunft“

- Gemeinnützige Non-Profit-GmbH im Landeseigentum NRW
- Gründung 1991
- Nachhaltigkeits- und Transformationsforschung:
 - Systemblick Ökologie – Ökonomie – Soziales
 - auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene
- Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft
- Vier interdisziplinär besetzte Forschungsabteilungen mit ca. 320 Mitarbeitenden (davon ca. 170 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen)
- ca. 150 Projekte pro Jahr
- Budget 2021:
 - 4,8 Mio. Euro Landesförderung
 - ca. 16,3 Mio. Euro von Drittmittelgebern (von UN, EU, Ministerien, Wirtschaft, NGOs)
- Abteilung „Zukünftige Energie- und Industriesysteme“



Hauptsitz in Wuppertal



Berliner Büro

- 19 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs (2022) wurden für **industrielle Prozesswärme** eingesetzt
- Davon wird bisher nur ein **Bruchteil aus regenerativen Energien** oder regenerativem Strom bereitgestellt
- Prozesswärmebedarf in **NRW ca. 180 TWh**

Legende

Industrie 667 TWh

Verkehr 698 TWh

Haushalte 678 TWh

Gewerbe, Handel,
Dienstleistung (GHD) 325 TWh

Prozesswärme 451 TWh

Sonstige Wärme 43 TWh a)

Kälte 14 TWh

Elektrizität 160 TWh b)

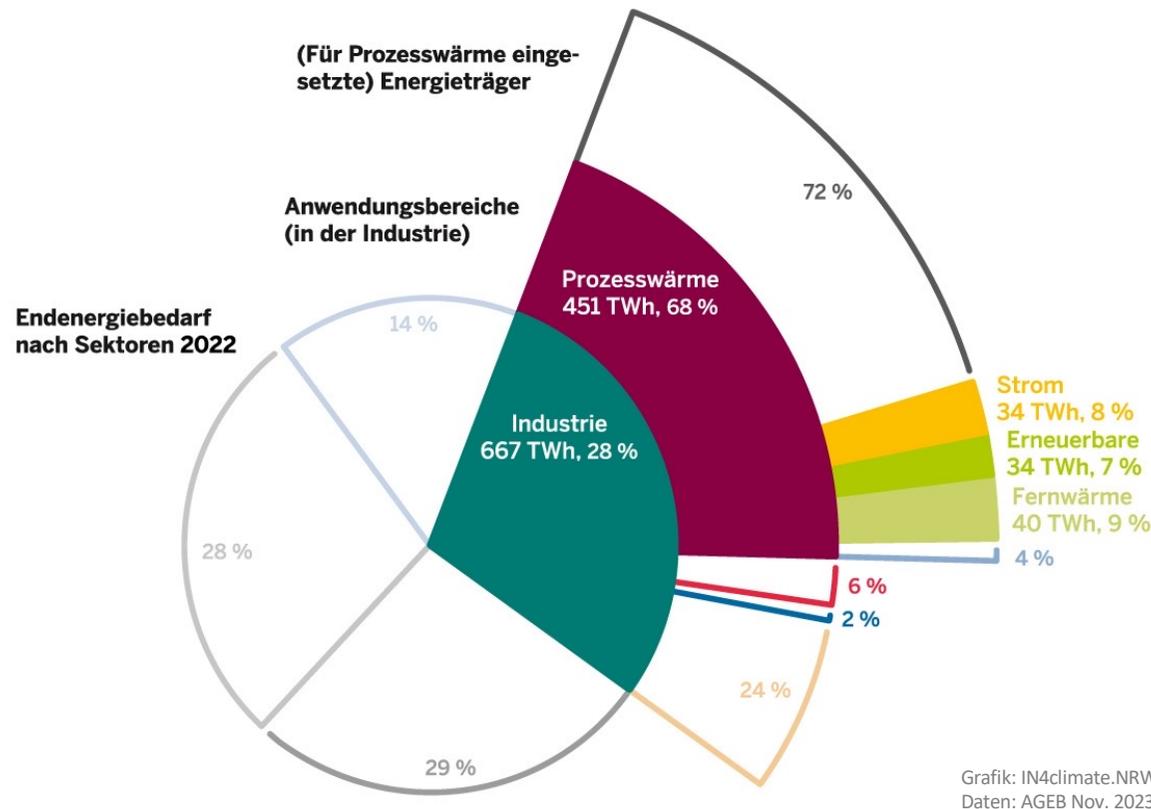
Fossile Energieträger 323 TWh c)

Strom 34 TWh d)

Erneuerbare 34 TWh e)

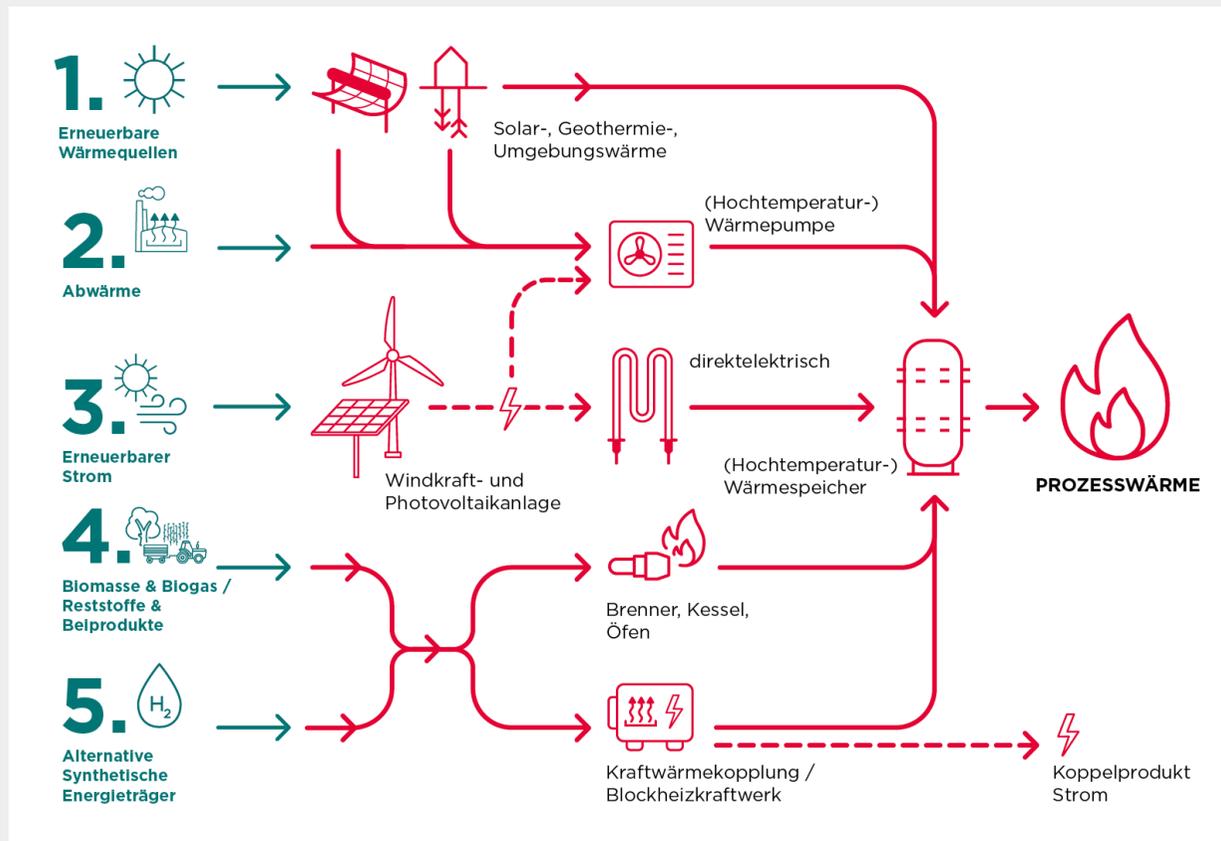
Fernwärme 40 TWh f)

Sonstige 19 TWh



- a) U. a. Raumwärme (z.B. Hallenbeheizung) und Warmwasser
- b) U. a. mech. Energie (Pumpen, Antriebe), Beleuchtung, Information und Kommunikation
- c) Mineralöl, Gas und Kohle
- d) Strommix aus dem Netz mit resultierenden CO₂-Emissionen gemäß aktuellen EE-Anteilen
- e) U. a. Biomasse, Geothermie und Solarthermie
- f) Fernwärmemix mit resultierenden CO₂-Emissionen gemäß aktuellen EE-Anteilen

Hebel für klimaneutrale industrielle Prozesswärme: Erneuerbare Energiequellen, Energieträger und Technologien



Charakteristika:

- Technische Eignung für Anwendungsbereich (Temperatur, Prozess, Branche)
- Zeitliches und lokales Dargebot (Solarthermie, Geothermie...)
- Infrastruktur (H₂-Leitung, Stromnetzausbau)
- Mengenverfügbarkeit (z.B. Hochlauf grüner Wasserstoff)
- Technische Reife (z.B. Elektrifizierung spezieller technischer Prozesse) und Wirtschaftlichkeit

→ maßgeschneiderte Lösungen entsprechend benötigtem Temperaturniveau erforderlich!

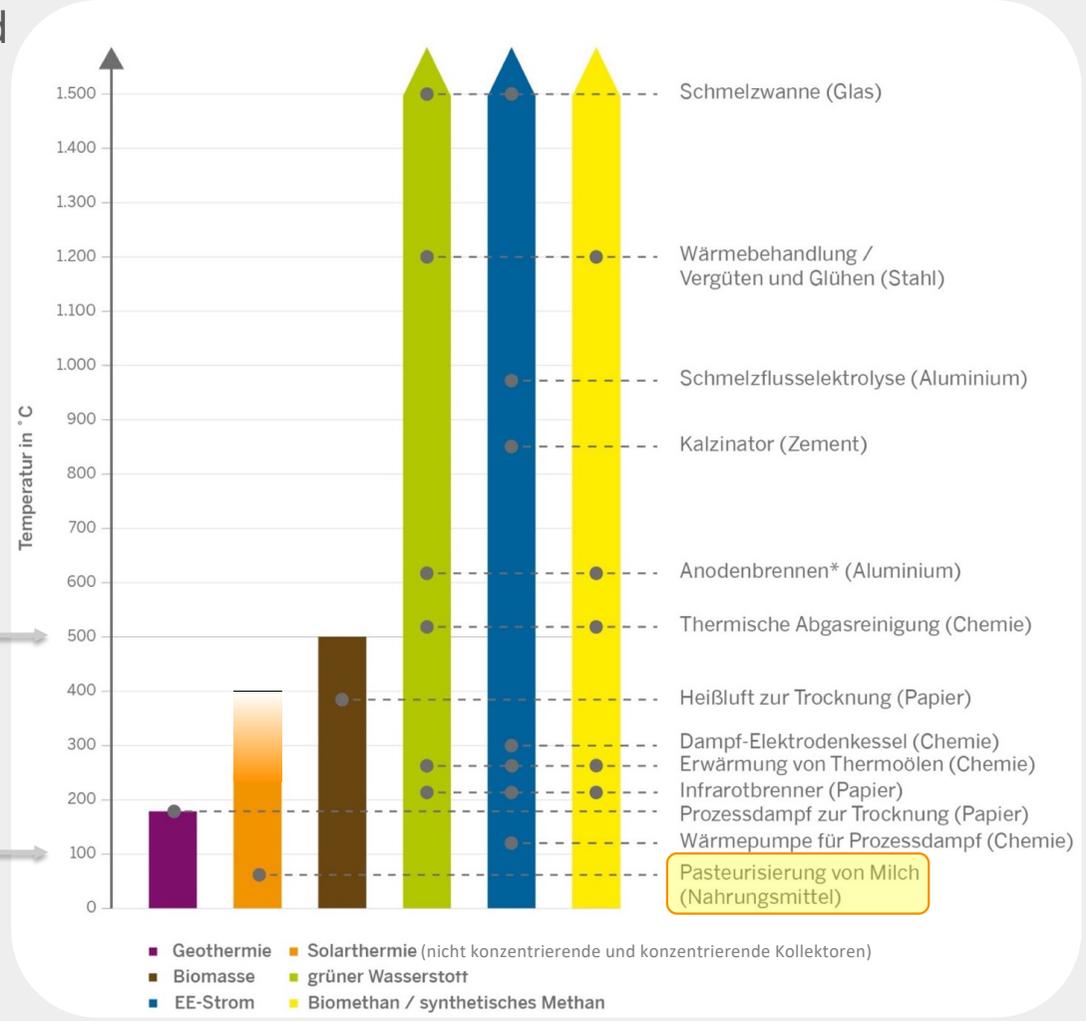
Forschungsbedarf

- HT-Wärmepumpen und HT-Speicher
- Hybride Konzepte und Integration verschiedener Wärmeerzeuger in industrielle Prozesse

Grafik: Schüwer und Holtz in et 10/2023

Erzielbare Temperaturen und potenzielle Einsatzbereiche erneuerbarer Wärme

Nahrungsmittelindustrie¹⁾:
ca. 40% 100 - 500°C (PW)
ca. 60% < 100°C (PW, RW, WW)



Grafik: IN4climate.NRW, eigene Ergänzungen
1) DLR 2016

Diskussionspapiere der Arbeitsgruppe „Industrielle Prozesswärme“ von IN4climate.NRW (Hrsg.): „Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation“



www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/in4climatenrw

INHALT

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
1. ZIEL UND KONTEXT	6
2. HEUTIGE UND ZUKÜNFTIGE ANFORDERUNGEN	7
2.1 Heutiger Wärmebedarf	9
2.2 Entwicklung des Wärmebedarfs	10
2.3 Heutige fossile Wärmebereitstellung	12
2.4 Zukünftige Wärmebereitstellung auf Basis Erneuerbarer Energien	13
3. VIER-STUFEN-MODELL DER KLIMANEUTRALEN WÄRMEVERSORGUNG	19
3.1 Energieeffizienz sowie Abwärmenutzung	20
3.2 Erschließung lokaler erneuerbarer Wärmequellen	21
3.3 Elektrische Wärmeerzeugung / PtH	22
3.4 Alternative Energieträger	23
4. HERAUSFORDERUNGEN DER WÄRMEWENDE	26
5. WIE MACHEN WIR UNS JETZT AUF DEN WEG?	30
LITERATUR	33



Industriewärme klimaneutral
(Juni 2021)

Prozesswärme für eine
klimaneutrale Industrie
(Mai 2022)

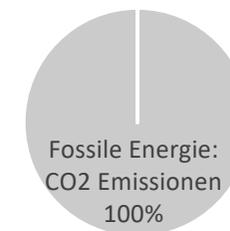


Das 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

Erarbeitet von AG „Industrielle Prozesswärme“ von IN4climate.NRW



- 1. Steigerung der Effizienz (Energie und Exergie)**
z. B. Prozessoptimierungen, interne und externe Abwärmenutzung
- + 2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen**
d. h. Solarthermie, Tiefengeothermie
- + 3. Elektrische Wärmeerzeugung (mit EE-Strom)**
z. B. Elektrodenkessel, Induktion, Hochtemperatur-Wärmepumpen
- + 4. Alternative Energieträger (Grüner H₂, Biomasse, Biomethan, synthetisches Methan, u. a.)**
z. B. neuartige Brennertechnologien, Brennstoffzellen



100 % 
CO₂-Vermeidung
(der direkten Emissionen)

Grafik: IN4climate.NRW

1. Stufe: Effizienz & Abwärme

1. Steigerung der Effizienz (Energie und Exergie)

z. B. Prozessoptimierungen, interne und externe Abwärmenutzung

+ 2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

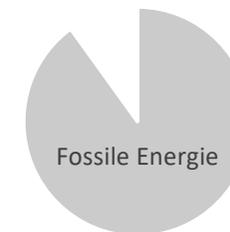
d. h. Solarthermie, Tiefengeothermie

+ 3. Elektrische Wärmeerzeugung (mit EE-Strom)

z. B. Elektrodenkessel, Induktion, Hochtemperatur-Wärmepumpen

+ 4. Alternative Energieträger (Grüner H₂, Biomasse, Biomethan, synthetisches Methan, u. a.)

z. B. neuartige Brennertechnologien, Brennstoffzellen

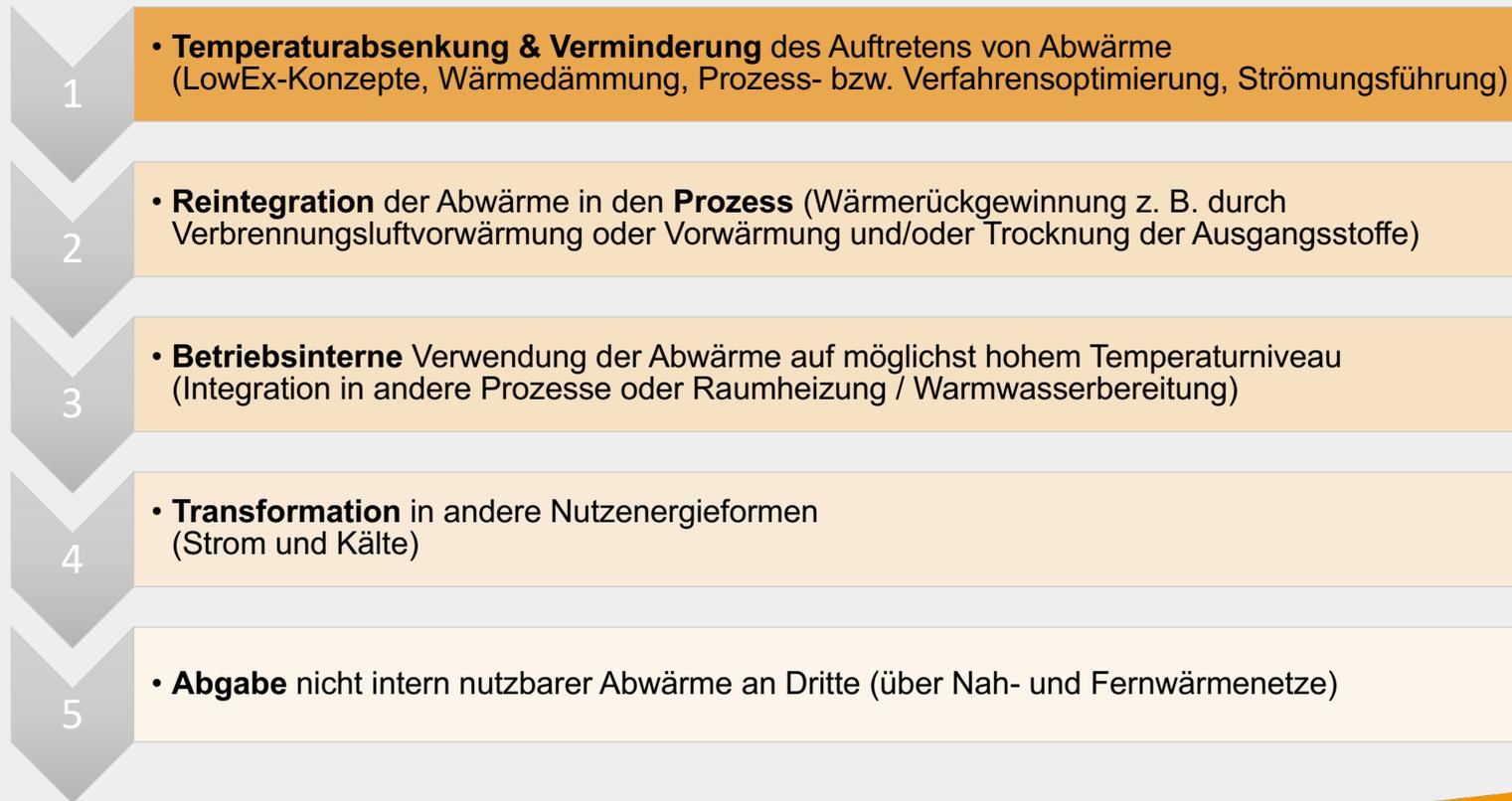


X %
CO₂-Vermeidung
(der direkten Emissionen)

Grafik: IN4climate.NRW

1. Stufe: Effizienz & Abwärme

Priorisierung der Abwärmenutzung und Einsatz innovativer Technologien & Konzepte



HT-WP

ORC
TEG
AKM

LowEx-Konzepte /
mobile Latentwärme

Innovative Wärmespeicher

Quelle: Eigene Darstellung (nach SAENA 2012)

2. Stufe: Erneuerbare Wärmequellen

1. Steigerung der Effizienz (Energie und Exergie)

z. B. Prozessoptimierungen, interne und externe Abwärmenutzung

+ 2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

d. h. Solarthermie, Tiefengeothermie

+ 3. Elektrische Wärmeerzeugung (mit EE-Strom)

z. B. Elektrodenkessel, Induktion, Hochtemperatur-Wärmepumpen

+ 4. Alternative Energieträger (Grüner H₂, Biomasse, Biomethan, synthetisches Methan, u. a.)

z. B. neuartige Brennertechnologien, Brennstoffzellen



y %
CO₂-Vermeidung
(der direkten Emissionen)

Grafik: IN4climate.NRW

2. Stufe: Erneuerbare Wärmequellen

Solarthermie & Tiefengeothermie

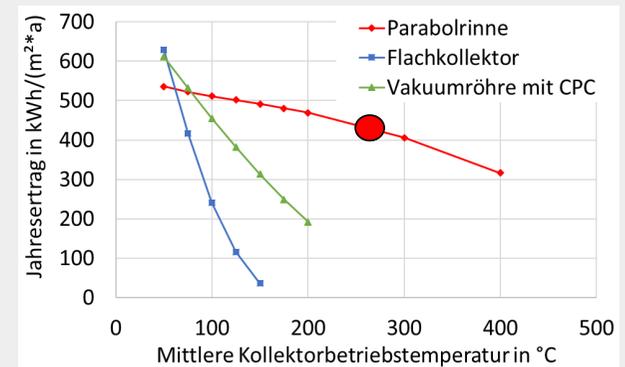
+ Im Betrieb unabhängig von Energiepreisen und -importen

Solarthermie (in Kombination mit Wärmespeicher)

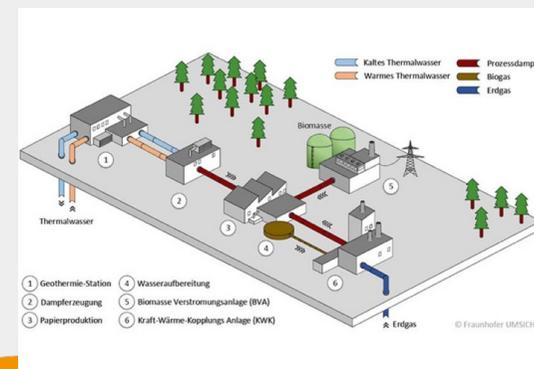
- kann auch in unseren Breitengraden die Prozesswärmebereitstellung bis max. 120°C (nicht-konzentrierend) bzw. 300°C (konzentrierend) unterstützen
- z.B. Nahrungsmittelindustrie bzw. allgemein NT-Prozesse (Bäder etc.) auch in typischen HT-Branchen
- Kurzfristig verfügbare (hybride) Fuel-Saver-Technologie

Tiefengeothermie:

- kann hier (in NRW) bis ca. 180°C kontinuierlich (!) Prozesswärme bereitstellen
- Geothermie Standortcheck NRW: www.geothermie.nrw.de



Erträge Solarthermie Potsdam
Quelle: D. Krüger et al. (DLR, Fraunhofer ISE)



Hydrothermale Geothermie (23,5 MW_{th}) zur Papiertrocknung
Quelle: Kabel Premium Pulp & Paper / Grafik: Fraunhofer UMSICHT

3. Stufe: Elektrifizierung (Power-to-Heat)

1. Steigerung der Effizienz (Energie und Exergie)

z. B. Prozessoptimierungen, interne und externe Abwärmenutzung

+ 2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

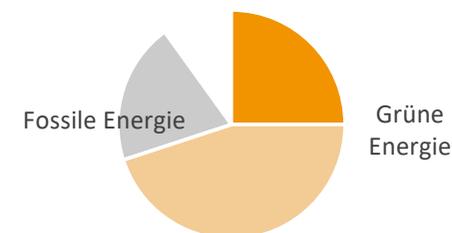
d. h. Solarthermie, Tiefengeothermie

+ 3. Elektrische Wärmeerzeugung (mit EE-Strom)

z. B. Elektrodenkessel, Induktion, Hochtemperatur-Wärmepumpen

+ 4. Alternative Energieträger (Grüner H₂, Biomasse, Biomethan, synthetisches Methan, u. a.)

z. B. neuartige Brennertechnologien, Brennstoffzellen



z %
CO₂-Vermeidung
(der direkten Emissionen)

Grafik: IN4climate.NRW

Hochtemperatur-Wärmepumpen

Typische Anwendungen und Temperaturniveaus

Potenzielle Wärmequellen:

- Kühlwasser 20 ... 50°C
- Abwasser 20 ... 60°C
- Druckluftabwärme 30 ... 70°C
- Abluft aus Öfen 20 ... 100°C

Potenzielle Wärmesenken:

- Verdampfen 40 ... 170°C
- Trocknen 40 ... 250°C
- Pasteurisieren/Sterilisieren 70 ... 120°C
- Destillieren 100 ... 300°C

Potenziell für Anwendung geeignete Branchen:

- Nahrungsmittel
- Chemie/Pharma
- Papier
- Maschinenbau & Textil
- Metallerzeugnisse, Metalle, Mineralien

Umsetzungsbeispiele:

- **Heißluftherzeugung** und Luft-Vorwärmung für Trocknungsprozesse (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung) durch Abwärmenutzung
- **Prozessdampferzeugung** (Niederdruckdampf) für Sterilisation und Pasteurisierung von Lebensmitteln (z.B. Milch) durch Nutzung von Kühlwasser oder feuchter Abluft
- **Heißwassererzeugung** für Wasch- und Reinigungsprozesse (Lebensmittel, Fleisch, Produktwäschen) in Kombination mit Kälteerzeugung
- **Wärmerückgewinnung** durch Rauchgaskondensation in Biomasseverbrennungen (Müllheizkraftwerken, KWK-Anlagen...)
- Fertigung von **Spritzgussbauteile** aus Kunststoffen (Erwärmung im Extruder und Abkühlung in der Spritzgussform)
- **Nah- und Fernwärmenetze** (z.B. von Stadtwerken und Kommunen)

Quelle: NTB / Arpagaus Juni 2019

4. Stufe: Alternative Energieträger

1. Steigerung der Effizienz (Energie und Exergie)

z. B. Prozessoptimierungen, interne
und externe Abwärmenutzung

+ 2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

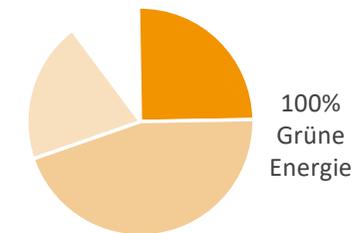
d. h. Solarthermie, Tiefengeothermie

+ 3. Elektrische Wärmeerzeugung (mit EE-Strom)

z. B. Elektrodenkessel, Induktion,
Hochtemperatur-Wärmepumpen

**+ 4. Alternative Energieträger (Grüner H₂, Bio-
masse, Biomethan, synthetisches Methan, u. a.)**

z. B. neuartige Brennertechnologien,
Brennstoffzellen



100 % 
CO₂-Vermeidung
(der direkten Emissionen)

Grafik: IN4climate.NRW

4. Stufe: Alternative Energieträger

PtG (H₂, Biogas, SNG) aus Effizienzgründen möglichst auf Hochtemperaturanwendungen beschränken



Grafik: IN4climate.NRW mit eigenen Ergänzungen (PtH-TES: DLR)

Projektbeispiele Wasserstoff

- **Glasindustrie:**
HyGlass, COSiMa
- **Gießereien:**
InnoGuss
- **Stahlherstellung**
tkH₂Stahl

Fazit



- Klimaneutralität erfordert auch **Transformation industrieller Prozesswärme**, diese ist **komplex** (diverse Temperaturen, Medien, Prozesse...) und muss **gesamtsystemisch** (sektor-, stakeholder- und branchenübergreifend) angegangen werden.
- Effizienzsteigerungen sind prioritär, **Vier-Stufen-Modell** gute Hilfestellung für weitere Priorisierung des Energieeinsatzes
- Erneuerbare Wärmeversorgung
 - erfordert **individuelle, temperaturangepasste Lösungen** und frühzeitige Evaluierung möglicher **lokaler Wärmequellen**
 - **Tiefengeothermie** und **Solarthermie** können für einige Branchen und NT-Anwendungen wichtige Beiträge leisten
- Durch **Sektorenkopplung** (KWK, PtH, PtG), **Hybridisierung** und **Flexibilisierung** wichtige Beiträge zur Systemintegration von EE-Strom und zur Stabilisierung der Stromnetze
- **Weiterentwicklung von Technologie** :
 - Vollständige oder teilweise **Elektrifizierung** (inkl. HT-Wärmepumpen)
 - Einsatz von grünem **Wasserstoff**, biogenen und anderen alternativen Brennstoffen
 - **Solarthermie** (auch konzentrierend)
 - **(Hochtemperatur-)Wärmespeicher**, um erneuerbare Energiepotenziale besser auszuschöpfen, Systemkosten zu minimieren und Systemdienstleistungen zu erbringen.

