

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstraße 2, 79100 Freiburg

Fachverband Gebäude-Klima e. V.
Danziger Straße 20
74321 Bietigheim-Bissingen
Tel.: +49 7142 78 88 99 0
Fax +49 7142 78 88 99 19
E-Mail: info@fgk.de
www.fgk.de

Bestell-Nr.: 305 06/2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einleitung.....	4
1.1 Thermodynamische Grundlagen	4
1.2 Niederexergetische Wärmeübertrager	4
1.3 Anforderungen und Besonderheiten	5
2 Konzeption.....	7
2.1 Hydraulische Topologie	7
2.2 Hydraulische Schaltungen	9
2.3 Hydraulische Etagentopologie	10
3 Dimensionierung.....	12
3.1 Rohrsysteme	12
3.2 Pumpen	13
4 Quellennachweis	15

1 Einleitung

1.1 Thermodynamische Grundlagen

Charakteristisch für niederexergetische Wärme- und Kälteversorgungssysteme ist, dass die Wärmeübergabe im Raum mittels Temperaturniveaus nahe der Raumtemperatur erfolgt. Im Heizbetrieb werden typischerweise Vorlauftemperaturen zwischen 22 und 35 °C und im Kühlbetrieb zwischen 17 und 22 °C verwendet. Dies bietet die Möglichkeit, dass Umweltwärmequellen und –senken für die Wärme- und Kälteversorgung des Gebäudes eingesetzt werden können. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Umweltwärmequelle bzw. –senke und Raum können Wärmepumpen mit hohen Leistungszahlen betrieben werden.

Für die Wärme- und Kälteversorgung ergeben sich drei Betriebsmodi:

- Heizbetrieb: Wärmetransformation mittels Wärmepumpe von Umweltwärmequelle zum Raumwärmeübergabesystem
- Aktiver Kühlbetrieb: Wärmetransformation mittels reversibler Wärmepumpe von Raumwärmeübergabesystem zur Umweltwärmesenke.
- Direkter Kühlbetrieb: Direkte Wärmeübertragung von Raumwärmeübergabesystem zur Umweltwärmesenke ohne Wärmetransformation. Lediglich Energieaufwand für die Umwälzpumpen erforderlich.

1.2 Niederexergetische Wärmeübertrager

Die Nutzbarmachung von Umweltwärmequellen und –senken für die Wärme- und Kälteversorgung (Primärkreis) kann über unterschiedliche Technologien wie z.B. Erdwärmesonden, Grundwasserbrunnen oder Kühltürme erfolgen. VDI 4640 [1] gibt Richtlinien für die Auslegung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

Für die niederexergetische Wärme- und Kälteübergabe im Gebäude (Sekundärkreis) werden Technologien mit einer großen wärmeübertragenden Fläche, typischerweise zwischen 50 und 90 % der Raumfläche, verwendet. In Abbildung 1 sind Flächentemperiersysteme schematisch dargestellt.

- Betonkerntemperierung bzw. Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS): Rohrregister im Betonkern der Geschossdecken. Überdeckungen zwischen Rohrebene und Deckenoberfläche typischerweise zwischen 4 und 20 cm.
- Fußbodentemperierung: Rohrregister im Estrich oder unter Fußbodenbelag.
- Abgehängte Heiz- und Kühldeckenpaneele: In Unterkonstruktion integrierte Rohrregister, befestigt an der Geschossdecke.
- Randstreifenelemente und Kapillarrohrmatten: Rohrregister in einer oberflächennahen Deckenschicht oder direkt an der Deckenoberfläche.

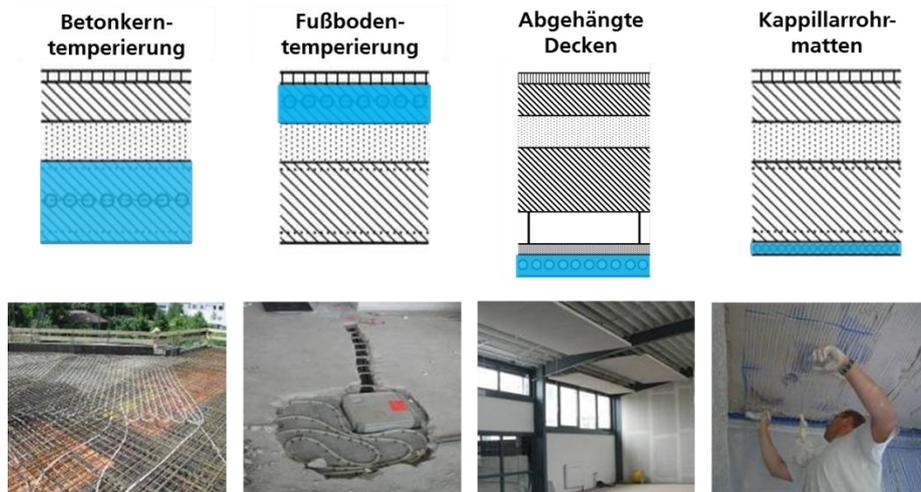


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Flächentemperiersystemen zur Wärme- und Kälteversorgung. Die thermisch aktivierten Querschnitte bzw. die Rohrebenen sind blau markiert.

Aufgrund der höheren hydraulischen Komplexität fokussiert dieser Leitfaden den Sekundärkreis.

1.3 Anforderungen und Besonderheiten

Die Einbindung niederexergischer Wärmeübertrager hat teilweise Einfluss auf die Anforderungen in der Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase des Gebäudes:

Hydraulikdimensionierung

Die Notwendigkeit hoher Wärmeübertragungsflächen sowohl in den Umweltwärmequellen und -senken als auch in den Raumwärmeübergabesystemen erfordert die Verwendung langer Rohrleitungen. Beispielsweise werden bei U-Erdwärmesonden und 100 m Bohrtiefe bereits 200 m Rohrlänge erreicht. Messtechnische Auswertungen mehrerer Gebäude in [2] zeigten, dass bei TABS starke Unterschiede bei den verlegten Rohrleitungslängen zwischen 71 und 218 m bestehen.

Des Weiteren können im Vergleich zu Hochtemperaturheiz- und Niedertemperaturkühlsystemen (z. B. Radiatoren oder Lüftungsanlagen) nur geringere Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf von ungefähr 2-5 K erreicht werden. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Wärmeübertragung sind daher deutlich höhere Volumenströme notwendig. In der Literatur wie z. B. [3] werden Volumenströme für TABS zwischen 10 und 15 l/h pro Quadratmeter wärmeübertragende Fläche empfohlen.

Raumtemperaturregelung

Schnell reagierende Wärmeübergabesysteme im Raum werden typischerweise mittels Volumenstromdrosselung durch Raumtemperaturregler geregelt, um auf Störungen durch Personenbelegung oder Sonneneinstrahlung zu reagieren. Bei TABS, welche durch die Einbettung in den Betonkern eine sehr hohe thermische Trägheit besitzen, ist dies nicht anwendbar. Vielmehr werden in Betriebsführungsstrategien geringe Temperaturgradienten zwischen Bauteiloberfläche und Raum angestrebt. Resultiert die Raumbel-

gung oder der Sonneneintrag in einer Erhöhung der Raumtemperatur sinkt im Heizbetrieb die Heizleistung durch den sinkenden treibenden Temperaturgradienten zwischen Bauteil und Raum. Entsprechend steigt im Kühlbetrieb die Kühlleistung durch den steigenden Temperaturgradienten. Dies wird als Selbstregelleffekt bezeichnet. Dennoch ist mit TABS selten eine definierte Raumsolltemperatur erreichbar, sondern die Raumtemperaturen werden in einem bestimmten Temperaturband z. B. zwischen 21 und 25 °C gehalten.

In den meisten Betriebsführungsstrategien von TABS z. B. in [3] werden außentemperaturgeführte Heiz- und Kühlkurven abhängig vom Baustandard und den zu erwartenden internen und solaren Lasten verwendet. Die Vorlauftemperaturen liegen dabei möglichst nahe der Raumtemperatur. Eine Volumenstromdrosselung in Teillast ist nicht vorgesehen. Unterhalb von Heizgrenztemperaturen bzw. oberhalb von Kühlgrenztemperaturen der Außentemperatur werden Nominalvolumenströme zwischen 10 und 15 l/(hm²_{TABS}) eingesetzt.

Pumpenenergieaufwand

In einem Quervergleich von 11 Niedrigenergiegebäuden mit verschiedenen LowEx Systemen (Abschnitt 1.2) wurde mittels Langzeitmonitoring über mehrere Betriebsjahre der Pumpenenergieaufwand analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass ein erheblicher Anteil des Gesamtenergiebedarfs für Heizung, Kühlung und Lüftung durch die Primär- und Sekundärpumpen bestimmt wird [4].

Durch den hohen Einfluss der Hydraulikdimensionierung und der hydraulischen Betriebsführung von Flächentemperiersystemen und Umweltwärmequellen/-senken im Allgemeinen sowie Thermoaktiver Bauteilsysteme im Besonderen kommt der Konzeption und Dimensionierung der hydraulischen Verteilsysteme in LowEx-Systemen eine besondere Bedeutung zu.

2 Konzeption

2.1 Hydraulische Topologie

Die hydraulische Topologie legt die Struktur des hydraulischen Verteilsystems fest. Dies ist besonders im Sekundärkreis für Wärme- und Kälteversorgung unterschiedlicher Zonen und der Gewährleistung eines hohen thermischen Komforts relevant.

Die hydraulische Topologie bezeichnet die Art der Anbindung der einzelnen thermischen Zonen des Gebäudes an die Wärme- und Kälteerzeuger bzw. den Hauptverteiler. Als thermische Zone wird in diesem Zusammenhang ein mit Flächentemperiersystem versorgter Gebäudeteil bezeichnet, für welchen die jeweilige Vorlauftemperatur individuell eingestellt werden kann. Abbildung 1 zeigt schematisch unterschiedliche Topologievarianten zur Versorgung von zwei thermischen Zonen in Zwei-, Drei- oder Vierleiterschaltung. Die Art der Topologie entscheidet über die Flexibilität der Wärme- und Kälteversorgung:

- Verteilleitungen: Die Anzahl der Verteilerleitungen legt fest, ob eine gleichzeitige Wärme- und Kälteversorgung unterschiedlicher Zonen möglich ist. Bei zwei Verteilerleitungen muss in der Betriebsführung zwischen Zeiten der Wärme- und Kälteversorgung unterschieden werden. Bei drei und vier Verteilerleitungen ist eine gleichzeitige Wärme- und Kälteversorgung unterschiedlicher thermischer Zonen möglich.
- Rücklaufleitungen: Die Umsetzung mit gemeinsamen oder separaten Rücklaufleitungen legt fest, ob eine Rücklaufbeimischung aus den separaten Rückläufen der jeweiligen Zonen oder aus der gemeinsamen Rücklaufleitung aller Zonen mit der sich ergebenden Mischtemperatur erfolgen kann. Separate Rücklaufleitungen ermöglichen mehr Flexibilität bei der zonenweisen Einstellung vordefinierter Vorlauftemperaturen.

Beispielsweise wäre bei der Topologie mit zwei Verteilerleitungen und gemeinsamer Rücklaufleitung die minimal mögliche Vorlauftemperatur der Zonen auf die niedrigste auftretende Rücklauftemperatur der Zonen begrenzt. Die Topologie mit vier Verteilerleitungen und separater Rücklaufleitung bietet die höchste Flexibilität, ist allerdings auch mit den höchsten Investitionen für die Umsetzung verbunden. Ein Extremfall bildet die hydraulische Topologie ohne Zonenaufteilung. Hierbei können unterschiedliche Gebäudezonen nicht gleichzeitig mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen versorgt werden.

Die Wahl der hydraulischen Topologie kann nicht allgemein vorgegeben werden. Sie richtet sich nach den Anforderungen an den thermischen Komfort, die Unterschiede zwischen den internen und solaren Lasten in den jeweiligen Gebäudezonen und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. In Systemen mit thermisch trägen thermoaktiven Bauteilsystemen ist jedoch darauf zu achten, dass die thermische Leistungsregelung hauptsächlich durch die Regelung der Vorlauftemperatur erfolgt. Falls in unterschiedlichen Gebäudezonen stark unterschiedliche Heiz- und Kühllasten vorliegen, sollte eine Topologievariante mit Zonierung verwendet werden.

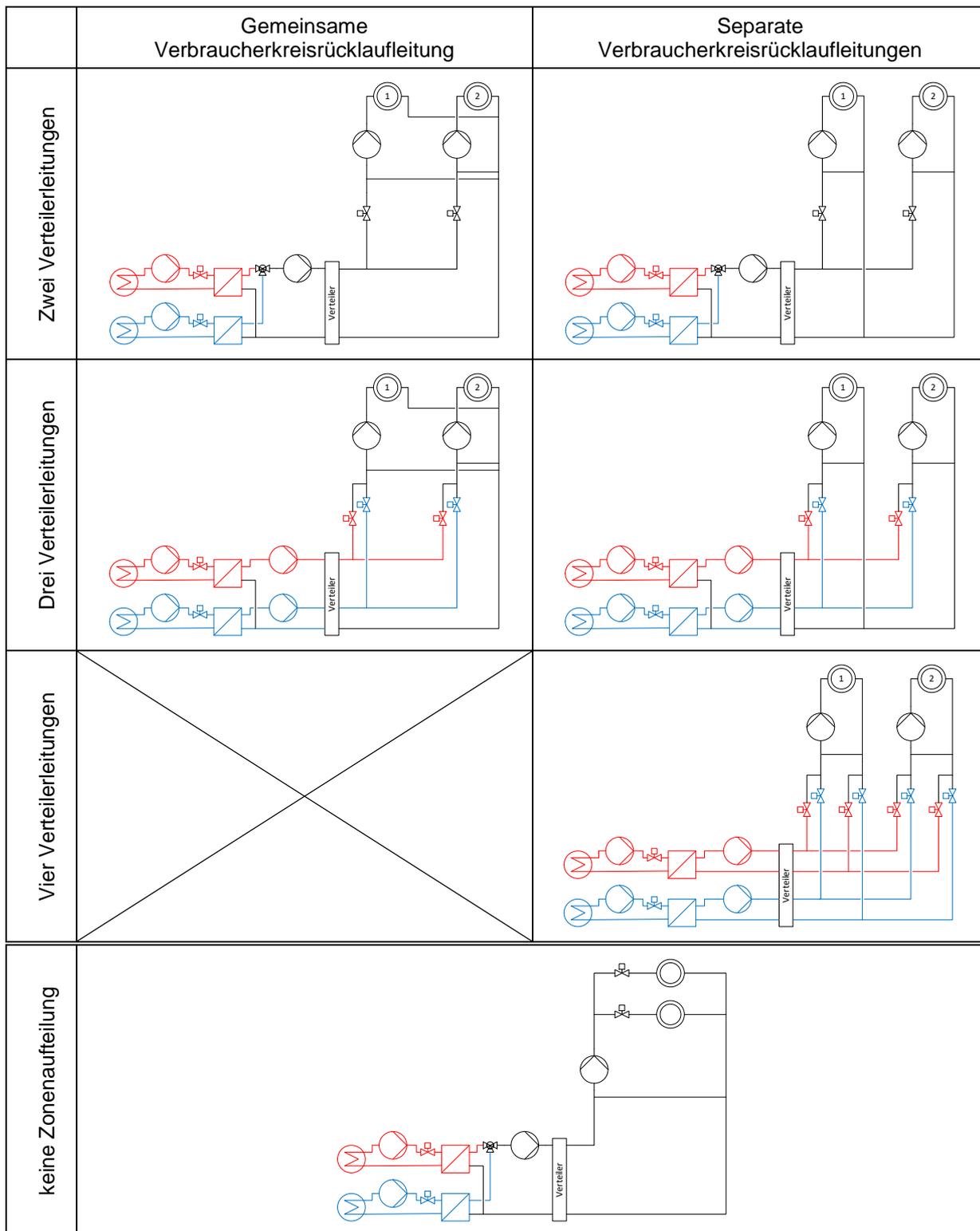


Tabelle 1: Schematische Darstellung hydraulischer Topologien zur Anbindung von Flächentemperiersystemen an die zentralen Wärme- und Kälteerzeuger (rot bzw. blau). In den Schemata werden beispielhaft Einspritzschaltungen mit Durchgangsventil verwendet.

2.2 Hydraulische Schaltungen

Im Sekundärkreis werden Flächentemperiersysteme für die Wärmeübergabe verwendet. Die Regelung von Flächentemperiersystemen erfolgt meist über außertemperaturgeführte Heiz- und Kühlkurven für die Vorlauftemperatur, welche über eine Rücklaufbeimischung erzielt werden. Des Weiteren werden durch die Rücklaufbeimischung geringe Rücklauftemperaturen erreicht, welche die Effizienz der Wärmetransformation erhöhen. Für die Rücklaufbeimischung sollte eine der in Abbildung 2 dargestellten hydraulischen Schaltungen verwendet werden.

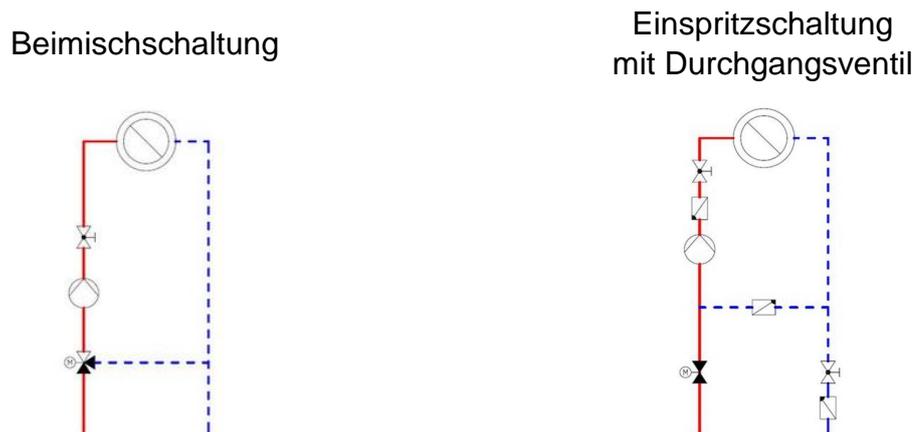


Abbildung 2: Hydraulische Schaltungen mit Rücklaufbeimischung zur Anbindung von Flächentemperiersystemen an den Hauptverteiler.

Die Anbindung an die Wärme- und Kälteerzeuger kann mit druckbehaftetem oder drucklosem Verteiler, mit oder ohne Hauptpumpe sowie Beimischschaltung oder Einspritzschaltung mit Durchgangsventil erfolgen. Beispielsweise eine der folgenden drei Varianten:

- 1) **Verteiler:** druckbehaftet
Hauptpumpe: nein
Wärmeübergabe: Beimischschaltung

Hierbei ist zu beachten:

- Volumenstrom über Erzeuger ist variabel
- Beeinflussung paralleler Wärmeübergabekreise
- Fehlzirkulationen möglich
- Überbrückung des Druckverlusts zwischen Wärme-/Kälteerzeuger und Verteiler durch die Pumpen im Wärmeübergabekreis
- Vorteilhaft für die Anbindung an einen Pufferspeicher

- 2) **Verteiler:** druckbehaftet
Hauptpumpe: ja
Wärmeübergabe: Einspritzschaltung mit Durchgangsventil

Hierbei ist zu beachten:

- Volumenstrom über Erzeuger ist variabel
- Vorteilhaft in Anlagen mit langen Wegen zwischen Erzeuger und Verteiler

- 3) **Verteiler:** drucklos
Hauptpumpe: ja
Wärmeübergabe: Beimischschaltung

Hierbei ist zu beachten:

- Klare hydraulische Entkopplung zwischen Erzeuger- und Wärmeübergabekreis
- Rücklauftemperatur vom Verteiler zum Wärme-/Kälteerzeuger höher als bei den anderen beiden Varianten
- Vorteilhaft bei Anbindung an Erzeuger, die einen konstanten Volumenstrom erfordern

2.3 Hydraulische Etagentopologie

Die Rohrregister bzw. Segmente der Wärmeübergabesysteme können auf unterschiedliche Arten innerhalb einer Etage an den Etagenverteiler angeschlossen werden.

Abbildung 3 zeigt schematisch 4 unterschiedliche Typen:

- Typ 1: Die einzelnen Segmente sind von der Anbindungsleitung der jeweiligen Etage über T-Stücke angebunden.
- Typ 2: Es werden zusätzlich zum Etagenverteiler dezentrale Verteilerbalken verwendet, von welchen wiederum die einzelnen Segmente versorgt werden.
- Typ 3: Die einzelnen Segmente werden ähnlich zu Typ 1 versorgt, jedoch mit einer zusätzlichen Hierarchiestufe für die Versorgung der einzelnen Segmente mit weiteren T-Stücken.
- Typ 4: Die einzelnen Segmente werden direkt vom Etagenverteiler verlegt.

Zur einfachen Realisierung eines hydraulischen Abgleichs innerhalb der Etage wird die Verlegung mittels Tichelmannschaltung empfohlen. Bei der Tichelmannschaltung werden die Vor- und Rücklaufleitungen derart verlegt, dass alle parallelen Kreise auf eine gleiche verlegte Gesamtröhlänge (Summe aus Vor- und Rücklaufleitung) besitzen.

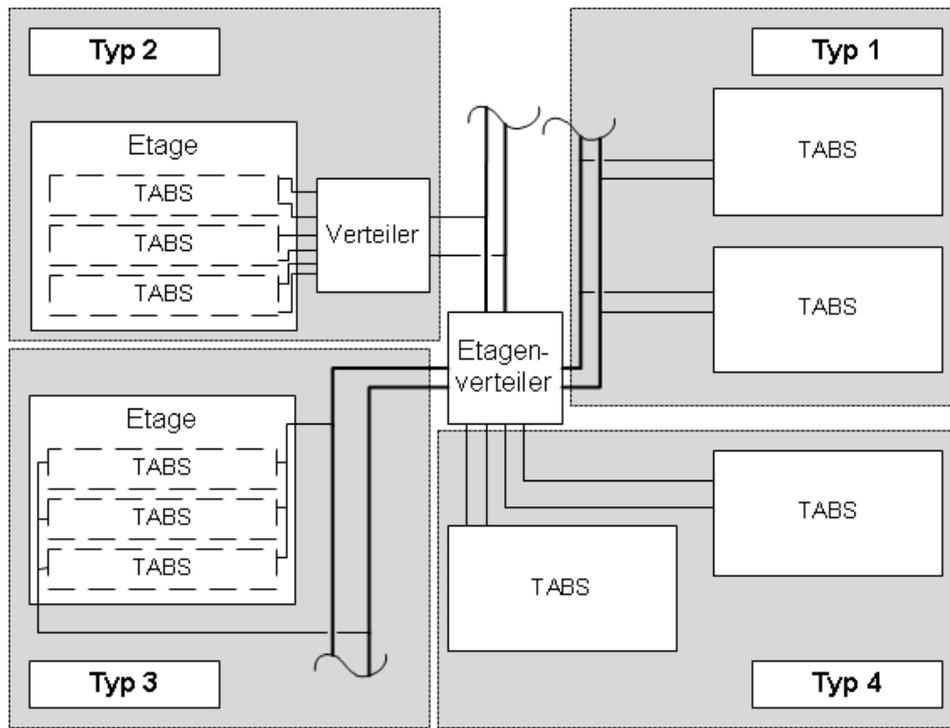


Abbildung 3: Hydraulische Topologie zur hydraulischen Verteilung innerhalb von Etagen

Die Wahl der geeigneten Topologie ist für jedes Gebäude individuell. Zum einen hängt es von der Größe der Etage bzw. der Anzahl der parallel zu verlegenden Segmente ab. Aufgrund der Begrenzung der maximal möglichen Abgänge vom Etagenverteiler ist Typ 4 nur für wenige parallele Segmente innerhalb einer Etage geeignet. Zum anderen erfordert die Verwendung von dezentralen Verteilerbalken wie in Typ 2 höhere Investitionen, wodurch jedoch der Vorteil besteht, Regelventile beispielsweise zur Volumenstromdrosselung oder zur Absperrung vor den Verteilerbalken zu installieren.

3 Dimensionierung

3.1 Rohrsysteme

Die Druckverluste durch Rohrströmung werden mittels der empirischen Gleichung nach Darcy-Weisbach bestimmt:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{d_i} + \sum \zeta_i \right) \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} d_i^2} \right)^2$$

Der Gesamtdruckverlust setzt sich aus dem Druckverlust in geraden Rohrstücken und Einbauten/Formstücken zusammen. Hierfür entscheidend sind die Rohrlänge L , der Innendurchmesser d_i , der Rohrreibungszahl λ und der Druckverlustbeiwert ζ . Anhand dieser Werte kann der Gesamtdruckverlust bei Förderung eines definierten Volumenstroms \dot{V} berechnet werden.

Für die Rohrdimensionierung werden bestimmte Zielwerte in der Planung für die Druckgefälle, d.h. den Druckverlust pro Meter verlegter Rohrlänge $\Delta p/L$, vorgegeben. In der VDI 2073 [5] sind Richtwerte definiert:

- Anbindungs- und Geschossleitungen: 100 – 150 Pa/m
- Stränge und Hauptverteilungen: 200 Pa/m

Für Flächentemperiersysteme oder Umweltwärmequellen/-senken werden keine expliziten Angaben gemacht. Auf Basis von messtechnischen Quervergleichen der Druckgefälle in den hydraulischen Verteilsystemen mehrerer LowEx-Gebäude wird ein Richtwert von ca. 100-150 Pa/m empfohlen.

Am Beispiel von TABS wird im Folgenden das Vorgehen zur Bestimmung der verlegten Rohrlänge L und des Innendurchmessers d_i dargestellt. Die folgenden Annahmen liegen den Berechnungen zugrunde:

- Spezifischer Volumenstrom: $\dot{V} = 10$ bzw. $15 \text{ l}/(\text{h m}^2_{\text{TABS}})$
- Dichte Wasser (30 °C): $\rho = 995 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Rohrreibungszahl¹: $\lambda \cong 0,04$
- Druckverlustbeiwert²: $\zeta \cong 0,14$

Abbildung 4 zeigt die sich ergebenden Druckgefälle in Abhängigkeit des verwendeten Innenrohrdurchmessers und der versorgten TABS-Fläche bzw. Rohrlänge. Im markierten Bereich zwischen den schwarzen Linien beträgt das Druckgefälle 100 bis 150 Pa/m. Ein beispielhafter Auslegungspunkt ist eingezeichnet: Soll eine Fläche von 15 m^2 mit TABS versorgt werden, wird ein Innenrohrdurchmesser von 16 mm und eine verlegte Rohrlänge von 100 m benötigt, um ein Druckgefälle von 125 Pa/m zu erreichen.

¹ Aus Moody-Diagramm für hydraulisch glatte Rohre und $2300 < Re < 6000$

² Mäanderförmige Rohrverlegung, daher 180°-Bögen. Rohrabstand 0,15 m. R/d -Verhältnis im Bereich: $3,41 < R/d < 6,25$.

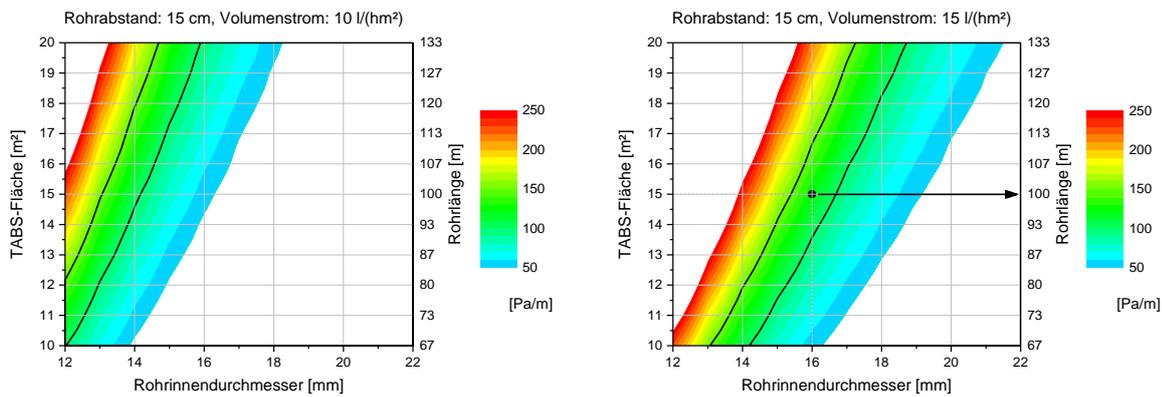


Abbildung 4: Dimensionierung von Rohrinnendurchmesser und Rohrlänge bei Thermoaktiven Bauteilsystemen in Abhängigkeit der wärmeübertragenden TABS-Fläche. Beispiel: Zur Versorgung einer TABS-Fläche von 15 m² wird ein Rohrinnendurchmesser von 16 mm und eine Rohrlänge von 100 m verwendet, damit ein Druckgefälle von ca. 125 Pa/m erreicht wird (Rohrabstand: 15 cm und spezifischer Volumenstrom: 15 l/(hm²)).

Des Weiteren zeigt Abbildung 4 die Sensitivitäten des Rohrinnendurchmessers und der Rohrlänge auf das Druckgefälle. Beispielsweise im Diagramm rechts, ausgehend von dem dargestellten Punkt:

- Die Reduzierung des Innendurchmessers von 16 auf 14 mm (-13 %) resultiert in einer Erhöhung des Druckgefälles von 125 Pa/m auf 250 Pa/m (+100 %).
- Die Erhöhung der Rohrlänge von 100 auf 113 m (+13 %) resultiert in einer Erhöhung des Druckgefälles von 125 Pa/m auf 160 Pa/m (+28 %).

3.2 Pumpen

Umwälzpumpen werden von Seiten der Hersteller für einen Nennbetriebspunkt bestehend aus Nennförderhöhe und Nennvolumenstrom konzipiert. In diesem Betriebspunkt werden in der Regel die höchsten Pumpenwirkungsgrade erreicht. Die korrekte Pumpendimensionierung in hydraulischen Systemen hat zum Ziel, eine Pumpe auszuwählen, bei welcher der Nennbetriebspunkt der Pumpe und der Nennbetriebspunkt der Anlage bestehend aus Druckverlust und Volumenstrom im Auslegungspunkt zur Wärme- und Kälteversorgung übereinstimmen. Dadurch wird die Pumpe in den Bereichen mit den höchsten Wirkungsgraden betrieben.

- Abbildung 5 links zeigt schematisch eine Unterdimensionierung der Umwälzpumpe. Der Nennbetriebspunkt der Anlage liegt außerhalb des Pumpenkennfeldes, wodurch im Betrieb der Nennvolumenstrom nicht erreicht werden kann.
- Abbildung 5 rechts zeigt eine Überdimensionierung der Umwälzpumpe. Hier wird entweder ein zu hoher Volumenstrom gefördert oder durch eine zusätzliche Drosselung der gewünschte Volumenstrom eingestellt. In beiden Fällen liegt der Betriebsbereich im ungünstigen Wirkungsgradbereich. Bei drehzahlgeregelten Pumpen besteht die Möglichkeit bereits für den Nennbetriebspunkt die Pumpendrehzahl zu reduzieren.

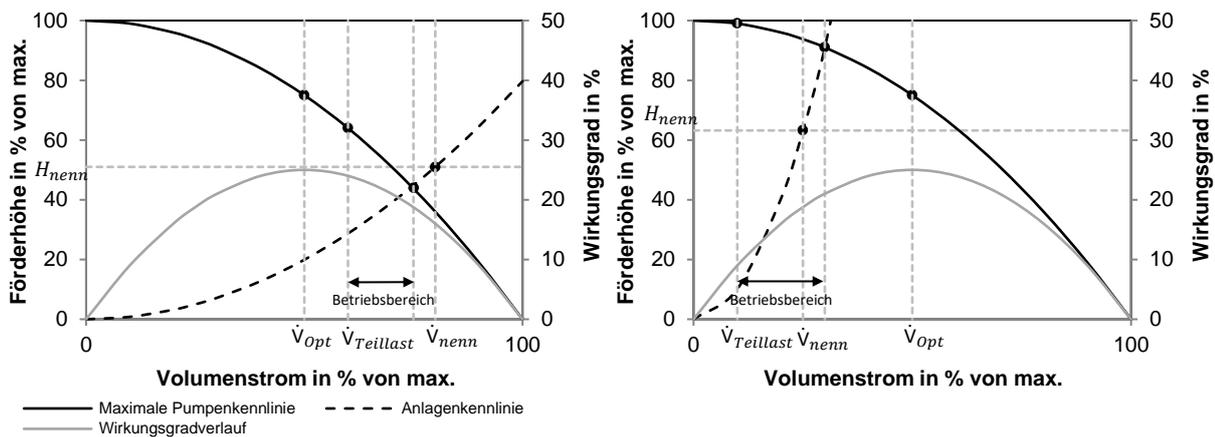


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Betriebspunkte bei einer Unterdimensionierung der Pumpe (links) und einer Überdimensionierung der Pumpe (rechts) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wirkungsgrad im Betrieb.

Die VDI 2073 [5] empfiehlt für Anlagen mit unveränderlichem Betriebspunkt (Betrieb überwiegend im Nennbetriebspunkt) eine Dimensionierung der Pumpe auf den Bereich des optimalen Wirkungsgrades der Pumpenkennlinie. Dies ist für TABS-Anlagen der Fall, bei denen keine Drosselung des Volumenstroms in Teillast erfolgt. Für Anlagen mit veränderlichem Betriebspunkt sollen nach VDI 2073 [5] Pumpen gewählt werden, bei denen der Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie rechts vom Wirkungsgradoptimum liegt, sodass die Pumpe im Teillastbetrieb im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben wird.

Messtechnische Auswertungen in [2] zeigten, dass die Pumpen in untersuchten Anlagen mit Flächentemperiersystemen deutlich überdimensioniert werden³. Mithilfe eines Kennwertes kann bereits in der Planungsphase eine falsche Pumpendimensionierung identifiziert werden:

$$SPP = \frac{P_{el,nenn}}{\dot{V}_{nenn}}$$

Die Spezifische Pumpenleistung SPP (specific pump power) bezieht die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe $P_{el,nenn}$ auf den zu fördernden Nennvolumenstrom \dot{V}_{nenn} . Als Zielwert für die Planung wird ein Wert zwischen 20 und 30 $W_{el}/(m^3/h)$ empfohlen.

³ Die VDI 2073 [5] empfiehlt bei der Pumpendimensionierung im Zweifelsfall eine kleinere Pumpenleistung als durch die Hydraulikberechnung ermittelte zu installieren, da bei größeren Pumpen der Effekt der zusätzlichen Wärmeübertragungsleistung aufgrund eines höheren Volumenstroms als deutlich geringer eingeschätzt wird als der zusätzliche Energiebedarf für die Fluidumwälzung.

4 Quellennachweis

- [1] VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (2001). Berlin.
- [2] Pfafferott, J.; Kalz, D.: Thermoaktive Bauteilsysteme. Nichtwohngebäude energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau, BINE Themeninfo I/2007.
- [3] Tödtli, J.; Gwerder, M.; Lehmann, B.; Renggli, F.; Dorer, V.: TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen ; Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb. Zürich 2009.
- [4] Kalz, D.; Herkel, S.; Wagner, A.: The impact of auxiliary energy on the efficiency of the heating and cooling system: Monitoring of low-energy buildings. In: Energy and Buildings 41 (2009) 10, S. 1019–30.
- [5] VDI 2073: Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung - Hydraulische Schaltungen - Blatt 1 (2014). Berlin.