

Wärmenetze der 5. Generation

– eine Technologiebeschreibung –

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Seifert

Dr. Ing. P. Seidel

Datum: 23. März 2022

Inhalt	
Einführung	2
Wärmenetze der 5. Generation	3
Definition	3
Technologie - Hydraulik	7
Technologieauswirkung	9
Sekundärseite	9
Heizungssystem	9
Trinkwarmwassersystem	10
Primärseite	11
Wirtschaftlichkeit	12
Primärseite	13
Sekundärseite	14
Hinweise bei der Planung	15
Fazit	16
Formelverzeichnis	18
Literatur	19

Einführung

In der Bundesrepublik Deutschland lebt ein Großteil der Bevölkerung im urbanen Raum. Ausdruck findet diese Tendenz im Grad der Verstädterung, der 2020 einen Höchstwert mit 77,4% erreicht hat und weiter steigt [1]. Hervorgerufen durch die hohe Bevölkerungsdichte ist in den urbanen Bereichen auch eine signifikante Energiedichte, d.h. ein hoher Energieverbrauch in allen Sektoren, zu verzeichnen. In Zusammenhang mit dem Energieverbrauch steht aktuell noch ein starker Ausstoß an Treibhausgasen¹. Eine Dekarbonisierung des urbanen Raumes besitzt daher ein großes Potential zur Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Betrachtet man sich in diesem Zusammenhang die wichtigsten Verbraucher, so nehmen die Gebäude einen wesentlichen Teil beim Energieverbrauch ein (Industrie: 28,0%; Verkehr: 30,3%; Haushalte 27,0% sowie GHD² 14,7% bezogen auf den Endenergiebedarf [2]). Die Versorgung der Gebäude ist in Deutschland jedoch sehr unterschiedlich, was Abb. 1 verdeutlicht. In den westlichen Flächenländern der Bundesrepublik ist eine Wärmeversorgung vorrangig mit Erdgas- und Erdöl gegeben, wohingegen in den Stadtstaaten und in den neuen, östlichen Bundesländern ein deutlich höherer Anteil an Fernwärmesystemen zu finden ist. In den Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin ist dies nicht verwunderlich, da hier ein hohe Energiedichte aufgrund der engen Bebauung vorliegt. In den fünf ostdeutschen Bundesländern ist der erhöhte Anteil an Fernwärmesystemen durch die zentralistischen Versorgungsstrukturen vor 1989 geprägt, welche im urbanen Raum Fernwärmesysteme präferierten.

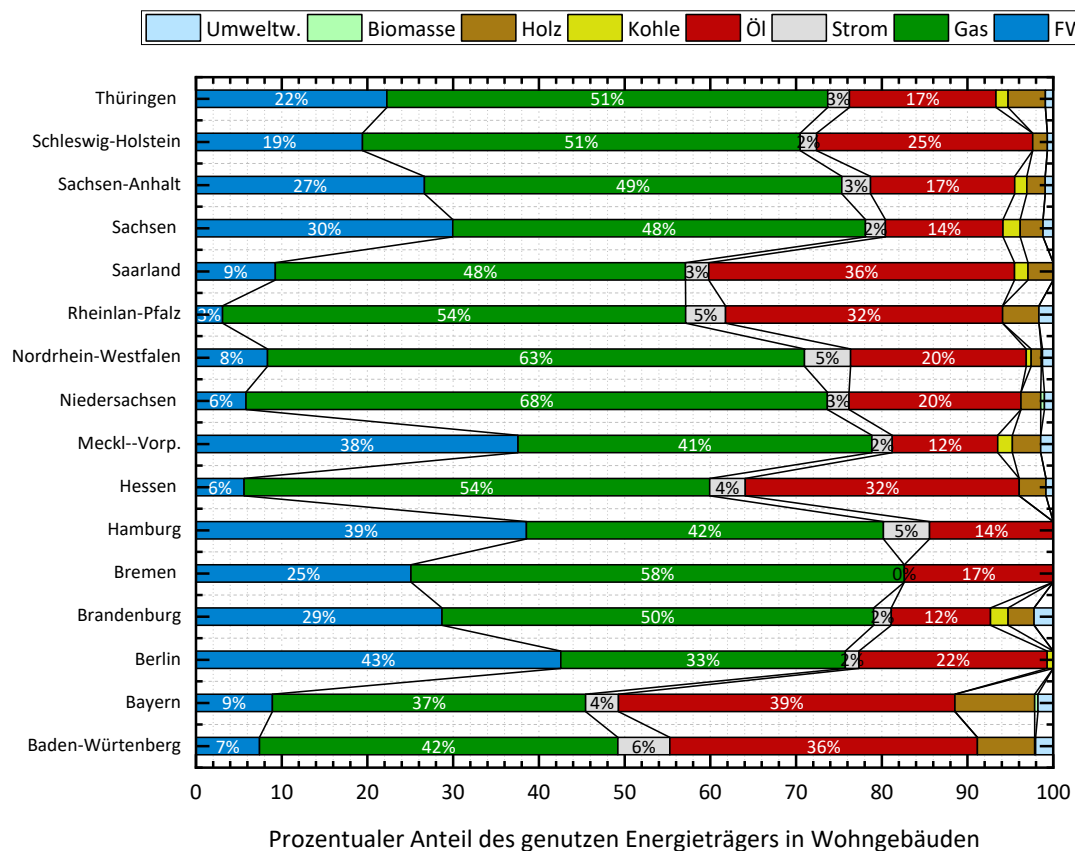


Abb. 1: Prozentualer Anteil der genutzten Energieträger in Deutschland bei Wohngebäuden nach [4]

¹ 70% der Treibhausgase werden in den Städten realisiert [3].

² GHD – Gewerbe / Handel / Dienstleistung

Durch die hohen Energiedichten im urbanen Raum besteht die Chance schnell durch einen geeigneten Umbau des Energiesystems eine Dekarbonisierung und damit eine Reduktion der Treibhausgase zu erreichen. Abzusehen ist hierbei, dass der Stromanteil bei den transformierten Energiesystemen deutlich ansteigen wird. Zweite wesentliche Tendenz ist eine Absenkung der Systemtemperaturen, siehe Abb. 2, was wiederum die Einbindung von erneuerbaren Energien forciert³. Beide Tendenzen unterstützen das Konzept der Wärmenetze der 5. Generation, welche Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen sind.

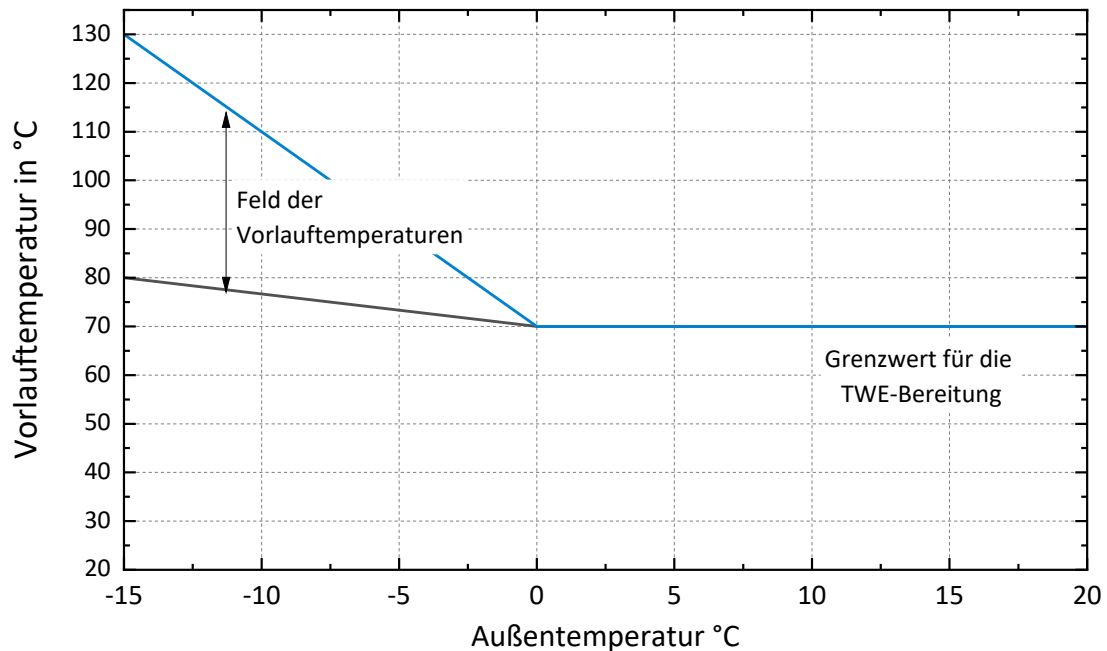


Abb. 2: Vorlauftemperaturen für klassische Fernwärmesysteme

Wärmenetze der 5. Generation

Der Begriff „Wärmenetze der 5. Generation“ ist kein fest definierter Begriff, sondern zeichnet sich durch einige Systemeigenschaften aus, welche nachfolgend erläutert werden sollen. Synonyme für den Begriff „Wärmenetz der 5. Generation“ sind auch „Bidirektionale Niedertemperatur-Wärmenetze“; „Anergienetze“; „Kalte Wärmenetze“ oder LowEx-Wärmenetz.

Definition

Unter einem Wärmenetz der 5. Generation wird folgendes technisches System verstanden:

„Ein Wärmenetz der 5. Generation ist ein thermisches Energieversorgungsnetz, welches Wasser oder eine geeignete Trägerflüssigkeit verwendet und im Kreislauf durch ein Rohrleitungssystem transportiert. Angekoppelt an das hydraulische System sind bidirektionale Wärmeübergabestationen, welche vorrangig mit Wärmepumpen ausgestattet sind. Die Temperaturen des Wärmenetzes sind nahe der Umgebungstemperatur bzw. der

³ Abb. 2 zeigt ein Temperaturbeispiel für ein konventionelles Fernwärmesystem bei dem die Vorlauftemperatur zwischen $\vartheta_v = 80 \dots 130^\circ\text{C}$ in den Wintermonaten und $\vartheta_v = 70^\circ\text{C}$ in der Übergangszeit bzw. in den Sommermonaten beträgt.

Erdreichtemperatur, so dass eine direkte Versorgung der Endverbraucher nicht möglich ist⁴. Die Netztemperaturen müssen so gestaltet sein, dass die Nutzung industrieller und urbaner Abwärme ermöglicht wird. Zusätzlich müssen die Wärmeübergabestationen in der Lage sein bidirektional⁵ arbeiten zu können. Die Einbindung von regenerativen Energien mittels solarthermischer Systeme oder PV-Systeme (Power to Heat) ist obligatorisch.“ [5, 6, 7, 8, 9].

Die Vor- und Nachteile der Wärmenetze der 5. Generation können aus Tab. 1 entnommen werden.

Tab. 1: Vor- und Nachteile von Wärmenetzen der 5. Generation

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Versorgung der Endverbraucher mit Wärme und Kälte • geringere Netzverluste im Vergleich zu konventionellen Systemen • Einbindung von erneuerbaren Energien und Energien aus Abwärme • Ausgleich von Wärme- und Kältebedarfen • Bereitstellung von Flexibilitätspotentialen • Reduktion der Investitionskosten durch kostengünstigere Rohrleitungen ohne Wärmedämmung • Transformation auf das beim Endnutzer benötigte Temperaturniveau – verbraucherspezifisch (individuelle Endtemperaturen) 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Volumenströme und damit höherer hydraulischer Aufwand • höherer regelungstechnischer Aufwand • Bereitstellung einer digitalen Infrastruktur zur Zustandsanalyse des Systems • höherer investitionstechnischer Aufwand bei der bidirektionalen Wärmeübergabestation und bei der Sekundärtechnologie • mangelnde Erfahrung in der Praxis (Planung / Betrieb / Wartung)

Der wesentliche Vorteil der Wärmenetze der 5. Generation sind die deutlich niedrigeren Systemtemperaturen und die damit einhergehende Möglichkeit der Einbindung von Abwärme bzw. erneuerbaren Energien. Tab. 2 zeigt einen Vergleich der Systemtemperaturen nach [10] für alle bisherigen Wärmenetztypen.

Tab. 2: Systemvergleich unterschiedlicher Wärmenetztypen nach [10]

Bezeichnung	Zeit	Wärmeträgermedium	Temperatur in °C
1. Generation	.. 1800 – 1930	Dampf	>100
2. Generation (Hochtemperatur)	1930 ... 1970	Wasser (Überdruck)	< 100
3. Generation (Mitteltemperatur)	1970 ... 2010		80/40
4. Generation (Niedertemperatur)	2010 ... jetzt		50-55 / 25

⁴ Die geringen Temperaturen der Netze ermöglichen eine gleichzeitige Wärme und Kälteversorgung. Exakt definiert ist das Temperaturniveau der Wärmenetze der 5. Generation jedoch nicht, wodurch auch Wärmenetze mit Temperaturen über der Umgebungstemperatur mit zu den Wärmenetzen der 5. Generation gezählt werden. Exakter wäre eine Unterteilung in „kalte“ und „warme“ Wärmenetze der 5. Generation.

⁵ Unter „bidirektional“ wird die Ein- und Ausspeisung von Wärme verstanden

5. Generation (ultra-Niedertemperatur)	2015 ... jetzt		< 49 / <24
---	----------------	--	------------

Neben der Einbindung der beschriebenen unterschiedlichen Energie ist ein weiterer wesentlicher Vorteil der Wärmenetze der 5. Generation, dass die thermischen Verluste der Rohrleitungen deutlich reduziert werden. In [11] sind Angaben für aktuelle thermische Verluste von Fernwärmesystemen dokumentiert (vgl. Tab. 3). Diese liegen zwischen 8 ... 18% der eingesetzten Primärenergie und sind somit signifikant für die Effizienz der Systeme.

Tab. 3: Leitungsverluste von Fernwärmesystemen nach [11] - Jahresmittelkennwerte

Bundesland	Wärmeverluste der Netze	Bundesland	Wärmeverluste der Netze
Schleswig-Holstein	16 %	Bayern	16 %
Hamburg	11 %	Berlin	9 %
Niedersachsen	11 %	Brandenburg	9 %
Bremen	14 %	Meck.-Vorpommern	18 %
Nordrhein-Westfalen	15 %	Sachsen	13 %
Hessen	15 %	Sachsen-Anhalt	15 %
Rheinland-Pfalz	16 %	Thüringen	17 %
Baden-Württemberg	8 %	Saarland	k.A.

Betrachtet man eine einfache thermodynamische Rechnung der Wärmeverluste über eine Rohrleitung nach Gl. 1, so lassen sich die in Abb. 3 dokumentierten Wärmeströme detektieren.

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot L \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,n}}{d_{i,n}}\right) + \dots + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}} \quad (1)$$

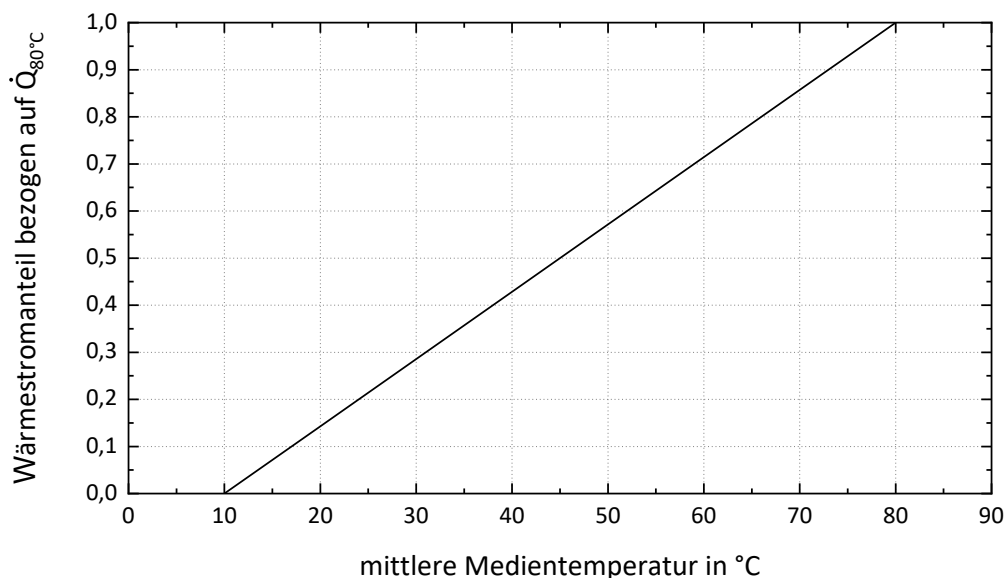


Abb. 3: Anteilige Rohrwärmeabgabe bezogen auf eine mittlere Medientemperatur von $\vartheta_M=80^\circ\text{C}$ (Umgebungstemperatur $\vartheta_U=10^\circ\text{C}$)

Für das typische Rohr mit Dämmung und Schutzmantel ist bei einer Reduktion der Medientemperaturen von $\vartheta_M = 80^\circ\text{C}$ ⁶ auf 40°C bzw. 20°C ein Rückgang auf 42,9% bzw. 28,6% der ursprünglichen Wärmeverluste zu detektieren. Dies ist erheblich und unterstreicht die Bedeutung der Absenkung der Systemtemperaturen bei Wärmenetzen im urbanen Raum.

Die Absenkung der Systemtemperaturen hat jedoch auch Auswirkung auf den Hilfsenergiebedarf speziell der zentralen Umwälzpumpen. Grundsätzlich ist die kalorische Bilanz nach Gl. 2 zu erfüllen.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_V - \vartheta_R) \quad (2)$$

mit

- \dot{m} der Massestrom in kg/s
- c_p die spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)
- ϑ_V die Vorlauftemperatur des Netzes in $^\circ\text{C}$
- ϑ_R die Rücklauftemperatur des Netzes in $^\circ\text{C}$

Mit einer Absenkung der Systemtemperaturen verringert sich üblicherweise auch die Spreizung des Systems ($\vartheta_V - \vartheta_R = \Delta\vartheta$). Um jedoch eine gleichbleibende Leistung bereitstellen zu können muss der Massestrom entsprechend Gl. 2 ansteigen. Dies hat Auswirkung auf die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen (Pumpenantriebsleistung). Es gilt der Zusammenhang nach Gl.3.

$$P_{el} = K \cdot \frac{\dot{V}_P \cdot \Delta p_P}{\eta_{ges}} \quad (3)$$

- K Sicherheitszuschlag für das Anfahrverhalten ($K=1,05 \dots 1,20$)
- \dot{V}_P Volumenstrom über die Pumpe in m^3/s – ($\dot{V}_P = \dot{m}/\rho$)
- Δp_P Drucksprung der Pumpe in Pa
- η_{ges} Gesamtwirkungsgrad (Kombination auf dem Wirkungsgrad der Pumpe + Motor)

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der Wirkungsgrad der Pumpe sich mit der Drehzahl verändert. D.h. es besteht kein unmittelbar linearer Zusammenhang zwischen Leistungsaufnahme der Pumpe und Veränderung des Volumenstromes (Massestromes). Typische Pumpen weisen eine Wirkungsgradkennlinie auf, die in Abhängigkeit des Fördervolumenstromes nicht konstant sind. Exemplarisch sind hierzu in Abb. 4 die entsprechenden Kennlinienverläufe einer einstufigen Pumpe (horizontale Welle und radialem Gehäuse) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass je nach Betriebspunkt der Pumpe eine deutliche Volumenstromerhöhung zu einer Verringerung des Pumpenwirkungsgrades führen kann. Unter dem Gesichtspunkt, dass die Pumpenauslegung auf möglichst auf den Betriebspunkt im höchsten Wirkungsgradbereich einer Pumpe erfolgt, hat eine deutliche Veränderung des Volumenstromes einen negativen Einfluss auf den Pumpenwirkungsgrad. Somit würde bei einer sachgemäßen Umwandlung eines herkömmlichen Wärmenetzes in ein Wärmenetz der 5. Generation zusätzlich ein Pumpenaustausch vorgenommen werden (abhängig von den jeweiligen projektspezifischen Randbedingungen).

⁶ Im Ergebnis einer Umfrage von sächsischen Energieversorgungsunternehmen kann eine mittlere Medientemperatur von $\vartheta_M = 80^\circ\text{C}$ (Vor- und Rücklauf) angenommen werden [18].

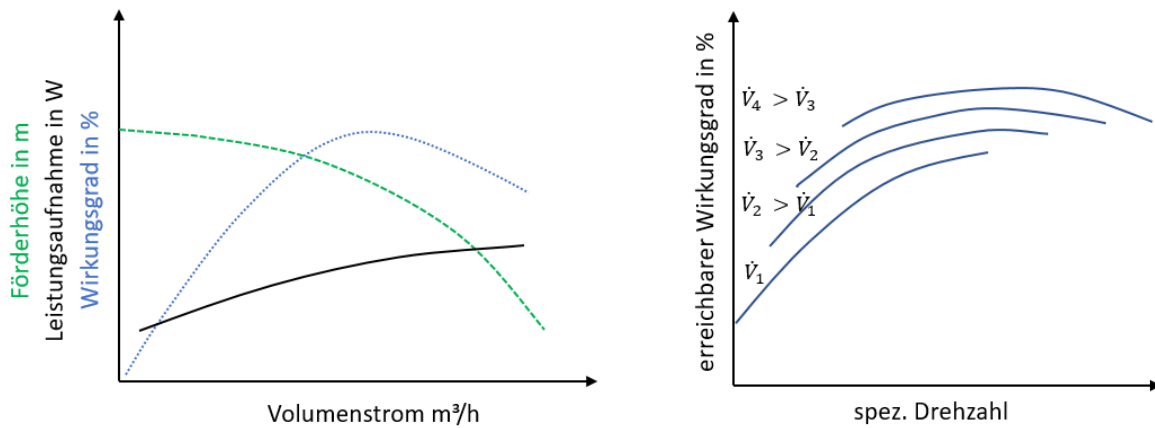


Abb. 4: schematische Darstellung: Links: der el. Leistungsaufnahme, der Förderhöhe und des Wirkungsgrades einer Pumpe zu dem Volumenstrom; Rechts: erreichbarer Pumpenwirkungsgrad bei unterschiedlichem Volumenstrom und spez. Drehzahl

Technologie - Hydraulik

Hinsichtlich der Rohrführung gibt es eine Vielzahl von Lösungen, die erprobt werden. Typisch für die Wärmenetze der 5. Generation ist die Fähigkeit der Wärme- und Kälteversorgung gleichermaßen zu realisieren. Hierbei wird die Kälteversorgung aufgrund der niedrigen Systemtemperaturen als passives Element betrachtet. Abb. 4 zeigt eine typische Systemdarstellung für eine bidirektionale Ein- und Auspeisung in ein Wärmenetz der 5. Generation.

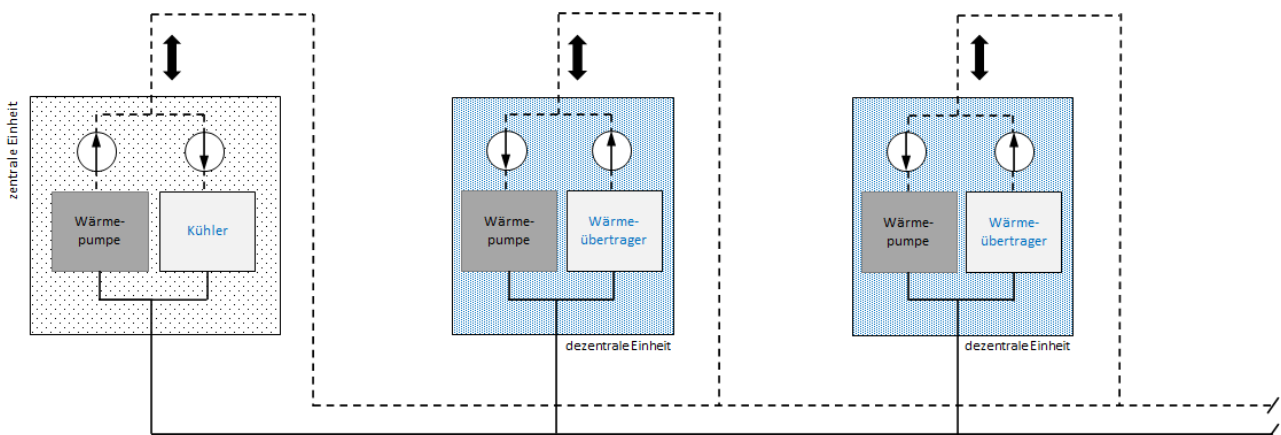


Abb. 4: Zweileiter System - Bidirektionaler Anschluss der zentralen und dezentralen Anlagen [9]

Mit Bezug auf Abb. 4 ist ein klassisches Zweileiter-System abgebildet, welches von einer zentralen Wärme- und Kälteeinheit versorgt wird. Im Heizfall leistet die zentrale Wärmepumpe eine Grundversorgung, die durch die dezentralen Einheiten auf das gewünschte Temperaturniveau bei den Verbrauchern wiederum mittels einer Wärmepumpe transferiert werden kann. Im Kühlfall wird in den dezentralen Gebäuden/ Verbrauchern eine passive Kühlung mittels Wärmeübertrager realisiert, die in der zentralen Einheit rückgekühlt werden muss. Problematisch bei der Dokumentation nach Abb. 4 ist, dass es aufgrund der Lastsituation zu stark unterschiedlichen Massestromverteilungen im Netz kommen kann.

Eine Alternative zum Zweirohrsystem nach Abb. 4 stellt das in Abb. 5 dokumentierte Einrohrsystem dar. Hier wird ein Versorgungsring gebildet, aus dem die dezentralen Verbraucher sich energetisch versorgen können. Gleichfalls ist es möglich, dass unterschiedliche dezentrale Einheiten in das Ringsystem einspeisen können. Großer Vorteil des Systems sind die klaren Strömungsverhältnisse. Eine weitere hydraulische Möglichkeit stellt ein Dreileiter-System dar, welches durch einen konstanten Vorlauf für hohe Temperaturanwendung und einen in Abhängigkeit der Außentemperatur gleitend gefahrenen Vorlauf sowie einen Sammelrücklauf besteht (vgl. Abb. 6.).

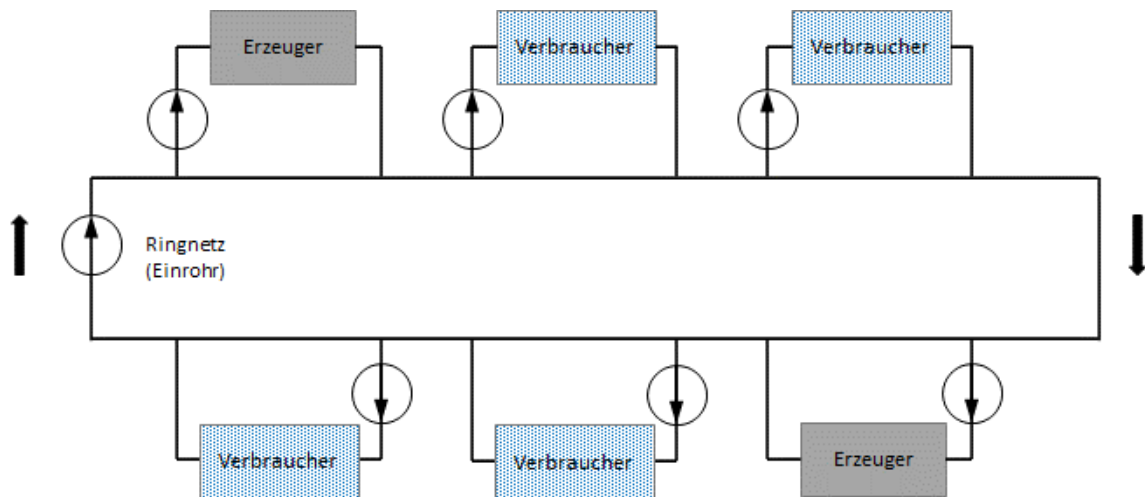


Abb. 5: Einleiter-System - Ringsystem [9]

Der Bezug des Verbrauches erfolgt hierbei aus dem temperaturmäßig günstigsten Vorlauf. Der Rücklauf stellt einen Sammelrücklauf dar. Neuere Konzepte gehen dazu über, dass eine völlige Wahlfreiheit bei der Nutzung der Temperaturniveaus und der Rückgabe gegeben ist. Ziel ist hierbei der geringste Exergieverlust. Der zentrale Versorger muss jedoch sicherstellen, dass ein Massestromausgleich zwischen den Leitern gegeben ist. Die technische Umsetzung weiterer Möglichkeiten für den Anschluss von Vor- und Rücklauf ist variabel (Bsp.: Vorlauf auf hohem Temperaturniveau, Rücklauf auf mittlerem oder niedrigem Temperaturniveau).

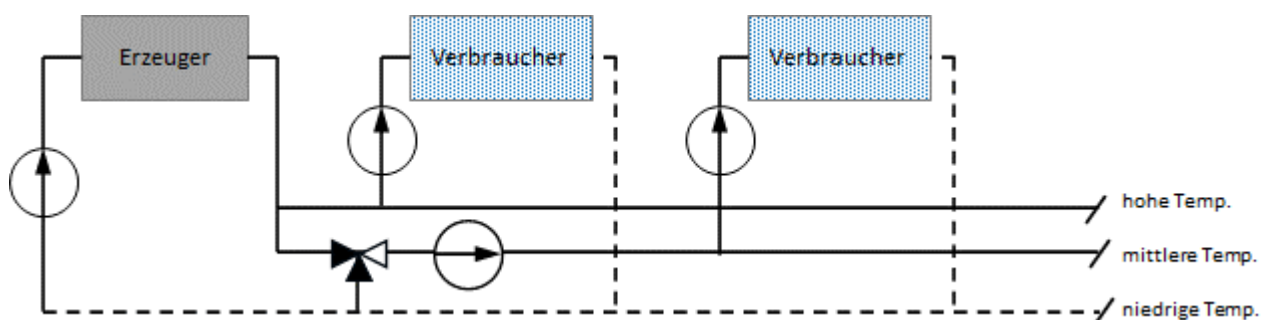


Abb. 6: Anschlussmöglichkeiten in einem Dreileiter-System

Hinsichtlich der Einteilung der hydraulischen Netze kann eine weitere Systematik in „gerichtet“ und „ungerichtete“ Netze vorgenommen werden (vgl. [12]). Das gerichtete System ist gekennzeichnet dadurch, dass es nur eine Richtung der Fluidströmung zwischen Netz und Verbraucher gibt. Beim ungerichteten System muss bei jedem Verbraucher eine zusätzliche Förderpumpe installiert werden, wobei der Einbau bzw. die Umschaltung der Pumpe die Richtung des Fluidstromes in

Hinblick auf das zentrale hydraulische Netz bestimmt. Die dezentrale Pumpe kann das Fluid aus Vorlauf- bzw. Rücklauf beziehen bzw. einspeisen. Abb. 7 verdeutlicht den Zusammenhang exemplarisch⁷.

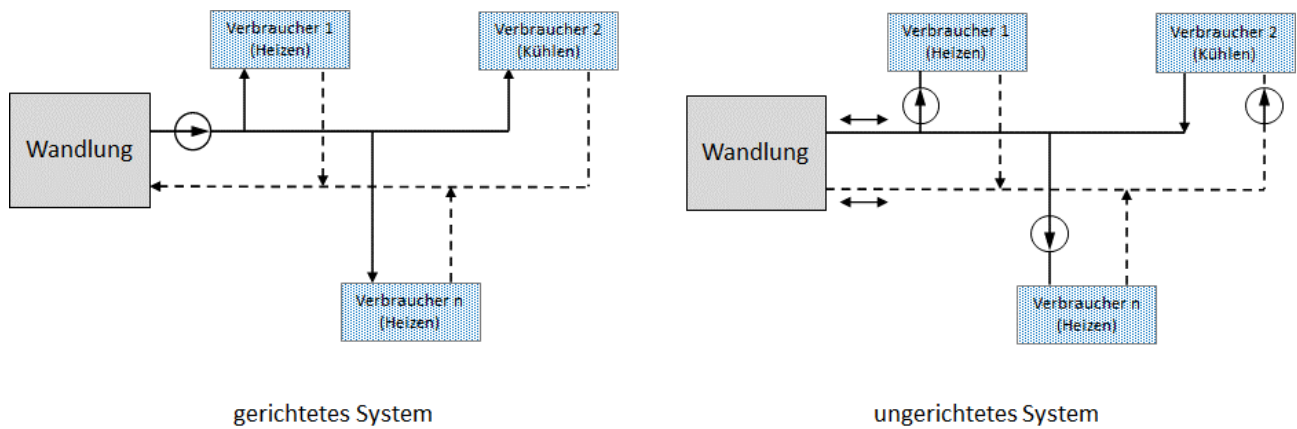


Abb. 7: „gerichtetes“ und „ungerichtetes“ hydraulisches Netz

Technologieauswirkung

Die Absenkung der Systemtemperaturen auf der Primärseite hat natürlich signifikante Auswirkungen auch auf das sekundäre energetische System. Im Wesentlichen sind hierbei die Raumheizsysteme bzw. die Systeme zur Trinkwarmwasserbereitung betroffen.

Sekundärseite

Heizungssystem

Bei Wärmenetzen der 5. Generation erfolgt eine drastische Absenkung der Systemtemperaturen in den in Tab. 2 dokumentierten Bereichen. Die Art der Ankopplung des sekundären Heizsystems ist bei den Wärmenetzen der 5. Generation stark abhängig von der tatsächlich, garantierten Vorlauftemperatur. Üblicherweise werden für sekundäre Heizsysteme die in Abb. 8 aufgezeigten Temperaturniveaus verwendet.

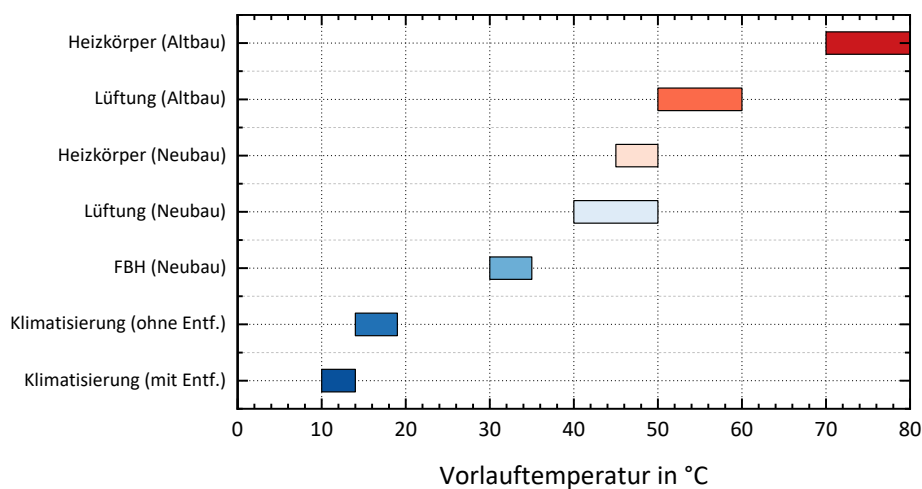


Abb. 8: typische System-Vorlauftemperaturen für unterschiedliche sekundäre Anwendungen (vgl. [13/14])

⁷ Vertiefende Informationen zu „gerichteten“ und „ungerichteten“ hydraulischen Netzen können [12] entnommen werden.

Nimmt man die Grenze von $\vartheta_v=49^\circ\text{C}$ für die Vorlauftemperatur an, so können Altbaugebäude nicht mehr direkt versorgt werden. Hier muss ein Zwischensystem installiert werden, um das sekundäre Wärmeübergabesystem bedienen zu können. Alternativ ist eine Vergrößerung der Heizfläche vorzunehmen. Bei Neubauten ist mit einer sehr geringen Vorlauftemperatur die Möglichkeit gegeben, die Sekundärtechnologie thermisch, bezogen auf die Beheizung, zu versorgen⁸.

Liegt die Primärtemperatur in der Nähe der Umgebungstemperatur zwischen $10^\circ\text{C} \leq \vartheta_v \leq 20 \dots 25^\circ\text{C}$ so ist für das sekundäre Heizungssystem zwingend eine Technologie vorzusehen, die das notwendige Temperaturniveau auf der Gebäudeseite sichert. Hierzu sind prinzipiell Wärmepumpensysteme (Wasser-Wasser WP) oder elektrische Direktheizungssysteme geeignet.

Für den Kühlfall, d.h. die passive Klimatisierung mit und ohne Entfeuchtung, müssen bei direkter Einbindung die Temperaturen des Primärsystems bei $8^\circ\text{C} \leq \vartheta_v \leq 18^\circ\text{C}$ liegen. Besonders bei der aktiven Entfeuchtung in Klimaanlage muss eine dauerhafte Unterschreitung des Taupunktes sichergestellt sein (vgl. Angaben in [15]).

Trinkwarmwassersystem

Die niedrigen Temperaturen der Wärmenetze der 5. Generation haben ebenfalls Auswirkungen auf die Trinkwassererwärmung, da hier aus hygienischen Bedingungen (Legionellen) Mindesttemperaturen gefordert sind. Kenngrößen der Anforderung sind nach DVGW W 551 [16]

- $\vartheta_w \geq 60^\circ\text{C}$ am Austritt des Trinkwassererwärmers,
- $\Delta\vartheta=5\text{K}$ Spreizung im zirkulierenden Warmwassersystem.

Mit den niedrigen Temperaturen von Wärmenetzen der 5. Generation können diese Temperaturanforderungen nicht mehr direkt, mittels eines einfachen Wärmeübertrages, realisiert werden. Technologisch sind unterschiedliche Optionen möglich, um die geforderten Temperaturen zu realisieren. Zu nennen sind:

1. Wärmepumpeneinsatz zur TWE Bereitung (Hochtemperatur-WP)
2. gemischte Systeme aus unterschiedlichen Systemen (z.B. WP + elektrischer Heizstab oder WP + Gasbrennwertsystem)
3. Umstellung auf eine dezentrale TWE-Erzeugung mittels elektrischer Durchlauferhitzer.

Für eine zentrale Lösung sind zwei Systemlösungen in Abb. 9 dokumentiert. Eine Gegenüberstellung von weiteren Systemlösungen mit Wärmepumpe ist der Tab. 4 zu entnehmen.

⁸ Zu beachten ist in diesem Zusammenhang die treibende Temperaturdifferenz über den Wärmeübertrager, die nicht zu groß werden sollte.

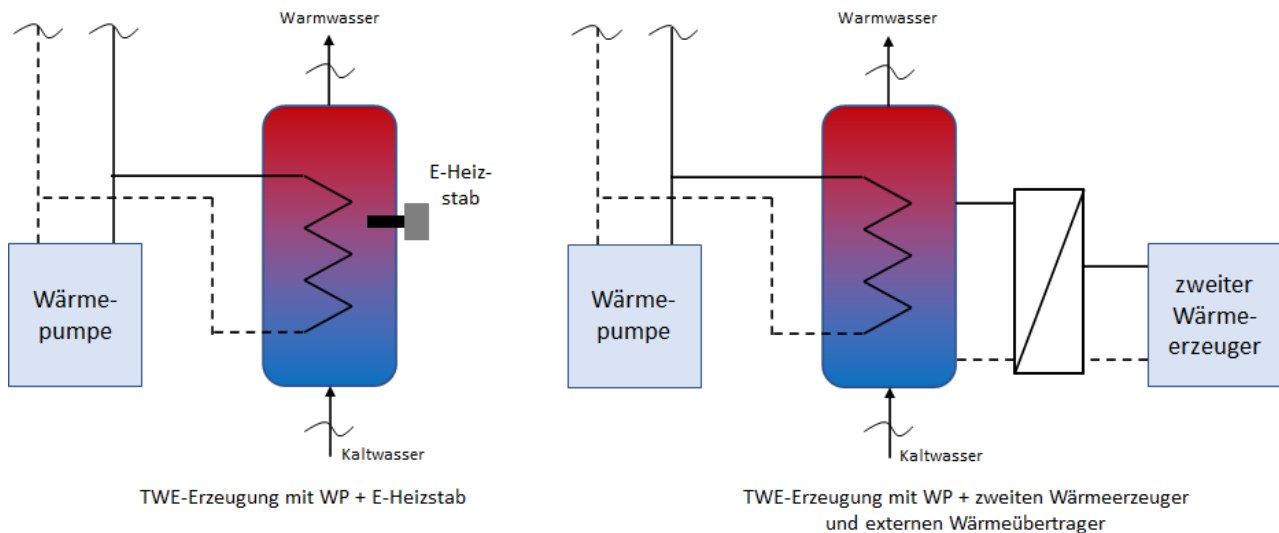


Abb. 9: Schaltungsvarianten mit Wärmepumpen für die zentrale TWE-Bereitstellung nach [17]

Tab. 4: Charakterisierung von Systemlösungen mit WP zur TWE Bereitstellung nach [17] die prinzipiell für Wärmenetze der 5. Generation geeignet sind

Beschreibung	Vorteil	Nachteil
Hochtemp.-WP + nebenstehender Speicher	hohe η_v , direkte Einbindung, kein Zusatzheizer	-
Hochtemp.-WP + nebenstehender Speicher (Speicherladesystem)	hohe η_v , WÜ frei wählbar	höhere Verluste des WÜ
WP + nebenstehender Speicher + Heizstab (im Speicher oder in der WP)		Zusätzliches Heizsystem, höherer Energieverbrauch
WP + nebenstehender Speicher + zweiter Wärmeerzeuger	Abdeckung hoher Leistungsspitzen, Hybridsystem (Wahl des günstigsten WE im Betrieb)	hohe Investitionskosten
WP + nebenstehender Speicher + zweiter Wärmeerzeuger zur VL-Anhebung der WP	Abdeckung hoher Leistungsspitzen	hohe Investitionskosten

Primärseite

Primärseitig hat eine weitere Absenkung der Netztemperaturen zur Folge, dass die effiziente Einspeisung erneuerbarer Energien und eine Reduzierung der Wärmeverluste ermöglicht wird. Hierdurch wird einerseits der Bedarf an konventionellen Technologien zur Erzeugung hoher Temperaturen, wie KWK-Anlagen, Gaskraftwerke oder industrielle Abwärme reduziert und andererseits die Möglichkeit der Erschließung regenerativer Energien begünstigt. In erster Linie sind in diesem Zusammenhang die Solarthermie sowie die Wärmepumpen zu nennen.

Eine wesentliche Begrenzung der primärseitigen Temperaturabsenkung in Wärmenetzen besteht ebenfalls in der Notwendigkeit des Legionellenschutzes im Trinkwarmwasserbereich.

Sekundärseitig (Gebäudeseitig) wurden hierzu im vorhergehenden Abschnitt verschiedene Varianten zur lokalen Temperaturerhöhung vorgestellt.

Um diesen Punkt auch primärseitig, also im Wärmenetz, zu erschließen wurden bereits erste Ansätze vorgestellt [18]. Hierbei ist vorgesehen, die primärseitige Vorlauftemperatur nur dann anzuheben, wenn die dezentralen Speicher der Trinkwassererwärmung ein Ladesignal an eine zentrale Steuerung senden. Alternativ dazu, kann die Beladung aller dezentralen Speicher Gebäude dabei in einheitlichen, festgelegten Intervallzeiten erfolgen (zyklische Beladung). Dies würde somit im Gegensatz zur bisherigen konstanten Betriebsweise von Wärmenetzen einem intermittierenden Betrieb darstellen. Diese flexible Betriebsweise führt jedoch zu zeitlichen Verzögerungen in der Versorgung der einzelnen Abnehmer/Gebäude innerhalb des Wärmenetzes. D.h. Verbraucher mit größerer Entfernung zum jeweiligen Wärmeerzeuger würden später versorgt werden, örtlich näher gelegene Verbraucher. Aus diesem Grunde ist eine solche Fahrweise bislang nur für relativ kleinen Kommunen oder auf Quartiersebene vorgesehen, um eine ausreichende Versorgung der Verbraucher sicherzustellen.

Ein großer Vorteil der Temperaturabsenkung besteht darin, dass regenerative Energien vergleichbar technologisch einfach in ein Versorgungssystem eingebunden bzw. überhaupt genutzt werden können und gleichzeitig an weiteren Standorten im urbanen Raum verfügbar gemacht werden, welche andernfalls auf Grund räumlicher oder städtebaulicher Restriktionen nicht regenerativ versorgt werden könnten. Aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht kann am Beispiel der Solarthermie erwähnt werden, dass eine mittlere Temperaturreduzierung es u.U. ermöglicht z.B. kostengünstigere Flachkollektoren an Stelle von teureren Vakuum-Röhrenkollektoren zu verwenden.

Wirtschaftlichkeit

Die technologische Weiterentwicklung zu einem Wärmenetz der 5. Generation und die damit verbundenen veränderten Randbedingungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Betrieb dieses Versorgungssystems. Aus ganzheitlicher Sicht muss diese für die Primär- und Sekundärseite erfolgen, wodurch die Komplexität der wirtschaftlichen Betrachtung erheblich gesteigert wird. Daher wird sich im Folgenden auf den Einfluss der Netzverluste sowie die Netzkosten (Betriebskosten, kapitalgebundene Kosten) auf der Primärseite beschränkt. Grundlage bildet hierfür eine Studie zur Wärmeversorgung in Deutschland aus ökologischer und ökonomischer Sicht [11]. Wichtig in diesem Zusammenhang sind zwei Definitionen, die berücksichtigt werden müssen. Es handelt sich um die Wärmestromdichte und die Abnehmerdichte. Diese sind wie folgt definiert:

Wärmestromdichte:

Die Wärmebedarfsdichte definiert die Wärmelieferung pro Länge Fernwärmeleitung und Jahr (kWh/m a). Sie stellt eine Kenngröße pro Meter Leitungslänge dar und ist damit für das Verteilnetz eine charakteristische Kenngröße.

Abnehmerdichte:

Als Abnehmerdichte werden die Netzmeter pro Hausanschluss verstanden. Die Abnehmerdichte gibt eine Aussage zur Typologie des hydraulischen Netzes, jedoch nicht zu energetischen Kennwerten.

Für die nachfolgenden Betrachtungen soll vorrangig die energetische relevante Wärmestromdichte als Vergleichskenngroße herangezogen werden.

Primärseite

In Bezug auf den angebotenen Wärmepreis eines Systems haben die thermischen Netzverluste sowie Netzkosten für Bau und Betrieb einen entscheidenden Einfluss. Die Netzkosten für den Bau bzw. die Erweiterung eines Wärmenetzes sind in Deutschland in einem hohen Maße projektbezogen und hängen von unterschiedlichen Faktoren ab. Hierzu werden zwar in der Literatur allgemeine Angaben getroffen, jedoch können diese aufgrund der wenigen Quellen nur unzureichend Aufschluss geben. In der Tendenz steigen die Netzkosten je bebauter/urbaner Fläche im Vergleich zu einer freien Fläche sowie mit größer werdender Netzlänge an. In Anlehnung an die Angaben in [11] kann für diese Betrachtung ein für Deutschland durchschnittlicher Referenzfall definiert werden. Dieser entspricht:

- einem Wärmepreis⁹ von 91,60 €/MWh,
- einem thermischen Netzverlust von 13 % sowie
- einem Anteil der Netzkosten¹⁰ am Wärmepreis von 20 %.

In Tabelle 5 sind die Auswirkungen der thermischen Netzverluste auf den Wärmepreis nach [11] dargestellt. Zusätzlich sind die relativen Wärmepreisänderungen bei Temperaturniveaus von $\vartheta_M=40^\circ\text{C}$ bzw. $\vartheta_M=20^\circ\text{C}$ dokumentiert. Es wird deutlich, dass durch eine Reduzierung des Temperaturniveaus auch monetär eine erhebliche Kosteneinsparung von bis zu 25,5 % auf die Referenzvariante möglich ist.

Tab. 5: relative Veränderung im Wärmepreis im Bezug zum Referenzfall (konstante Netzkosten)

	Netzverluste in %					
	10	13 (Referenz)	15	25	6 ($\vartheta_M=40^\circ\text{C}$)	4 ($\vartheta_M=20^\circ\text{C}$)
relative Wärmepreisänderung	-8,0 %	0,0 %	5,5 %	34,0 %	-19,8 %	-25,5 %

Demgegenüber haben die Netzkosten ebenfalls einen Einfluss auf den angebotenen Wärmepreis. In Bestandsnetzen sind diese jedoch von untergeordneter Bedeutung, da hier bestehende Anlagen durch vergleichsweise geringe Anpassungen (z.B. dem Einbau größerer Pumpen, Änderung von Steuerungsparametern) gewandelt werden können¹¹. Einen größeren Einfluss haben in diesem Punkt die Neuerschließung von Quartieren und Bereichen im suburbanen Raum, welche durch einen geringeren Wärmeverbrauch pro erschlossener Grundfläche charakterisiert sind. In diesem Fall würde eine Erhöhung der Leitungslänge, bei gleichzeitig reduzierter Wärmebedarfsdichte zu einer Erhöhung der Netzkosten führen. Exemplarisch ist die Veränderung des Wärmepreises für den Referenzfall sowie das Wärmenetz der 5. Generation (Temperaturniveau ($\vartheta_M=40^\circ\text{C}$)) in Tab. 6 dargestellt.

⁹ Brutto Mischpreis, angenommene Anschlussleistung 15 kW, 2014/2015

¹⁰ Kapitalgebundene Kosten (inkl. Bau) sowie für Betrieb (Stromkosten)

¹¹ Voraussetzung dieser Annahme ist, dass das Leitungsnetz nicht erneuert werden muss.

Tab. 6: relative Veränderung im Wärmepreis im Bezug zum Referenzfall (variable Netzkosten)

	Anteil Netzkosten am Wärmepreis	Netzverluste in %	
		13 (Referenz)	6 ($\vartheta_M = 40^\circ\text{C}$)
rel. Veränderung des Wärmepreises	10 %	-10,0 %	-24,4 %
	20 %	0,0 %	-19,8 %
	30 %	+10,0 %	-15,1 %

Tabelle 6. zeigt, dass zukünftig besonders hohe Wärmepreise zu erwarten sind, wenn durch einen hohen Netzausbau (mit gleichem Temperaturniveau) Gebiete mit einer vergleichbar niedrigen Wärmebedarfsdichte und damit verbundenen hohen Netzverlusten erschlossen werden (Veränderung im Wärmepreis von 10%). Betrachte man sich hingegen den Wert von 30% Netzkosten und hier den Netzverlust von 6% so kann durch die Absenkung der Systemtemperaturen immer noch eine Verringerung des Wärmepreises von 15,1% realisiert werden. D.h. auch bei ungünstigeren Randbedingungen (z.B. geringere Anschlussdichten, die durch eine stärkere Dämmung der Gebäude zu erwarten sind) kann eine Reduktion des Wärmepreises realisiert werden.

Sekundärseite

Ein geändertes Temperaturniveau der Primärseite erfordert wiederum Änderungen an der technischen Umsetzung auf der Sekundärseite innerhalb der Gebäude, wodurch die möglichen Kostenreduktionen der Primärseite mit möglichen Erhöhungen auf der Gebäudeseite gegenübergestellt werden müssen.

Die notwendige zusätzliche Temperaturerhöhung innerhalb der Gebäude kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, indem zusätzlich regenerative Energien einbezogen werden. Umgesetzt werden kann dies durch Wärmepumpen, Solarthermie und regenerativen Strom (PV und Wind). Hierdurch ist jedoch im Vergleich zu einer konventionellen Wärmeübergabestation mit Mehrkosten zu rechnen. Die Tabelle 7 gibt hierzu eine Auswahl und ersten Überblick über mögliche Mehrkosten von Einzelkomponenten (Stand 10/2021). Anzumerken ist hierbei jedoch, dass die Kosten aktuellen Handelspreisen der Hersteller entsprechen und als zu entwickelnde Systemlösung bzw. Kombination miteinander niedrigere Preise zu erwarten sind.

Tab. 7: Investitionskosten für ergänzende Sekundärtechnik [16]

Kostenfaktor	Kosten in € (brutto)
Heizstab	250 ... 500
ggf. Kombispeicher	1500 ... 3000
Regelung	500 ... 1000
Mini-Brauchwasser-Wärmepumpe (< 3kW)	500 ... 2500
Mini-Wärmepumpe (5 ... 9 kW)	4000 ... 8000
Luft-Wärmepumpe (9 ... 15kW)	8000 ... 15000
Temperaturhaltebänder (System inkl. Steuerung)	20 ... 35 €/m

Hinweise bei der Planung

Die Umsetzung von Wärmenetzen der 5. Generation ist komplex, da es viele Wechselwirkungen zwischen der primären und der sekundären Seite gibt. Zu Realisierung ist zunächst zu klären, ob Umweltwärme / Abwärme bzw. Überschussenergie in dem notwendigen Maße überhaupt zur Verfügung steht und dies in Einklang mit dem Bedarf auf der Verbrauchsseite steht (Wärmebedarfsdichte / Anschlussdichte). Hierbei ist besonders auch der Flächenbedarf zu fokussieren, der für die Erwirtschaftung der Umweltenergie aufgebracht werden muss. Im zweiten Schritt ist zu detektieren, ob die bestehenden hydraulischen Verteilsysteme hinsichtlich der hydraulischen Transportkapazitäten geeignet sind oder ob ein Ausbau dieser erfolgen muss. Beispiele für die Leitungsgestaltung sind den vorangestellten Kapiteln zu entnehmen. Dritter wesentlicher Punkt ist die Detektion der Anlagentechnik, der Platzverhältnisse bei den Sekundärsystemen. Ein weiterer Punkt, welcher bei der Planung berücksichtigt werden sollte, ist die Thematik der IT-Infrastruktur und Kommunikationstechnik. Eine dezentrale Versorgung eines Wärmenetzes mit mehreren unterschiedlichen Erzeugungseinheiten und Technologien erfordert einen erhöhten Aufwand zur optimierten Steuerung des Gesamtsystems. Dies umfasst einerseits die Datenerfassung (Messtechnik vor Ort bei Erzeugung und Verbrauch), den Datentransfer/die Kommunikation (diverse Gateways, Kommunikationsmodule) sowie eine zentrale Steuereinheit (zur Datenaggregation, Fahrplangestaltung/Steuerung, Prognoseerstellung, ...). Diesen Mehraufwand gegenüber einer „klassischen“ Wärmeversorgung gilt es, besonders auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, zu betrachten. Des Weiteren erfordert diese Thematik zusätzliche Kenntnis der Installateure der IT-Technik (z.B. Schnittstellenprogrammierung/-parametrierung)¹². Alle Punkte sind einer wirtschaftlichen Prüfung zu unterziehen, die einen Vergleich zu einer dezentralen Versorgung beinhaltet. Abb. 10 beschreibt das Vorgehen schematisch.

¹² Umfassende Ausführungen zur IK-Technik bei komplexen Energiesystemen können auf www.n5geh.de gewonnen werden (siehe auch [19]/[20]).

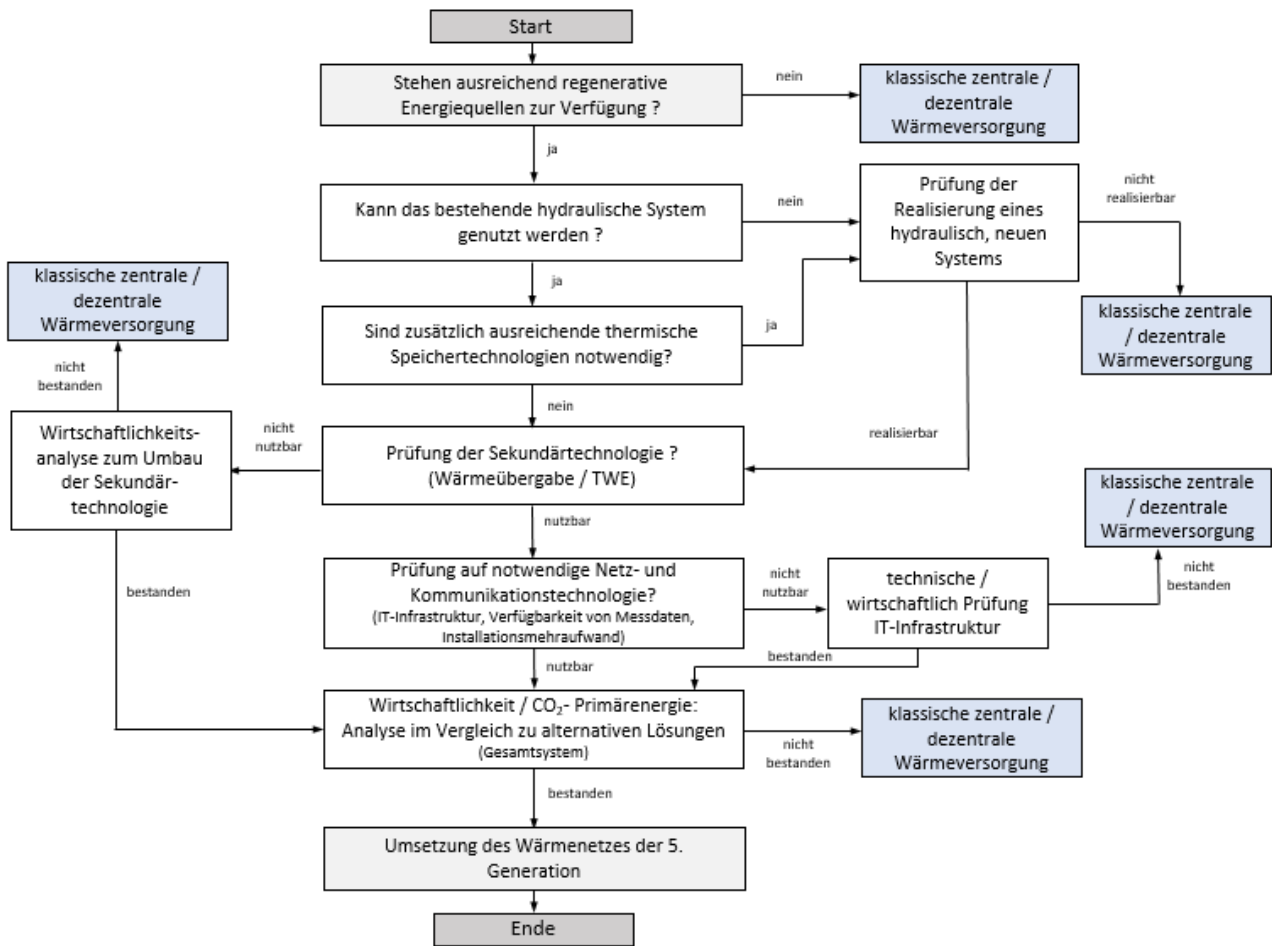


Abb. 10: Vorgehensweise bei einer zentralen / dezentralen Versorgungsstruktur mit speziellem Bezug zu Wärmenetzen der 5. Generation

Fazit

Wärmenetze der 5. Generation sind die konsequente Weiterentwicklung bestehender Wärmenetze, die neben der reinen Wärmeversorgung auch die Kühlung bei den Verbrauchern adressiert. Ziel der technischen Weiterentwicklung ist grundsätzlich die Absenkung der Systemtemperaturen und somit eine Reduktion der Verteilverluste im Primärsystem. Mit der Umsetzung dieser primärseitigen Temperaturabsenkung sind jedoch Herausforderungen auf der Sekundärseite, d.h. beim Verbraucher verbunden. Positiv zu nennen ist, dass bei Systemtemperaturen nahe der Umgebungsbedingungen ($10^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_v \leq 20^{\circ}\text{C}$) passive Kühlsysteme mitversorgt werden können. Hinsichtlich des Heizfalles sind jedoch Anpassungen auf der Sekundärseite vorzunehmen. Das Temperaturniveau der Primärseite muss der Sekundärseite angehoben werden (Trinkwarmwasserversorgung). Hierzu können Wärmepumpen oder elektrische Direktheizsysteme verwendet werden. Alle klassischen Heizsysteme sind ebenfalls zur Temperaturanhebung auf der Sekundärseite geeignet. Weiterhin muss die Trinkwassererwärmung ertüchtigt werden. Hier gelten die gleichen Aussagen wie bei der Heizwärmeversorgung jedoch ergänzt unter den Bedingungen der Legionellenvermeidung. Ein besonderer Vorteil der Wärmenetze der 5. Generation besteht darin, dass regenerative Energien (thermisch und elektrisch) im Rahmen eines ganzheitlichen Verbundsystems im Vergleich zu aktuellen Systemen relativ einfach eingebunden werden können¹³.

¹³ PV-Anlagen mittels Power to heat – Systemen / solartechnische Anlagen mittels Wärmeübertrager

Des Weiteren werden die zukünftigen Wärme-/Kältenetze als sogenannte Ringspeicher eine Anwendung finden, welche die Flexibilität in der Energieversorgung erheblich erhöhen und damit einen wesentlichen Bestandteil in der Sektorenkopplung (Wärme/Strom/Mobilität) darstellen. Zusammenfassend zu den bisherigen Aussagen und der Vorstellung der Wärmenetze der 5. Generation können die Vor- und Nachteile von Wärmenetzen der 5. Generation entsprechend Tab. 8 dokumentiert werden.

Tab. 8: Übersicht technischer Vor- und Nachteile von Wärmenetzen der 5. Generation (kalter Nahwärme)

Vorteil	Nachteil
<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der Wärmeverluste gegenüber bestehenden Systemen - Nutzung als Ringspeicher -> Bereitstellung eines Flexibilitätspotentials für Verbrauch und Erzeugung - einfachere Einbindung regenerativer Energien (Flächenunabhängig von den Gebäuden) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturniveau nicht ausreichend für gebäudeseitig direkte Trinkwarmwasserbereitung - Zusätzliches sekundäres Heizsystem notwendig (z.B. über Wärmepumpen bzw. konventionelle Heizsysteme) - Legionellenschutz u.U. höherer Energieverbrauch bei der TW-Bereitung - voraussichtlich hohe Investitionskosten

Das Konzept des Wärmenetzes der 5. Generation (Kalte Nahwärme) **eignet** sich besonders, wenn:

- das zu versorgende Gebiet / Quartier eine vergleichsweise geringe Wärmebedarfsdichte aufweist (Neubau inkl. Neuerschließung von Gebieten oder hohe Sanierungsquote), da diese leichter durch natürliche Quellen gedeckt werden kann.
- neben der Wärmerversorgung zusätzlich der Anwendungsfall der Kühlung adressiert wird.
- Das Wärmenetz als sogenannter Ringspeicher genutzt wird, um auf diese Weise für eine verstärkte Sektorenkopplung ein Flexibilitätspotential zu ermöglichen. (flexibler Betrieb der einzelnen Erzeuger und Verbraucher)
- die dezentral in den Gebäuden erzeugte regenerative Wärme in das Wärmenetz eingespeist/rückgespeist und darin zwischengespeichert werden kann
- durch den Heiz- wie den Kühlfall sich Synergien bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung ergeben.

Das Konzept des Wärmenetzes der 5. Generation (Kalte Nahwärme) bietet folgende **Vorteile für SHK-Fachbetriebe**:

- Anschlussmöglichkeit als Wärmequelle für Wärmepumpen (Absatzerhöhung, Installation, Wartung)
- Installierte Technik im Gebäude bleibt im Geschäftsbereich der SHK-Fachbetriebe (im Gegensatz zur Fernwärmeübergabestation)
- Hybride Analgentechnologie im Gebäudebereich und damit höherer Beratungsbedarf durch die SHK Branche
- Entwicklung von passgenauen Systemlösungen für die Sekundärtechnologie (Heizung/ Klima / TWE)

Das Konzept des Wärmenetzes der 5. Generation (Kalte Nahwärme) ist **eher nicht geeignet**, wenn:

- das zu versorgende Gebiet eine hohe Wärmebedarfsdichte aufweist, die nicht vollständig aus regenerativen Quellen gedeckt werden kann.
- die angeschlossenen Verbraucher ein hohes Temperaturniveau ($>60^{\circ}\text{C}$) zur Beheizung benötigen (Bsp.: unsanierter Gebäudebestand)
- die Einbindung von erneuerbaren Energien nicht oder nur schwer möglich ist (Lage, Flächenverhältnisse, Bebauung)
- das bestehende Platzangebot neben bereits bestehenden Leitungen (Fernwärme, Strom, Wasser, Telekommunikation ...) zu gering ist, bezogen auf den Neubau dieses Netzes
- gebäudeseitig keine Möglichkeit zur Installation eines weiteren Wärmerzeugers zur Temperaturerhöhung vorhanden ist (z.B. begrenztes Platzangebot im Hausanschlussraum)

Formelverzeichnis

c_p	spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
d_a	Außendurchmesser	m
d_i	Innendurchmesser	m
K	Sicherheitszuschlag für das Pumpen-Anfahrverhalten ($K=1,05 \dots 1,20$)	-
\dot{Q}	Gesamtwärmestrom	W
L	Rohrlänge	m
\dot{m}	Massestrom	kg/s
Δp_P	Drucksprung der Pumpe	Pa
\dot{V}_P	Volumenstrom über die Pumpe	m^3/s
ϑ_L	Lufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_M	mittlere Medientemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_R	Rücklauftemperatur des Netzes	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_U	Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_V	Vorlauftemperatur des Netzes	$^{\circ}\text{C}$
α_i	Wärmeübergangskoeffizient innen	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
α_a	Wärmeübergangskoeffizient außen	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
λ_n	Wärmeleitfähigkeit der Schicht n	$\text{W}/(\text{m K})$
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad (Kombination auf dem Wirkungsgrad der Pumpe + Motor)	

Literatur

- [1] Urbanisierungsgrad: Anteil der Stadtbewohner an der Gesamtbevölkerung in Deutschland in den Jahren von 2000 bis 2020., statista 11.10.2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/662560/umfrage/urbanisierung-in-deutschland/>
- [2] BMWi: Zahlen und Fakten: Energiedaten – nationale und internationale Entwicklung, BMWi; 05.03.2021 (<http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html>)
- [3] UN Habitat – Report: The Streatgic Plan 2020 – 2023, United Nations
- [4] Statistisches Bundesamt Wiesbaden: Bauen und Wohnen – Mikrozensus- Zusatzerhebung 2014 Bestand und Struktur der Wohneinheiten Wohnsituation der Haushalte, 2016
- [5] Buffa, S.; Cozzini, M.; D’Antoni, M.; Baratieri, M.; Fredrizzi, R.: 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews 104 (2019), page 504 -522
- [6] Buffa, S.; Fouladfar, H.F.; Franchini, G.; Gabarre; I. L.; Chicote, M.A.: Advanced Control and Fault Detection Strategies for District Heating and Cooling Systems—A Review, applied sciences, 2021, 11, 455.
- [7] Calixto, S.; Cozzini, M.; Manzolini, G.: Modelling of an Existing Neutral Temperature District Heating Network: Detailed and Approximate Approaches; Energies 2021, 14, 379
- [8] Gabrielli, P., Acquilino, A., Siri, S., Bracco, S., Sansavini, G., Mazzotti, M.: Optimization of low-carbon multi-energy systems with seasonal geothermal energy storage: The Anergy Grid of ETH Zurich; Energy Conversion and Management: X; 2020
- [9] Sulzer, M, Werner, S., Mennel, S., Wetter, M.: Vocabulary for the fourth generation of district heating and cooling, Smart Energy 1; 2021
- [10] Jones, S. R.; Gillott, M.; Boukhanouf, R.; Walker, G.; Tunzi, M; Tetlow, D.; Rodrigues, L.; Sumner, M.: A System Design for Distributed Energy Generation in Low-Temperature District Heating (LTDH) Networks; Future Cities and Environment, 5(1): 2, 1–11
- [11] A. Pfnür, B. Winiewska, B. Mailach und B. Oschatz, „Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt - vergleichende Studie aus energetischer und ökologischer Sicht,“ Forschungscenter betriebliche Immobilienwirtschaft FBI an der TU Darmstadt / ITG Dresden , 2016
- [12] Hangartner, D.; Ködel, J.; Mennel, S.; Sulzer, M.: Grundlagen und Erläuterung zu Thermischen Netzen, Hochschule Luzern, 2018
- [13] Seifert, J.: Ein Beitrag zur Einschätzung der energetischen und exergetischen Einsparpotentiale von Regelverfahren uin der heizungstechnik, Habilitationsschrift, TU Dresden 2009
- [14] Seifert, J.; Schinke, L.: Flächenheiz- und Flächenkühlsystem – Grundlagen – Wärmephysiologie – Auslegung – Systemintegration, Springer Vieweg Verlag, 2021
- [14] Seifert, J.: Thermodynamik der feuchten Luft – Theoretische Grundlagen, Prozessverläufe, Beispiele, ITM Verlag 2017
- [15] M. Altenburger, Potenzialabschätzung eines Systemreglers zur Einkopplung von PV-Strom in ein Fernwärmeversorgungskonzept für Mietwohngebäude, Diplomarbeit TU Dresden, 2021.
- [16] DVGW W 551: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; technische Maßnahmen zur Vermeidung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen, DVGW; 2004

- [17] BWP: Leitfaden Trinkwassererwärmung; Bundesverband Wärmepumpen e.V.; 2013
- [18] Robbi, S.: Vergleichende Bewertung von Maßnahmen für eine effiziente, multifunktionale Fernwärmeversorgung, Dissertation, TU Dresden 2013
- [19] Seifert, J.; Schegner, P.; Meinzenbach, A.; Seidel, P.; Haupt, J.; Schinke, L.; Werner, J.; Hess, T.: regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie, VDE-Verlag 2015
- [20] Seifert, J.; Werner, J.; Seidel, P.; et al.: RVK II – Praxiserprobung des regionalen Virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie, VDE-Verlag 2018