

Forschungsbericht

Energetische Einsparpotentiale und wirtschaftliche Bewertung des hydraulischen Abgleiches für Anlagen der Gebäudeenergie-technik

Auftraggeber:

Danfoss GmbH Heating Segment
Carl-Legien-Str. 8
63073 Offenbach am Main

Auftragnehmer:

ITG Dresden
Tiergartenstraße 54
01219 Dresden

Autoren:

Dipl.-Ing. Bettina Mailach
Florian Emmrich
Prof. Dr.-Ing. B. Oschatz
Dipl.-Ing. L. Schinke
PD Dr.-Ing. habil. J. Seifert

Dresden, den 18.12.2018

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Definition des hydraulischen Abgleiches	4
2.1	Grundlegenden Betrachtungen	4
2.2	Bauteile zum hydraulischen Abgleich	6
3	Literaturanalyse	7
4	Normen und technische Regeln	11
4.1	Normative Kennwerte	11
4.2	Technische Regeln	13
5	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	18
5.1	Randbedingungen	18
5.1.1	Definition typischer Anwendungsfälle	18
5.1.2	Methodik, Allgemeine Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	19
5.1.3	Technische Lösungen und Kostenermittlung	21
5.1.4	Ableitung möglicher Einsparungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	22
5.2	Ergebnisse	24
6	Vereinfachte Abschätzung des gesamtwirtschaftlichen Einsparpotenzials	32
7	Fazit	33
8	Literaturverzeichnis	35
9	Symbolverzeichnis	38
	Anhang A - Maßnahmen für den hydraulischen Abgleich nach VdZ	39
	Anhang B - Aktuelle Statistik zum durchgeführten hydraulischen Abgleich	41

1 Einleitung

Seit vielen Jahren ist die Energieeffizienzverbesserung von Gebäuden ein wichtiger Bestandteil der Energiewende in Deutschland. Das hieraus resultierende Energieeinsparrecht und die kontinuierliche Fortentwicklung der energetischen Anforderungen, die sich an wirtschaftlichen Maßstäben orientieren, leisten hierfür einen signifikanten Beitrag. Ziel der Entwicklungen soll ein möglichst klimaneutraler Gebäudebestand bis 2050 sein.

Aktuell gelten jedoch zwei wesentliche Regelwerke, in denen die energetischen Anforderungen an den Gebäudebestand sowie an Neubauten definiert werden. Als erstes ist in diesem Zusammenhang das Energieeinspargesetz (EnEG) [1] mit der ausführenden Vorschrift der Energieeinsparverordnung (EnEV) [2] zu sehen, welches die bau- und anlagentechnischen Anforderungen an Gebäude enthält. Zweites wesentliches Gesetz ist das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [3]. Das EEWärmeG legt fest, wie bei neuen Gebäuden und bei Bestandsgebäuden der öffentlichen Hand erneuerbare Energien zur Deckung des Wärmebedarfs zu verwenden sind. Aktueller Sachstand ist jedoch, dass beide Gesetze nicht optimal aufeinander abgestimmt sind, wodurch sich in der Praxis immer wieder Interpretationsspielräume ergeben.

Auf europäischer Ebene haben sich die Mitgliedsländer verpflichtet, mit Artikel 9 der Richtlinie 2010/31/EU (Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden) [4] den Niedrigstenergiestandard bei allen neuen Gebäuden bis 2021 sowie bei Nichtwohngebäuden der öffentlichen Hand bis 2019 verbindlich einzuführen. Diese europäisch initiierte Aktivität hat dazu geführt, das Energieeinsparrecht in Deutschland einer Neuordnung zu unterziehen. Ziel der Neugestaltung ist die Zusammenführung von EnEG und EEWärmeG zu einem einheitlichen Gesetz mit dem Namen:

„Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude - GEG“.

Im GEG soll zukünftig ein einheitliches Anforderungssystem enthalten sein, in dem Energieeffizienz und Erneuerbare Energien integriert sind. Alle Anforderungen die im GEG benannt sind müssen sich dem Wirtschaftlichkeitsgebot unterordnen.

Mit der Richtlinie (EU) 2018/844 [5] wurde die Richtlinie 2010/31/EU geändert, u.a. in Bezug auf die Systemanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz gebäudetechnischer Systeme und Inspektionen. Diese Änderungen sind zum Teil durch eine bisher ungenügende Berücksichtigung des hydraulischen Abgleiches motiviert, sowie durch die Notwendigkeit die Gebäudeenergieeffizienz unter realen, dynamisch variierenden Teillastbetriebsbedingungen zu optimieren.

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, speziell den Aspekt des hydraulischen Abgleiches energetisch und wirtschaftlich zu analysieren und festzustellen, ob dieser direkt ins GEG implementiert werden kann.

2 Definition des hydraulischen Abgleiches

2.1 Grundlegenden Betrachtungen

Heizungstechnische Anlagen im Bereich der Gebäudeenergie-technik haben das vorrangige Ziel, bedarfsgerecht eine Versorgung der Liegenschaft sicherzustellen. D.h. zeitlich und örtlich muss die Energiebilanz des Systems unter den geforderten Randbedingungen (Thermische Behaglichkeit) eingehalten werden. Die vom hydraulischen System bereitzustellende Leistung lautet:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) \quad (1)$$

mit

- \dot{Q} Wärmestrom in W
- \dot{m} Massestrom in kg/s
- c_p spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg K)
- ϑ_{VL} Vorlauftemperatur in °C
- ϑ_{RL} Rücklauftemperatur in °C

Mit Bezug auf Gl. (1) stellt sich der einzuhaltende Massestrom (\dot{m}) sowie die einzuhaltende Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta = \vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}$) als signifikant heraus. Wird eines der beiden Kriterien verletzt, kommt es zu einer thermischen Unterversorgung des heizungstechnischen Systems - zeitlich bzw. örtlich. Abb. 1 zeigt dies exemplarisch.

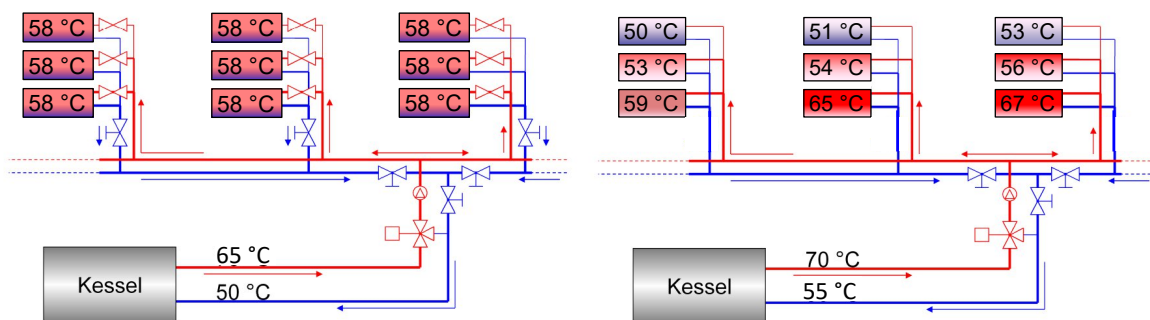


Abb. 1 Bedarfsgerechtes (links) und unversorgtes (rechts) heizungstechnisches System (beispielhaft)

Mit Bezug auf die bedarfsgerechte Versorgung hat sich in der Vergangenheit der Begriff des *hydraulischen Abgleiches* herausgebildet. In unterschiedlichen Publikationen sind Definitionen zum hydraulischen Abgleich zu finden.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den wichtigsten in der Literatur dokumentierten Formulierungen.

Tabelle 1 Definitionen zum hydraulischen Abgleich nach unterschiedlichen Literaturquellen

Literaturquelle	Autor	Definition
[6]	VDZ-Fachregel	„Der hydraulische Abgleich ist der Vorgang, die Volumenströme in den einzelnen Teilsystemen auf die in der Planung berechneten Soll-Volumenströme abzustimmen. Der hydraulische Abgleich sorgt dafür, dass alle Heizflächen mit den benötigten Volumenströmen des Heizmediums zeitgerecht versorgt werden. Nur mit einem hydraulischen Abgleich ist eine maximale Absenkung der Systemtemperaturen möglich.“
[7]	SAENA	„Beim hydraulischen Abgleich sind in die technisch erforderlichen Durchflussmengen einzuregulieren.“
[8] / [9]	Schweikhardt et al.	„Der hydraulische Abgleich stellt sicher, dass jeder Heizkörper mit der erforderlichen Heizwassermenge durchströmt wird.“
[10]	ASUE	„Der hydraulische Abgleich begrenzt die Heizwasser-Volumenströme mit dem Ziel, allen Heizkörpern nur die Wärmemenge zuzuführen, die für eine gleichmäßige Beheizung erforderlich ist. Das geschieht auf der Basis einer raumweisen Berechnung der Heizlast und der wärmeerzeugerabhängigen Auslegungsparameter (Vorlauf-/Rücklauf-temperatur, Differenzdruck am Thermostatventil).“
[11]	DENA	„Ein hydraulischer Abgleich sorgt dafür, dass die Heizkörper oder die Heizkreise der Wand- oder Fußbodenheizung bedarfsgerecht versorgt werden. Dafür wird im gesamten System die durchfließende Menge des warmen Wassers individuell für jeden Raum eingestellt.“

Alle Definitionen der Tabelle 1 verweisen mehr oder weniger deutlich auf hydraulische Aspekte und hierbei besonders auf den Druckverlust und die sich hieraus ergebenden Masseströme. Basierend auf diesen Definitionen kann folgende allgemeingültige klassische Definition des hydraulischen Abgleichs abgeleitet werden:

„Unter dem Begriff des hydraulischen Abgleiches wird das Berechnen und Einstellen der Widerstandsbeiwerte (Druckverluste) mit dem Ziel verstanden, die Sollvolumenstromverteilung zu erreichen.“ [12]¹.

Die klassische Definition des hydraulischen Abgleiches fokussiert nur auf die Hydraulik und die Bereitstellung der Masseströme, da dies in der Praxis eine vergleichsweise kostengünstige Lösung darstellt. Neuere Ansätze zur bedarfsgerechten Versorgung von heizungstechnischen Systemen fassen den Begriff weiter und lassen ebenfalls auch die thermische Anpassung ($\Delta\vartheta$) in der Betrachtung zu.

Die dokumentierte Definition des hydraulischen Abgleiches ist sehr allgemein gefasst und lässt prinzipiell einen Spielraum hinsichtlich der Durchführung, d.h. ob es sich um einen statischen

¹ Im Kontext der vorliegenden Studie wird der Begriff des hydraulischen Abgleiches auf wasserbasierte Systeme bezogen. In gleichem Maße treffen die grundsätzlichen Aussagen auch auf luftbasierte Systeme zu. Weiterhin wird eine Unterscheidung in die Art des hydraulischen Abgleiches vorgenommen (statisch / dynamisch).

d. h. auf einen Auslegungspunkt bezogene Einstellung handelt, oder auf einen dynamischen Vorgang, welcher fortlaufend vorgenommen wird. Beim statischen hydraulischen Abgleich ist der Verweis auf die Einstellung der Druckverluste bei Auslegungsbedingungen (Nennmassstrom) eindeutig definiert. Hinsichtlich des Bezugszustandes beim dynamischen hydraulischen Abgleich gibt es keine einheitliche Definition. Vielmehr wird hier ein konstanter Differenzdruck unter Voll- und Teillast oder ein maximaler Wert als Kriterium für den Massestrom verwendet.

Damit greifen die dynamischen Systeme „ordnend“ in z.B. einen dynamischen Aufheizfall ein, was zu einer gleichmäßigen Belastung der gesamten Anlage führt.

Welche Wirkung ein nicht ausgeführter hydraulischer Abgleich im heizungstechnischen System hat, kann ebenfalls an Gl. (1) diskutiert werden. Ist der Massestrom am Verbraucher nicht ausreichend, so wird bei gleichen Vor- und Rücklauf-temperatur ein nicht ausreichender Wärmestrom (\dot{Q}) abgegeben. Der geringere Massestrom kann hierbei durch eine größere Temperaturspreizung ($\Delta\vartheta$) kompensiert werden, was jedoch zu veränderten Temperaturniveaus im Verteilsystem sowie am Wärmeerzeugungssystem führt. Hieraus kann ein höherer Endenergieaufwand resultieren (z.B. höhere thermische Verluste). Auf der anderen Seite kann die unsymmetrische Versorgung durch einen höheren Drucksprung der Pumpe ausgeglichen werden (erhöhte elektrische Aufwendungen). In den nachfolgenden Kapiteln sollen die energetischen Differenzen, zwischen einem System mit nach der oben genannten Definition durchgeführten hydraulischen Abgleich und einem System welches nicht hydraulisch abgeglichen ist, zusammengestellt werden. Die Ausführungen sollen auf Literaturangaben beruhen.

2.2 Bauteile zum hydraulischen Abgleich

Zur Durchführung des hydraulischen Abgleichs können verschiedene Bauteile eingesetzt werden. Bei größeren Gebäuden werden die einzelnen Steigleitungen mittels sogenannter Strangregulierventile gegenüber anderen Steigleitungen so einreguliert, dass am Versorgungspunkt zwischen den einzelnen Steigsträngen gleiche Δp -Werte vorliegen. Somit kann zwischen den Steigleitungen ein hydraulischer Abgleich gewährleistet werden. Innerhalb eines Stranges kommen zur Einregulierung *voreinstellbare thermostatische Regelventile (TRV) oder Rücklauf-temperaturverschraubungen* zur Anwendung. Beide Technologien bewirken einen zusätzlichen Druckverlust und somit eine Begrenzung der Masseströme. Sie zählen zu den technischen Einrichtungen, die bei einem statischen hydraulischen Abgleich angewendet werden.

Unter dynamischen Bedingungen werden erweiterte Bauteile für die örtlichen Regeleinrichtungen eingesetzt, die oftmals mit dem TRV kombiniert sind. Funktionell werden bei diesen Bauteilen klassische TRV-Systeme mit einem Differenzdruckregler oder einem Massestrombegrenzer kombiniert. Ein Massestrombegrenzer verhindert einen Anstieg des Massestromes über einen voreinstellbaren Grenzwert hinaus. Ein Differenzdruckregler begrenzt zusätzlich im Teillastfall den Differenzdruck über Sitz und Kegel im Ventil und verhindert somit auch unerwünschte Geräusche. Folge dieser Technologien ist, dass besonders im Anheizfall und Teillastfall die Masseströme bzw. Differenzdrücke den Auslegungswert nicht überschreiten können, wodurch eine Ungleichverteilung dieser in der Anlage ausgeschlossen wird. Die Kombination aus TRV + Differenzdruckregler oder Massestrombegrenzer zählt zu den Bauteilen die bei einem dynamischen hydraulischen Abgleich eingesetzt werden.

3 Literaturanalyse

Zum hydraulischen Abgleich existieren zum heutigen Zeitpunkt eine ganze Reihe von Publikationen. Nachfolgend werden nur solche Publikationen betrachte, die

- klar die Randbedingungen auflisten,
- einer wissenschaftlichen Betrachtung standhalten.

Alle Erfahrungsberichte, die eine eindeutige Zuordnung zu den signifikanten physikalischen Kenngrößen nicht aufweisen, werden in den nachfolgenden Analysen nicht betrachtet.

Umfängliche Aussagen zum hydraulischen Abgleich liegen von *Wolf und Jagnow* in [13] (*Optimus-Studie*) bzw. [14] vor. Betrachtet wurden in diesem Zusammenhang Mehrfamiliengebäude bei denen eine Einsparung von 8 kWh/m²a (Heizenergieeinsparung) im Vergleich zu einem nicht abgeglichenen System realisiert werden konnte. *Irrek* analysiert [15] die Elektroenergieaufnahme von zentralen Umwälzpumpen im Zusammenhang mit Fragestellungen zum hydraulischen Abgleich. Er stellt fest, dass die Stromaufnahme der beschriebenen Systeme bei einem fachgerecht ausgeführten statischen hydraulischen Abgleich um bis zu 50 % geringer ausfallen kann. Darüber hinaus wird in [15] publiziert, das zusätzliche Heizenergieeinsparungen von bis zu 10...15 % durch geringere thermische Verluste bzw. optimierte regelungstechnische Parameter bei hydraulisch abgeglichenen Systemen im Vergleich zu hydraulisch nicht abgeglichenen Systemen realisiert werden können.

Felsmann und Hirschberg untersuchen in [16] den Einfluss eines nicht vorhandenen hydraulischen Abgleiches in Bezug auf das Teillastverhalten von elektrischen Umwälzpumpen. Qualitativ wird herausgearbeitet, dass das Teillastverhalten der mit Abstand typischste Fall in zentralen Warmwasserheizungssystemen ist, und dieser vorrangig betrachtet werden sollte. In einem zweiten Forschungsprojekt [17] analysieren *Hirschberg und Felsmann* den Einfluss eines fehlenden hydraulischen Abgleiches entlang der Bedarfskette (Wärmeübergabe / Wärmeverteilung / Wärmeerzeugung). Für den Teilbereich der Wärmeübergabe werden zwischen abgeglichenen und nicht abgeglichenen Systemen Differenzen von 2,5 ...3 % detektiert (Heizenergie). Bei der Wärmeerzeugung bewirkt der nicht durchgeführte hydraulische Abgleich einen Mehraufwand von bis zu 8 %. Hinsichtlich der Leistungsaufnahme der zentralen Umwälzpumpe werden elektroenergetische Reduktionen von bis zu 25 % bei einem abgeglichenen System im Vergleich zu einem nicht abgeglichenen System angegeben. In [18] analysiert *Hirschberg* nochmals Aspekte zum hydraulischen Abgleich. Im Speziellen stand die Wirkung voreingestellter thermostatischer Regelventile im Mittelpunkt der Betrachtungen. Durch einen fehlenden hydraulischen Abgleich erhöht sich in den Analysen der durchschnittliche Massenstrom im System um 8 %. Verwendet man voreingestellte Thermostatventile kann dieser erhöhte Massenstrom auf einen Wert von 1,5 % reduziert werden.

Guzek führt in [19] ebenfalls umfängliche numerische Analysen zum Themengebiet des hydraulischen Abgleiches durch. An einem Ein- und einem Mehrfamilienhaus werden die durchgängige und die intermittierende Betriebsweise analysiert. Bei der durchgängigen Betriebsweise wurde festgestellt, dass der Einfluss des hydraulischen Abgleiches sehr gering ist. Zu

begründen ist diese mit dem Teillastverhalten des Systems, bei dem durch die thermostatischen Regelventile eine Verringerung des Massestromes erfolgt. Kritisch werden die Zustände bei der ebenfalls analysierten intermittierenden Betriebsweise betrachtet. Hier werden in [19] für den Bereich der Heizwärmeabgabe 7 % energetischer Mehraufwand detektiert. Für die zentrale Umwälzpumpe wird eine Größenordnung von bis zu 26 % Mehraufwand² an Elektroenergie dokumentiert. Der Mehraufwand an Heizenergie sowie Elektroenergie ist dabei die Ursache von Kompensationsmaßnahmen, die bei einem hydraulisch nicht abgeglichenen System vorgenommen wurden (Erhöhung der Heizkurve - $\Delta\vartheta$ / Verstellung der Pumpenkennlinie)³.

Ein bisher in wissenschaftlichen Zeitschriften nicht veröffentlichte Arbeit zum hydraulischen Abgleich wurde von *Seifert et al.* [20] 2014 verfasst, in der speziell durchgängige und intermittierende Betriebsweisen sowie lokale dynamische Massestrombegrenzer und statisch voreingestellte Ventile betrachtet wurden. Im Ergebnis dieser Studie wird deutlich herausgearbeitet, dass der durchgängige Betrieb in Hinblick auf den hydraulischen Abgleich nicht signifikant ist. Hingegen werden beim intermittierenden Betrieb deutliche Differenzen zwischen den betrachteten Systemen detektiert. Speziell Systeme mit integrierter Funktion zur Massestrombegrenzung wirken „ordnend“ bei einem Anheizbetrieb. Energetisch wird in [20] eine Bandbreite von 0-6 % Einsparung bezogen auf die thermische ins Heizungsnetz abgegebene Wärme detektiert. Bezieht man den Wärmeerzeuger mit in die Betrachtungen ein, so werden in [20] Werte von 0-7,5 % Endenergieeinsparung dokumentiert. Die genannten energetischen Kenngrößen wurden in der Diskussion zur Überarbeitung der *DIN V 18599* [21] und der *DIN EN 15316-2* [22] berücksichtigt.

Als neuere Feldteststudie ist eine Analyse verschiedener gesellschaftlich genutzter Gebäude in [8] zu sehen. Mit Bezug auf diese Studie wird ein Feldtest vorgestellt, der energetische Einsparpotentiale bei verschiedenen Gebäuden charakterisiert. Nicht aufgeschlüsselt werden in [8] die energetischen Unterschiede entlang der Bedarfskette (Übergabe / Verteilung / Erzeugung). Vielmehr werden in [8] summarische Größen angegeben. In Hinblick auf den Heizenergiebedarf werden Einsparpotentiale von 12,5 – 29 % angegeben sowie bei der Elektronenergie der Pumpe bis zu 85 %. Deutlich muss jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die energetischen Einsparungen eine Mischung sind aus:

- verändertem Nutzerverhalten
- statischen und dynamischen hydraulischen Abgleich
- sowie Austausch der Umwälzpumpe.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Ergebnisse lediglich eine sehr kurze Messperiode umfassen und keine Separierung hinsichtlich Einzelmaßnahmen zulassen. Weiterführende Analysen sind in [9] zu detektieren, wobei im Vergleich zu [8] die Analyseperiode mehrere Jahre betrug.

² In Bezug auf die absoluten Kennwerte ist anzumerken, dass die elektrischen Einsparungen in kWh deutlich geringer sind als die absoluten Einsparungen an thermischer Energie.

³ Ziel der Einführung der Kompensationsmaßnahmen ist die Gewährleistung der geforderten thermischen Behaglichkeit zeitlich und örtlich in allen Räumen.

Hinsichtlich der Heizenergieeinsparung wird durchschnittlich ein Potential von 8 ... 11 % ausgewiesen. Aufgegliedert werden hierbei die Kennwerte in Hinblick auf die Gebäudeklasse und dessen Alter. Anzumerken ist weiterhin, dass in [9] auch energetische Mehrverbräuche nach einem hydraulischen Abgleich festgestellt werden. Auffällig ist in [9], dass auch ein Vergleich zwischen Flächenheizungen und freien Heizflächen vorgenommen wird, wobei bei bauteilintegrierten Systemen nur sehr geringe Einsparungen zu verzeichnen sind. Diese bewegen sich im Vergleich zu einem nicht abgeglichenen System bei bis zu 2 % bezogen auf die Heizenergie. In aktuellen messtechnischen Analysen von *Thalfeldt et al.* [23] wird der Einfluss des hydraulischen Abgleiches einer Fußbodenheizung auf den COP einer Wärmepumpe untersucht. Es wird der Zusammenhang zwischen COP der Wärmepumpe und dem hydraulischen System diskutiert, aber aktuell sind aus dieser Studie noch keine belastbaren Ergebnisse hinsichtlich Energieeinsparung zu entnehmen. Laut den Autoren sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen und müssen weiter vertieft werden.

Neben den bisher genannten wissenschaftlichen Arbeiten existiert noch eine ganze Reihe von Veröffentlichungen die ebenfalls den hydraulischen Abgleich zum Gegenstand haben. In Verbindung mit den normativen Bewertungen ist als wesentlich die Arbeit von *Oschatz et al.* [24] anzusehen, welcher Bewertungsverfahren für den hydraulischen Abgleich ableitet, die in die *DIN V 18599* [21] übernommen wurden. Für den Bereich der Wärmeübergabe wurden Kennwerte bestimmt, die bei der Revision der genannten Norm im Jahre 2016/2017 überarbeitet wurden. Sie sollen daher nicht dokumentiert werden. Bei der Wärmeverteilung wird in [24] ein Verfahren mittels eines Belastungsgrades vorgeschlagen. Die entsprechende mathematische Beziehung lautet:

$$\beta_{n,d} = \frac{Q_{h,b} + Q_{h,ce}}{\dot{Q}_{h,max} \cdot t_h} \cdot f_{hydr} \quad (2)$$

Der Zustand des hydraulischen Netzes wird wie folgt in Gl. 2 berücksichtigt⁴:

- abgeglichenes hydraulische Netz: $f_{hydr} = 1,0$
- nicht abgeglichenes hydraulische Netz: $f_{hydr} = 1,2$

Unter $\beta_{n,d}$ wird in diesem Zusammenhang der hydraulische Belastungsgrad verstanden. Die Auswirkung auf Verteilung sowie die Wärmeerzeugungssysteme kann mittels eines thermischen Belastungsgrades angegeben werden. Der thermische Belastungsgrad beeinflusst hierbei die Vor- und die Rücklauftemperatur und somit indirekt auch den Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers. Die entsprechenden Gleichungen lauten:

$$\vartheta_{RL,m}(\beta_i) = (\vartheta_{RA} - \vartheta_{i,h,soll}) \cdot \beta_i^{1/n} + \vartheta_{i,h,soll} \quad (3)$$

$$\vartheta_{VL,m}(\beta_i) = (\vartheta_{VA} - \vartheta_{i,h,soll}) \cdot \beta_i^{1/n} + \vartheta_{i,h,soll} \quad (4)^5$$

Ein direkter Vorschlag von Kennwerten wird in [24] in Hinblick auf den hydraulischen Abgleich nicht gegeben.

⁴ Die in [24] dokumentierten Kennwerte sind in [21] hinterlegt.

⁵ Gültigkeit für Zweirohrverteilssystem

Im Ergebnis der Literaturrecherche sind in Tabelle 2 die angegebenen Heizenergie- und Elektroenergieeinsparungen zusammengefasst.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Literaturrecherche – Einsparung von Systemen mit hydraulischen Abgleich gegenüber Systemen ohne hydraulischen Abgleich⁶ - Endenergiebedarf inklusive der Verluste des Wärmeerzeugers

Literatur- quelle	Autor	Endenergieeinsparung		Elektroenergieeinsparung		Gebäudetyp
		Altbau	Neubau	Altbau	Neubau	
[9]	<i>Schweikhardt et al.</i>	8 ... 11 % ⁷		-		Funktionsbauten (Kirche)
[13] / [14]	<i>Wolff und Jagnow</i>	8 kWh/m ²	18 kWh/m ² ⁸	13 %		Mehrfamilienhaus
[15]	<i>Irrek</i>	10 ... 15 %			50 % (90 %)	Mehrfamilienhaus
[16] / [17]	<i>Hirschberg und Felsmann</i>	8 % ⁹			25 %	Einfamilienhaus
[19]	<i>Guzek¹⁰</i>	≤ 7 %	(≤ 1,2%)	26%	12 %	Einfamilienhaus
[20]	<i>Seifert et al.</i>	0 ... 2,8 %	0 ... 7,5 %	-		Einfamilienhaus

Die in Tabelle 2 beschriebenen energetischen Einsparungen beziehen sich mit Ausnahme von der Literaturquelle [20] auf einen statischen hydraulischen Abgleich. Zunehmend sind jedoch technische Lösungen verfügbar, die einen dynamischen hydraulischen Abgleich ermöglichen. Detailliert messtechnisch betrachtet sowie wissenschaftlich durchdrungen sind diese Lösungen jedoch noch nicht. In [25] ist ein erster, vereinfachter Feldtest durchgeführt worden, der Energieeinsparpotentiale von bis zu 15% ausweist (statischer hydraulischer Abgleich im Vergleich zum dynamischen hydraulischen Abgleich). Da diese Analysen jedoch aktuell noch nicht wissenschaftlich evaluiert sind, sollen bei den nachfolgenden Betrachtungen die aktuell in den Normen hinterlegten Kennwerte für den dynamischen hydraulischen Abgleich verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.1).

⁶ Die in Tabelle 2 dokumentierten Endenergieeinsparungen beziehen sich auf Systeme mit Heizkörpern (freien Heizflächen). Als Grenze für die Unterscheidung zwischen Altbau und Neubau wird die EnEV 2002 angesehen. D.h. Altbauten sind Gebäude, welche vor der EnEV 2002 errichtet sind und Neubauten solche Gebäude die ab der EnEV 2002 erstellt wurden.

⁷ Betrachtung von Gebäuden ab Baujahr 1978 (WSchVO 1977)

⁸ neuer als Baujahr 1994

⁹ keine Unterscheidung der Baualtersklasse

¹⁰ Aufgrund der gewählten Randbedingungen kommt es in diesem Fall zu anderen Tendenzen.

4 Normen und technische Regeln

4.1 Normative Kennwerte

In verschiedenen Normen werden aktuell energetische Kennwerte zum hydraulischen Abgleich verankert. Die umfangreichsten Angaben sind in der DIN V 18599 [21] zu finden, die entlang der Bedarfskette (Wärmeübergabe / Wärmeverteilung / Wärmeerzeugung) energetische Angaben zum hydraulischen Abgleich liefert. Bei der Wärmeübergabe wird ein direkter Bezug zur eingesetzten Nutzenergie hergestellt. Prinzip der Berechnung hierbei ist, die energetischen Mehraufwendungen in Form von Temperaturänderungen (höheren Raumtemperaturen) darzustellen. Tabelle 3¹¹ enthält die entsprechenden Werte. Die anzuwendende Berechnungsgleichung lautet:

$$\Delta\vartheta_{ce} = \Delta\vartheta_{str} + \Delta\vartheta_{ctr} + \Delta\vartheta_{emb} + \Delta\vartheta_{rad} + \Delta\vartheta_{im} + \Delta\vartheta_{hydr} + \Delta\vartheta_{roomaut} \quad (5)$$

Tabelle 3 Temperaturschwankungen bei der Wärmeübergabe in Bezug auf den hydraulischen Abgleich in K (Durchgeführter hydraulischer Abgleich mit Herstellererklärung über den Abgleich und in Abstimmung mit DIN EN 14336 [26])

Ein-Rohr-System	$\Delta\vartheta_{hydr}$	Zwei-Rohr-System	*n≤10	*n>10
			$\Delta\vartheta_{hydr}$	$\Delta\vartheta_{hydr}$
kein hydraulischer Abgleich	0,7	kein hydraulischer Abgleich	0,6	
je Kreis statisch abgeglichen	0,4	Abgleich statisch je Heizkörper/Heizfläche ohne Gruppenabgleich	0,3	0,4
je Kreis dynamisch abgeglichen (z.B. mit automatische Durchflussbegrenzern)	0,3	Abgleich statisch je Heizkörper/Heizfläche und Gruppenabgleich statisch (z.B. mit Strangreguliertventil)	0,2	0,3
je Kreis dynamisch abgeglichen (z.B. mit automatischen Durchflussbegrenzern) und in Abhängigkeit von seiner Belastung dynamisch geregelt (z.B. Rücklauf-temperaturbegrenzung)	0,2	Abgleich statisch je Heizkörper/Heizfläche und Gruppenabgleich dynamisch (z.B. mit Differenzdruckregler)	0,1	0,2
je Kreis dynamisch abgeglichen (z.B. mit automatischen Durchflussbegrenzern) und in Abhängigkeit von seiner Belastung dynamisch geregelt (Spreizung)	0,1	Abgleich dynamisch je Heizkörper/Heizfläche (z.B. mit automatischen Durchflussbegrenzern / Differenzdruckreglern)	0,0	
		*Anzahl Heizkörper/Heizfläche je Gruppe		

Bei der hydraulischen Betrachtung, und hier speziell bei der Bestimmung des Belastungsgrades des Wärmeerzeugers, des Speichers sowie des Verteilnetzes kommt ebenfalls ein Faktor (f_{hydr}) zur Anwendung. Die entsprechenden Kennwerte sind Tabelle 4 zu entnehmen.

¹¹ Im Rahmen der normativen Bewertung werden Durchflussbegrenzer und dynamische Ventile rechen-technisch gleichwertig behandelt, obwohl aus technischer Sicht unterschiedliche Wirkmechanismen vorliegen.

Tabelle 4 Faktoren für den hydraulischen Abgleich Wärmeezeugung nach DIN V 18599-5 [21]

Ein-Rohr-System	Zwei-Rohr-System	f_{hydr}
kein hydraulischer Abgleich		1,06
Durchgeführter hydraulischer Abgleich mit Herstellererklärung über den Abgleich und in Abstimmung mit DIN EN 14336 und Durchflussregler oder ausschließlich statisch abgestimmte Systeme	Mit mehr als 8 Heizkörper / Heizflächen je automatischer Differenzdruckregler oder ausschließlich statisch abgestimmte Systeme	1,02
Durchflussregler, Durchfluss im 1-Rohrstrang in Abhängigkeit von seiner Belastung dynamisch geregelt	Maximal 8 Heizkörper / Heizflächen je automatischem Differenzdruck- und / oder Durchflussregler	1,0

Hinsichtlich des Elektroenergiebedarfs der Umwälzpumpe wird die Berechnung in der DIN V 18599-5 [21] über eine Aufwandszahl $e_{h,d,aux}$ realisiert.

$$e_{h,d,aux} = f_e \cdot (C_{P1} + C_{P2} \cdot \beta_{h,d}^{-1}) \cdot \frac{EEI}{0,25} \quad (6)$$

Der in Gl. (6) enthaltene Effizienzfaktor f_e wird wie folgt bei nicht bekannter Pumpe bestimmt:

$$f_e = \left(1,25 + \left(\frac{200}{P_{hydr}} \right)^{0,5} \right) \cdot b \quad (7)$$

Für den Fall, dass die Pumpe nicht auf den Bedarf ausgelegt bzw. die Pumpe wegen des fehlenden hydraulischen Abgleiches auf eine höhere Förderhöhe eingestellt ist, ist $b = 2$ innerhalb der Berechnung zu verwenden. Pauschal wird somit eine Verdopplung der Aufwandszahl und somit auch dem elektrischen Aufwand (siehe Gl. (8)) angesetzt, wenn das hydraulische Netz nicht abgeglichen ist.

$$W_{h,d} = W_{h,d,hydr} \cdot e_{h,d,aux} \quad (8)$$

4.2 Technische Regeln

Nachfolgend werden aktuell bestehende Vorgaben an die Durchführung des hydraulischen Abgleichs analysiert.

EPBD: Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz [4]

In der europäischen Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) heißt es wie folgt:

„Artikel 8

Gebäudetechnische Systeme, Elektromobilität und Intelligenzfähigkeitsindikator

(1) Die Mitgliedstaaten legen zur optimalen Energienutzung durch die gebäudetechnischen Systeme Systemanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz, die ordnungsgemäße Installation und angemessene Dimensionierung, Einstellung und Steuerung der gebäudetechnischen Systeme fest, die in bestehenden Gebäuden eingebaut werden. Die Mitgliedstaaten können diese Systemanforderungen auch auf neue Gebäude anwenden.

Die Systemanforderungen werden für neue gebäudetechnische Systeme sowie für Ersetzung und Modernisierung von gebäudetechnischen Systemen festgelegt und insoweit angewandt, als dies technisch, funktionell und wirtschaftlich realisierbar ist.

Die Mitgliedstaaten schreiben vor, dass neue Gebäude, sofern technisch und wirtschaftlich realisierbar, mit selbstregulierenden Einrichtungen zur separaten Regelung der Temperatur in jedem Raum oder, sofern gerechtfertigt, in einem bestimmten beheizten Bereich des Gebäudeteils ausgestattet werden. In bestehenden Gebäuden ist die Installation solcher selbstregulierenden Einrichtungen bei einem Austausch des Wärmeerzeugers, sofern technisch und wirtschaftlich realisierbar, vorgeschrieben.“

„Artikel 14

Inspektion von Heizungsanlagen

(1) Die Mitgliedstaaten ergreifen die erforderlichen Maßnahmen, um regelmäßige Inspektionen der zugänglichen Teile von Heizungsanlagen oder kombinierten Raumheizungs- und Lüftungsanlagen mit einer Nennleistung von mehr als 70 kW, beispielsweise Wärmeerzeuger, Steuerungssystem und Umwälzpumpe(n), die zur Gebäudeheizung verwendet werden, zu gewährleisten. Die Inspektion umfasst auch die Prüfung des Wirkungsgrads und der Dimensionierung des Wärmeerzeugers im Verhältnis zum Heizbedarf des Gebäudes und berücksichtigt gegebenenfalls die Fähigkeit der Heizungsanlage oder der kombinierten Raumheizungs- und Lüftungsanlage, ihre Leistung unter typischen oder durchschnittlichen Betriebsbedingungen zu optimieren.“

EnEV 2014 : Energieeinsparverordnung [2]

Die EnEV formuliert keine konkreten Anforderungen an die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs, dennoch ist in den Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 und DIN V 4701 ein hydraulischer Abgleich vorgesehen.

Das Referenzgebäude der EnEV wird von einer hydraulisch abgeglichenen Heizungsanlage versorgt.

KfW- und BAFA-Förderung

Die Voraussetzungen für eine Förderung durch KfW bzw. BAFA ist ein hydraulischer Abgleich nach der technischen Regel des VdZ „Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand“. Unterschieden wird dabei zwischen Einzelmaßnahmen die im Rahmen einer Sanierung sowohl mit Verfahren A als auch B durchgeführt werden können und der Bestätigung für ein KfW-Effizienzhaus bei dem der hydraulische Abgleich nur über das Verfahren B durchgeführt werden kann.

Die Bestätigung erfolgt über die jeweiligen VdZ-Bestätigungsformulare.

Vdz Fachregel für Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand [6]

Die Technische Regel findet vor allem bei der Sanierung von Bestandsgebäuden Anwendung, die Vereinfachungen die beim Altbau getroffen werden finden bei Neubauten keine Anwendung. In Verbindung mit den Bestätigungsformularen setzt diese Regel einen technischen Standard welcher folgendermaßen aufgeteilt ist:

- Verfahren A

Das Verfahren A (Regelleistung) ist grundsätzlich als vertraglich geschuldete Regelleistung anzusehen und erhält seine Gültigkeit durch die VOB-C. Im Rahmen der Förderung darf das Verfahren nur bis maximal 500 m² Wohn- bzw. Nutzfläche je Heizkreis mit eigener Pumpe / Differenzdruckregler eingesetzt werden. Für die KfW- und BAFA-Förderung ist dieses Verfahren nicht uneingeschränkt zulässig, es gelten die jeweiligen Richtlinien.

- Verfahren B

Das Verfahren B ist als Premiumleistung separat zu beauftragen und nach aktuellem Stand für KfW- und BAFA-Förderung grundsätzlich immer gültig.

Die technische Ausführung der Verfahren A und B sind im Anhang A - Maßnahmen für den hydraulischen Abgleich nach VdZ beschrieben.

VOB-C (DIN 18380) [27]

„3.1.1 Die Bauteile von Heizanlagen und Wassererwärmungsanlagen sind so aufeinander abzustimmen, dass die geforderte Leistung erbracht, die Betriebssicherheit gegeben und ein sparsamer und wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.“

„3.5.1 Der Auftragnehmer hat die Anlagenteile so einzustellen, dass die geplanten Funktionen und Leistungen erbracht und die gesetzlichen Bestimmungen erfüllt werden. Der hydraulische Abgleich ist mit den rechnerisch ermittelten Einstellwerten so vorzunehmen, dass bei bestimmungsgemäßem Betrieb, also z. B. auch nach Raumtemperaturabsenkung oder Betriebspausen der Heizanlage, alle Wärmeverbraucher entsprechend ihrer Heizlast mit Heizwasser versorgt werden.“ (DIN 18380:2016-09)

DIN EN 15378: Inspektionen von Kesseln und Heizungssystemen [28]

Entsprechend den Anforderungen der EPBD wird die Vorgehensweise einer Heizungsinspektion erläutert. Dazu zählt auch die Überprüfung eines hydraulischen Abgleichs.

Im nationalen Anhang DIN SPEC 15378 wird ein vereinfachtes Verfahren zur Inspektion von Heizungsanlagen beschrieben (Heizungs-Check). Der Heizungs-Check enthält beschreibt u.a. eine Vorgehensweise, mit der innerhalb kurzer Zeit festgestellt werden kann, ob in einer bestehenden Heizung ein hydraulischer Abgleich durchgeführt worden ist oder nicht.

DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen [21]

DIN V 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung [29]

Beide Normen sehen im hydraulischen Abgleich eine Voraussetzung zum bestimmungsgemäßen Betrieb. Dabei sieht die DIN V 18599-5 einen Korrekturfaktor für nicht hydraulisch abgeglichene Anlagen vor.

„Der bestimmungsgemäße Betrieb der heiztechnischen Anlagen nach den anerkannten Regeln der Technik wird dabei vorausgesetzt. Diesbezügliche gesonderte Hinweise, wie z. B. auf den hydraulischen Abgleich bei Warmwasser-Heizungsanlagen, können VDMA 24199 entnommen werden.“ (DIN V 18599-5)

„Dabei wird der bestimmungsgemäße Betrieb der heiz- und raumluftechnischen Anlagen nach den anerkannten Regeln der Technik vorausgesetzt. Diesbezügliche gesonderte Hinweise, wie z. B. auf den hydraulischen Abgleich bei Warmwasser-Heizungsanlagen, können dem VDMA-Einheitsblatt „Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Trinkwassererwärmungs- und Raumluftechnischen Anlagen“ entnommen werden.“ (DIN V 4701-10)

DIN EN 14336: Heizungsanlagen in Gebäuden - Installation und Abnahme der Warmwasser-Heizungsanlagen [26]

Die Norm enthält zum hydraulischen Abgleich folgenden Passus:

„Die Wasserdurchflussmengen müssen hydraulisch abgeglichen werden und den Planungsvorgaben entsprechen.“

VDMA 24199 Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwarmwasser- Raumluftechnischen Anlagen [30]

Das VDMA Einheitsblatt soll die Projektierung und Planung unterstützen und mögliche Vorgehensweisen für den hydraulischen Abgleich darstellen. Außerdem beziehen sich sowohl die DIN V 4701-10 als auch die DIN V 18599-5 auf das VDMA-Einheitsblatt 24199 als anerkannte Regel der Technik.

Voraussetzungen

- Anlage gespült und frei von Verunreinigungen
- Anlagenteile gefüllt
- Anlagenteile entlüftet
- Alle Strömungskreise durchströmt oder zugeschalten wie im Betrieb vorgesehen
- Schmutzfänger/-filter gereinigt

Neuanlagen

Grundlage für den hydraulischen Abgleich ist die Rohrnetzrechnung. Es sind Armaturen für den hydraulischen Abgleich vorzusehen, z.B.:

- Voreinstellbare Thermostatventile
- Voreinstellbare Rücklaufverschraubungen in Kombination mit nicht voreinstellbaren Thermostatventilen
- Strangreguliertventile
- Differenzdruckregler (durchflussvariable Strömungskreise), sind zu verwenden bei zu hohen Strömungsgeräuschen aufgrund zu hoher Differenzdrücke
- Durchflussregler (durchflusskonstante und durchflussvariable Strömungskreise)

Die Armaturen werden dann gemäß den Berechnungen eingestellt, die Werte sind protokolliert den Revisionsunterlagen hinzuzufügen.

Zusätzlich kann mit Messung überprüft werden. Dazu müssen die Pumpen betriebsbereit sein, auf konstante Betriebsbedingungen eingestellt werden und thermische Regelarmaturen gemäß den Berechnungen eingestellt werden bzw. wenn nicht möglich dann bei der Messung berücksichtigt werden. Nach Erreichen der stationären Betriebsbedingungen werden die zu überprüfenden Anlagenteile gemessen und mit den Berechnungswerten verglichen. Abweichungen sind durch Korrektur der der Einstellung an den Regulierventilen oder an den Differenzdruckreglern zu korrigieren. Diese Korrektur hat Einfluss auf andere Anlagenteile und ist zu berücksichtigen. Die Messwerte und voreinstellwerte sind auch hier protokolliert den Revisionsunterlagen zuzufügen.

Altanlagen

Bei fehlender Dokumentation ist eine Berechnung nur schwer oder gar nicht möglich.

Es werden erst die Ist-/Soll- Durchflüsse ermittelt bspw. mit:

- Rechnerische Nachdimensionierung mittels Anlagensimulation
- Aufnahme der Netzkennlinie mit einer Messpumpe
- Messen der Durchflüsse mittels Messventile

Der hydraulische Abgleich kann nun statisch oder dynamisch ausgeführt werden

Statischer Abgleich durch Einsatz von Mess- und manuellen Drosselarmaturen

Es sind Armaturen vorzusehen die ein Einstellen und bei größeren Anlagen auch ein Messen der Anlagenteile ermöglichen. Vorher ist sicherzustellen, dass die Pumpen betriebsbereit und auf konstante Betriebsbedingungen eingestellt sind und alle einstellbaren Armaturen nach Erfahrung bzw. Solldurchfluss eingestellt sind, damit die vorgegebenen stationären Bedingungen erreicht werden.

Verschiedene Messverfahren können verwendet werden:

- **Iterative Methode**
Wiederholtes Messen an jeder hydraulischen Messstelle und Einstellen der entsprechenden Regulierventile bis sich gewünschte Werte einstellen.
- **Kompensations-/Proportionalmethode**
Es muss der Schlechtpunkt der Anlage bekannt sein. Dadurch wird die Mindestförderhöhe der Pumpe bestimmt. Für den ungünstigsten Anlagenteil muss ein mindestens anstehender Differenzdruck bei Sollmassenstrom vorhanden sein. Dieser sollte aus messtechnischen Gründen 3 kPa nicht unterschreiten. Während der Anlagenteil mit dem Schlechtpunkt durch ein Hauptventil auf den Mindestdruckverlust gehalten wird, werden alle anderen Anlagenteile gemessen und eingestellt.
- **Balance-Methode**
Der hydraulische Abgleich erfolgt mittels Messcomputer und Balancemethode-Software.

Die zu überprüfenden Anlagenteile werden gemessen und mit dem vorgesehenen Solldurchfluss verglichen. Anschließend werden die die Abweichungen durch Korrektur der Einstellungen an den Regulierventilen oder an den Differenzdruckreglern korrigiert. Es ist zu beachten, dass sich diese Korrekturen auf andere Anlagenteile auswirken.

Die Mess- und Voreinstellwerte sind zu protokollieren.

Dynamischer Abgleich in durchflussvariablen Anlagen durch Differenzdruckregler oder in durchflusskonstanten Anlagen durch Durchflussregler

Werden in durchflussvariablen Anlagen (z.B. Zweirohranlagen) Differenzdruckreglern in jeden Strömungskreis eingesetzt, ist der hydraulische Abgleich dynamisch durchgeführt, da durch den geregelten Differenzdruck und die nachgeschalteten eingestellten Drosseln an den einzelnen Verbrauchern der Soll-Durchfluss geregelt wird.

In durchflusskonstanten Anlagen ist der hydraulische Abgleich dynamisch durchgeführt, wenn in jeden Strömungskreis Durchflussregler eingesetzt werden, da eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Strömungskreise dadurch ausgeglichen wird.

Bei Anlagenerweiterung muss der dynamische Abgleich in den vorhandenen Strömungskreisen nicht überprüft und/oder geändert werden.

ZVSHK-Fachinformation zum hydraulischen Abgleich

Die Fachinformation hat einen informativen Charakter und gibt Vorschläge zur Durchführung des hydraulischen Abgleichs und insbesondere zur Einhaltung der VOB-C.

Neuanlagen

Zuerst muss der raumweise Wärmebedarf berechnet werden. Danach sollen die Systemtemperaturen bestimmt werden (Festlegung Vor- und Rücklauftemperatur). Mit diesen Daten werden die Heizflächen ausgelegt und die Volumenströme errechnet. Das Rohrnetz wird so dimensioniert, dass der Druckverlust zwischen 30 und 100 Pa/m liegt (Rohrnetzrechnung). Falls erforderlich, soll der Einsatz von Strangreguliertventilen vorgesehen, diese berechnet und eingestellt werden. Die Voreinstellwerte der Thermostatventile und die Förderhöhe der Pumpe sollen bestimmt werden. Zusätzlich ist der Einsatz von Differenzdruckreglern vorzusehen falls der Differenzdruck im Netz 200 mbar übersteigt. Zum Schluss ist die Voreinstellung der Thermostatventile vorzunehmen.

Altanlagen

Die Vorgehensweise erfolgt weitestgehend analog zu Neuanlagen. Der raumweise Heizbedarf darf abgeschätzt werden. Danach werden die Systemtemperaturen bestimmt bzw. gemessen. Die Heizflächen werden auf ihre Dimensionierung geprüft und die Heizflächendurchflüsse aus einer vorgegebenen Temperaturspreizung und dem Wärmebedarf ermittelt. Zur Ermittlung der Druckverluste im gesamten System soll das Rohrnetz aufgenommen werden. Falls erforderlich, soll der Einsatz von Strangreguliertventilen vorgesehen, die Voreinstellwerte ermittelt und nachträglich einreguliert werden. Zusätzlich sind Differenzdruckregler einzusetzen fall der Differenzdruck im Netz 200 mbar übersteigt. Die vorhandene Umwälzpumpe wird überprüft und ggf. ausgetauscht. Danach werden die Voreinstellwerte der Thermostatventile ermittelt, als Planungshilfe wird von 100 mbar am Ventil ausgegangen. Diese Voreinstellwerte werden nun übernommen.

5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

5.1 Randbedingungen

5.1.1 Definition typischer Anwendungsfälle

Die Betrachtungen erfolgen für ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten entsprechend ZUB-Modellgebäudekatalog [31].

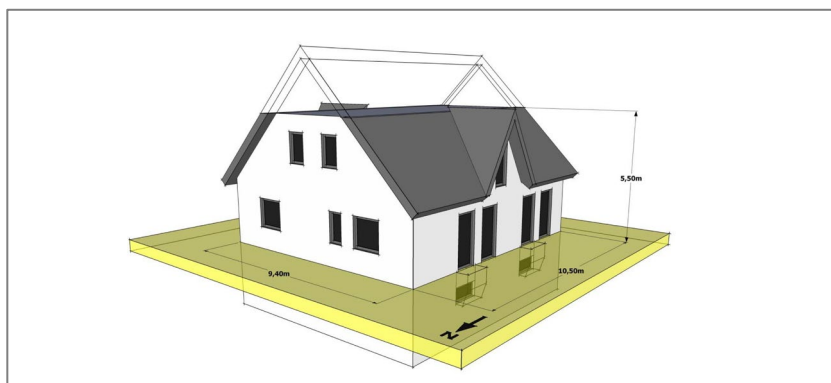


Abb. 2 Einfamilienhaus mit Keller [31]

Nutzfläche	148,8 m ²
Wohnfläche	110 m ²
Anzahl Heizkörper	
Altbau	11
Neubau	9
Flächenheizung	
FB-Heizkreise	6
Heizkörper	3

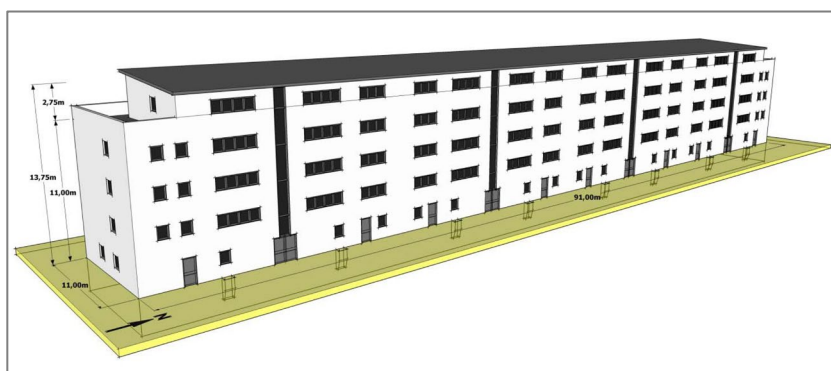


Abb. 3 Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten [31]

Nutzfläche	3.800 m ²
Wohnfläche	2.850 m ²
Anzahl Heizkörper	
Altbau	250
Neubau	200
Anzahl Stränge	8

Es erfolgt eine Unterscheidung in Bestandsgebäude und in Neubauten, als Neubauten werden alle errichteten Gebäude ab EnEV 2002 betrachtet.

Typische Verbrauchsdaten von Bestandsgebäuden werden in Abhängigkeit vom Sanierungszustand und dem Energieträger in der BMVBS-Online-Publikation: „Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden“ [32] angegeben. Bereinigt um den Anteil für Trinkwassererwärmung beträgt der spezifische Endenergieverbrauch Wärme (nur Heizung, Bezug Wohnfläche) so beispielsweise für ein unsaniertes Einfamilienhaus¹² mit Erdgas oder Heizöl als Energieträger 170 kWh/m²a und für ein großes unsaniertes Mehrfamilienhaus¹² 130 kWh/m²a [33].

Folgende Anlagensysteme werden betrachtet:

Einfamilienhaus, klein mit beheiztem Keller	Brennwertkessel + Heizkörper
	Luft-Wasser-Wärmepumpe + Fußbodenheizung (nur Neubau)
Mehrfamilienhaus groß (40 Wohneinheiten)	Brennwertkessel + Heizkörper
	Fernwärme + Heizkörper
	Fernwärme + Fußbodenheizung (nur Neubau)

¹² Baualter vor 1984

Die für den hydraulischen Abgleich vorhandene einstellbare Pumpe kann sowohl stufig geregelt als auch eine Hocheffizienzpumpe sein. Daher werden für die Wohngebäude zwei Ausgangsfälle betrachtet: Pumpe stufig und HE-Pumpe. Auf Grund des niedrigen Stromverbrauchs von Hocheffizienzpumpen ist die absolute Stromeinsparung entsprechend geringer.

5.1.2 Methodik, Allgemeine Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Entsprechend Energieeinsparungsgesetz (EnEG) § 5 Absatz (1) [1] gelten Anforderungen als wirtschaftlich vertretbar, wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer der Gebäude bzw. seiner Teile durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Bei bestehenden Gebäuden ist die noch zu erwartende Nutzungsdauer zu berücksichtigen. Damit gilt eine Maßnahme als wirtschaftlich, wenn die ermittelte Amortisationsdauer kleiner als die rechnerische Nutzungsdauer T_N ist.

Die Berechnung der statischen Amortisationszeit J und der Amortisationszeit T_A unter Berücksichtigung preisdynamischer Zahlungsfolgen erfolgt nach der Amortisationsmethode [34]:

$$J = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{jährliche Energiekosteneinsparung}} \quad (9)$$

$$T_A = \frac{\ln(1 - J \cdot (q - r))}{\ln \frac{r}{q}} \quad (10)$$

- J statische Amortisationszeit
- T_A Amortisationsdauer in a (in Abhängigkeit von Preissteigerung und Zinssatz)
- q Zinsfaktor; $q = 1 + \frac{p}{100}$; p = Zinssatz in %
- r Preisänderungsfaktor; $r = 1 + \frac{P_V}{100}$; P_V = jährliche Preisänderung in %

Die statische Amortisationszeit ist das Verhältnis der Investitionskosten für die Durchführung des hydraulischen Abgleichs und den jährlich eingesparten Energiekosten.

Für die Berechnung der Energiekosteneinsparung sind aktuelle Energiepreise mit den zu erwartenden Energiepreissteigerungen sowie der Zinssatz für Hypothekendarlehen maßgebend. Die Energiepreise für die Wohngebäude basieren auf den Angaben in [35]¹³ und wurden auf das Preisniveau 2018 hochgerechnet.

Tabelle 5 angesetzte Energiepreise

Energieträger	Arbeitspreis [€/kWh]	
	EFH	MFH
Erdgas	0,056	0,053
Fernwärme	0,069	0,068
Strom: Wärmepumpentarif	0,195	-
Strom: Haushaltstarif für Hilfsenergie	0,271	0,271

Preissteigerung und Zinssatz werden entsprechend dem Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie zu Flexibilisierungsoptionen zur EnEV [36] angesetzt, vgl. Tabelle 6. Im genannten Kurzgutachten wird bezüglich eines anzusetzenden Kalkulationszinssatzes ausgeführt:

¹³ BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017: Bundesweite Jahres-Mittelwerte für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016.

„Bei der Festlegung des Kalkulationszinssatzes wird vorgeschlagen, sowohl die aktuelle Situation als auch mittelfristige Trends bis zum Jahr 2020 zu berücksichtigen. Die nominalen Zinssätze für Baudarlehen mit 10-jähriger Zinsbindungsfrist sind in den letzten zwei Jahren weiter leicht gesunken und liegen derzeit (Stand Oktober 2017) bei knapp über 1 %. Die Prognose für den Anstieg der Verbraucherpreise in Deutschland für das Jahr 2017 liegt bei 1,8 %, nachdem dieser in den letzten Jahren unter 1 % lag.

Unter Berücksichtigung der Gleichung zur Bestimmung des Kalkulationssatzes:

$$\text{Kalkulationszinssatz} = (1 + \text{nominaler Baudarlehenszinssatz}) / (1 + \text{Verbrauchpreisindex}) - 1$$
wäre in Anbetracht der aktuellen Situation ein weiteres Absenken des Kalkulationszinssatzes unter 0 % zu rechtfertigen. Es ist aus unserer Sicht jedoch wahrscheinlich, dass bei einer Stabilisierung der Inflation im Bereich von 2 % das Zinsniveau wieder ansteigen wird.

Um einerseits der aktuellen Situation Rechnung zu tragen und andererseits auch einen möglichen Anstieg der Zinssätze in den nächsten Jahren abbilden zu können, wird in Abstimmung mit dem Auftraggeber ein Kalkulationszinssatz von 0 % zugrunde gelegt.“

Für die Preissteigerung wird bei den Erdgas- und Fernwärmevarianten vereinfachend die Preissteigerung für die Hilfsenergie analog zu Erdgas und Fernwärme verwendet, da die Hilfsenergie nur einen geringen Anteil hat.

Tabelle 6 Preissteigerung und Zinssatz

Preissteigerung und Zinssatz		
Preissteigerung	Erdgas/Fernwärme incl. Hilfsenergie	1,0 %
	Strom bei Wärmepumpen incl. Hilfsenergie	0,25 %
Zinssatz		0 %

Rechnerische Nutzungsdauern für Heizungsanlagen werden in VDI 2067 Blatt 1 [37] angegeben. Für den hydraulischen Abgleich von zentralen Heizungsanlagen sind keine Angaben enthalten. In [37] werden für Umwälzpumpen 10 a und für Thermostatventile 15 a angegeben. Orientiert man sich an diesen, für den hydraulischen Abgleich erforderlichen Anlagenkomponenten, kann der hydraulische Abgleich als wirtschaftlich gelten, wenn die Amortisationszeit unter 15 Jahren liegt.

5.1.3 Technische Lösungen und Kostenermittlung

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden folgende Fälle unterschieden:

- Statischer hydraulischer Abgleich
 - (1) Hydraulischer Abgleich bei Vorhandensein voreinstellbarer Ventile und Thermostatköpfe sowie von Strangreguliertventilen im Mehrfamilienhaus
 - (2) Hydraulischer Abgleich mit Einbau voreinstellbarer Ventile und Thermostatköpfe sowie von Strangreguliertventilen im Mehrfamilienhaus
- Dynamischer hydraulischer Abgleich
 - (3) Statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper mit vorhandenen voreinstellbaren Ventilen und Thermostatköpfen und Gruppenabgleich dynamisch mit Neueinbau von Strangdifferenzdruckreglern (Mehrfamilienhaus)
 - (4) Hydraulischer Abgleich mit Einbau dynamischer Ventile und Thermostatköpfe

Die Kosten und das mögliche energetische Einsparpotenzial unterscheiden sich entsprechend. Da sowohl das Vorhandensein stufig geregelter Umwälzpumpen als auch geregelter Hocheffizienzpumpen denkbar ist, werden zwei Ausgangsfälle betrachtet.

Die Kosten für die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs beinhalten folgende Arbeiten durch einen Heizungsfachmann:

- Datenaufnahme (Größe Heizkörper, Wärmedämmstandard, ...)
- Berechnung oder Abschätzung der Heizlast und der Voreinstellungswerte für jeden Raum / Heizkörper
- Je nach Variante:
 - o Einbau neuer Thermostatventile und Thermostatköpfe
 - o Einbau von Strangreguliertventilen
 - o Einbau von Strangdifferenzdruckreglern
- Einstellung der Thermostatventile, der Pumpe und der Heizkurve
- Dokumentation
- An- und Abfahrt¹⁴.

Anmerkung: Bei der Errichtung neuer Heizungsanlagen ist die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs entsprechend der technischen Regeln zwingend erforderlich. Der Aufwand reduziert sich gegenüber einem nachträglich durchzuführenden hydraulischen Abgleich auf das Einstellen der Thermostatventile, da die Durchführung auf Grundlage der ohnehin vorliegenden Planung im Zuge der Installation erfolgt.

¹⁴ Dabei wird unterstellt, dass der hydraulische Abgleich als eigenständige Maßnahme durchgeführt wird, erfolgen gleichzeitig weitere Arbeiten, verringert sich dieser Kostenbestandteil anteilig.

5.1.4 Ableitung möglicher Einsparungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Auf Basis der durchgeführten Literaturanalyse sowie der Bewertungskriterien nach Norm werden für die Wohngebäude mögliche Einsparungen differenziert nach Gebäude, Variante und Baualter (Bestand und Neubau) für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung festgelegt, vgl. Tabelle 7.

In den angegebenen Kennwerten wird berücksichtigt, dass in ausgedehnten Rohrleitungsnetzen der hydraulische Abgleich tendenziell eine größere Rolle spielt als in kleinen Netzen, da die Druckunterschiede an den Heizflächen naturgemäß größer sind. Dieser Effekt wird in der normativen Bewertung nur bedingt erfasst. Ein dynamischer Abgleich hat hier den zusätzlichen Vorteil, dass vergleichsweise aufwändige Berechnungen zumindest zum Teil entfallen können.

Zudem differenziert die Norm bei der Bewertung des hydraulischen Abgleichs nicht ausreichend zwischen der Wärmeübergabe mit Heizkörpern und Flächenheizungen. Die Normwerte (vgl. Tabelle 3, Abschnitt 4.1) wurden für Heizkörper-Heizungen ermittelt. Das Einsparpotenzial ist bei Flächenheizungen geringer zu erwarten, da die Verhältnisse sich zu Heizkörper-Heizungen unterscheiden:

- Alle Fußbodenheizkreise eines Heizkreisverteilers (je Etage oder Wohnung) den gleichen Druck zur Verfügung haben.
- Die Rohrlänge je Fußbodenheizkreis ab Heizkreisverteiler beschränkt ist und damit zwischen den Fußbodenheizkreisen nur geringe Unterschiede auftreten.
- Der Betrieb der Fußbodenheizungen i.d.R. durchgängig erfolgt.

Die energetischen Einsparungen für Flächenheizungen sind ebenfalls in Tabelle 7 enthalten. Hierbei wird unterstellt, dass eine durchgehende Betriebsweise vorliegt, die wärmephysiologischen Kriterien eingehalten werden (keine Unterschreitung der Sollraumtemperaturen) sowie Kompensationsmaßnahmen in Form von höheren Vorlauftemperaturen, längeren Anheizzeiten sowie höher eingestellten Pumpenkennlinien bei hydraulisch nicht abgeglichenen Systemen vorgenommen werden.

Bei den Varianten 2) und 4) ist der Ersatz eines vorhandenen Ventils mit Thermostatkopf durch ein neues Ventil mit neuem Thermostatkopf unterstellt, aus denen sich weitere Einsparungen ergeben. Diese können je nach Baualter der vorhandenen Ventile bis zu 7 % betragen [38]. Die hier berücksichtigten Einsparungen sind für Bestandsgebäude und entsprechenden Heizungsanlagen mittleren Baualters und berücksichtigen damit ein mittleres Einsparpotenzial. Bei noch älteren Bestandsanlagen (mit Baujahr vor 1988) können damit beim Austausch der Ventile/Thermostatköpfe höhere Einsparungen erzielt werden¹⁵.

Zusätzlich werden bei den Wohngebäuden **Einsparungen an Elektroenergie** bei einem abgeglichenen System im Vergleich zu einem nicht abgeglichenen System von 25 % berücksichtigt.

¹⁵ In DIN V 18599 wird dies bei der Bestimmung der Temperaturschwankungen berücksichtigt. Bei Festlegung der Endenergieeinsparungen sind bei diesen Varianten 4 kWh/m²a im Einfamilienhaus und 3 kWh/m²a im Mehrfamilienhaus pauschal eingerechnet.

Tabelle 7 Energetische Einsparungen: abgeglichenes im Vergleich zu nicht abgeglichenem System Wohngebäude

Variante			Endenergieeinsparung in kWh/m ² a			
			Einfamilienhaus		Mehrfamilienhaus	
			Altbau	Neubau	Altbau	Neubau
			bis 2001	2002 - 2008	bis 2001	2002 - 2008
(1)	statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper und Gruppenabgleich statisch, vorhandene TRV (und im MFH Strangreguliertventile) werden nur eingestellt	Brennwertkessel + Heizkörper	5,0	6,0	8,0	9,0
		Fernwärme + Heizkörper			7,0	8,0
	statischer hydraulischer Abgleich je Heizfläche (Flächenheizungen)	Wärmepumpe + Fußbodenheizung		2,5		
		Fernwärme + Fußbodenheizung				5,0
(2)	statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper und Gruppenabgleich statisch mit Einbau neuer Ventile/TRV (und im MFH neue Strangreguliertventile)	Brennwertkessel + Heizkörper	9,0	10,0	11,0	12,0
		Fernwärme + Heizkörper			10,0	11,0
	statischer hydraulischer Abgleich je Heizfläche (Flächenheizungen)	Wärmepumpe + Fußbodenheizung		2,5		
		Fernwärme + Fußbodenheizung				5,0
(3)	statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper (Ventil/TRV vorhanden) und Gruppenabgleich dynamisch mit Einbau neuer Strangdifferenzdruckregler	Brennwertkessel + Heizkörper			11,0	12,0
		Fernwärme + Heizkörper			10,0	11,0
(4)	dynamischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper mit Einbau dynamischer Heizkörperventile und neuer Thermostatköpfe	Brennwertkessel + Heizkörper	13,0	14,0	15,0	16,0
		Fernwärme + Heizkörper			14,0	15,0

5.2 Ergebnisse

Tabelle 8	Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: voreinstellbare Ventile vorhanden - Einfamilienhaus, klein	25
Tabelle 9	Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer voreinstellbarer Ventile – Einfamilienhaus, klein	26
Tabelle 10	Ergebnisse dynamischer hydraulischer Abgleich: Einbau neue TRV mit Differenzdruckregler/ Volumenstrombegrenzer - Einfamilienhaus, klein	27
Tabelle 11	Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: voreinstellbare Ventile + Strangreguliertventile vorhanden - MFH mit 40 WE	28
Tabelle 12	Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer voreinstellbarer Ventile + Strangreguliertventile - MFH mit 40 WE	29
Tabelle 13	Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper und dynamischer Gruppenabgleich mit neuen Strangdifferenzdruckreglern - MFH mit 40 WE	30
Tabelle 14	Ergebnisse dynamischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer TRV mit Differenzdruckregler/Volumenstrombegrenzer - MFH mit 40 WE	31

Tabelle 8 Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: voreinstellbare Ventile vorhanden - Einfamilienhaus, klein

(1) statischer hydraulischer Abgleich - voreinstellbare Ventile vorhanden	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Luft-Wasser-Wärmepumpe + Fußbodenheizung		
	Baualterklasse	Altbau		Neubau		Neubau		
		bis 2001		ab 2002 bis 2008		ab 2002 bis 2008		
Einfamilienhaus, klein (Keller beheizt)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	
Nutzfläche A _N	m ²			235,2				
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²			110,0				
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	5		6		2,5		
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	550		660		275		
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	31		37		54		
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	65	30	65	30	170	90	
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	16	8	16	8	43	23	
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	4	2	4	2	12	6	
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	35	33	41	39	65	60	
Kosten hydraulischer Abgleich	€	290		250		250		
statische Amortisationszeit J	a	8,2 a	8,8 a	6,0 a	6,4 a	3,8 a	4,2 a	
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas	1,0%	8,0 a	8,5 a	5,9 a	6,2 a	3,8 a	4,2 a
	Preissteigerung Strom Wärmepumpe	0,25%						
	Zinssatz	0,0%						

Tabelle 9 Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer voreinstellbarer Ventile – Einfamilienhaus, klein

(2) statischer hydraulischer Abgleich - neue voreinstellbare Ventile	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Luft-Wasser-Wärmepumpe + Fußbodenheizung		
	Baualtersklasse	Altbau		Neubau		Neubau		
		bis 2001		ab 2002 bis 2008		ab 2002 bis 2008		
Einfamilienhaus, klein (Keller beheizt)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	
Nutzfläche A _N	m ²	235,2						
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²	110,0						
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	9		10		2,5		
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	990		1.100		275		
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	55		62		54		
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	65	30	65	30	170	90	
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	16	8	16	8	43	23	
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	4	2	4	2	12	6	
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	60	57	66	64	65	60	
Kosten hydraulischer Abgleich	€	900		700		1.500		
statische Amortisationszeit J	a	15,0 a	15,7 a	10,6 a	11,0 a	23,0 a	25,1 a	
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas	1,0%	14,1 a	14,6 a	10,1 a	10,5 a	22,4 a	24,4 a
	Preissteigerung Strom Wärmepumpe	0,25%						
	Zinssatz	0,0%						

Tabelle 10 Ergebnisse dynamischer hydraulischer Abgleich: Einbau neue TRV mit Differenzdruckregler/ Volumenstrombegrenzer - Einfamilienhaus, klein

(4) dynamischer hydraulischer Abgleich - neue TRV mit Differenzdruckregler/ Volumenstrombe- grenzer	Heizsystem		Brennwertkessel + Heizkörper			
	Baualtersklasse	Altbau		Neubau		
		bis 2001		ab 2002 bis 2008		
	Einfamilienhaus, klein (Keller beheizt)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe
Nutzfläche A_N	m ²	235,2				
Wohnfläche A_{Wfl}	m ²	110,0				
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	13		14		
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	1.430		1.540		
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	80		86		
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	65	30	65	30	
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	16	8	16	8	
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	4	2	4	2	
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	84	82	91	88	
Kosten hydraulischer Abgleich	€	1.000		800		
statische Amortisationszeit J	a	11,8 a	12,2 a	8,8 a	9,1 a	
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas	1,0%	11,2 a	11,5 a	8,5 a	
	Zinssatz	0,0%				8,7 a

Tabelle 11 Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: voreinstellbare Ventile + Strangregulierventile vorhanden - MFH mit 40 WE

(1) statischer hydraulischer Abgleich - voreinstellbare Ventile und Strangregulierventile vorhanden	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Fernwärme + Heizkörper				Fernwärme + Fußbodenheizung	
		Altbau		Neubau		Altbau		Neubau		Neubau	
	Baualtersklasse	bis 2001		ab 2002 bis 2008		bis 2001		ab 2002 bis 2008		ab 2002 bis 2008	
Mehrfamilienhaus (40 Wohneinheiten)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe
Nutzfläche A _N	m ²	3.800									
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²	2.850									
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	8		9		7		8		5	
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	22.800		25.650		19.950		22.800		14.250	
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	1.208		1.359		1.357		1.550		969	
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	615	390	615	390	615	390	615	390	1.470	1.135
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		25%		25%	
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	154	98	154	98	154	98	154	98	368	284
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	42	26	42	26	42	26	42	26	100	77
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	1.250	1.235	1.401	1.386	1.398	1.383	1.592	1.577	1.069	1.046
Kosten hydraulischer Abgleich	€	4.900		4.000		4.900		4.000		3.500	
statische Amortisationszeit J	a	3,9 a	4,0 a	2,9 a	2,9 a	3,5 a	3,5 a	2,5 a	2,5 a	3,3 a	3,3 a
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas / Fernwärme	1,0%									
	Zinssatz	0,0%									

Tabelle 12 Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer voreinstellbarer Ventile + Strangreguliertventile - MFH mit 40 WE

(2) statischer hydraulischer Abgleich - neue voreinstellbare Ventile + Strangreguliertventile	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Fernwärme + Heizkörper				Fernwärme + Fußbodenheizung	
		Altbau		Neubau		Altbau		Neubau		Neubau	
	Baualtersklasse	bis 2001		ab 2002 bis 2008		bis 2001		ab 2002 bis 2008		ab 2002 bis 2008	
Mehrfamilienhaus (40 Wohneinheiten)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe
Nutzfläche A _N	m ²					3.800					
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²					2.850					
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	11		12		10		11		5	
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	31.350		34.200		28.500		31.350		14.250	
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	1.662		1.813		1.938		2.132		969	
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	615	390	615	390	615	390	615	390	1.470	1.135
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		25%		25%	
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	154	98	154	98	154	98	154	98	368	284
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	42	26	42	26	42	26	42	26	100	77
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	1.703	1.688	1.854	1.839	1.980	1.964	2.173	2.158	1.069	1.046
Kosten hydraulischer Abgleich	€	16.900		13.900		16.900		13.900		30.700	
statische Amortisationszeit J	a	9,9 a	10,0 a	7,5 a	7,6 a	8,5 a	8,6 a	6,4 a	6,4 a	28,7 a	29,4 a
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas / Fernwärme	1,0%									
	Zinssatz	0,0%									
		9,5 a	9,6 a	7,3 a	7,3 a	8,2 a	8,3 a	6,2 a	6,3 a	25,4 a	25,9 a

Tabelle 13 Ergebnisse statischer hydraulischer Abgleich je Heizkörper und dynamischer Gruppenabgleich mit neuen Strangdifferenzdruckreglern - MFH mit 40 WE

(3) statischer hydraulischer Abgleich - mit vorhandenen voreinstellbaren TRV und Gruppenabgleich dynamisch mit Neueinbau Strangdifferenzdruckregler	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Fernwärme + Heizkörper				
	Baualtersklasse	Altbau		Neubau		Altbau		Neubau		
		bis 2001		ab 2002 bis 2008		bis 2001		ab 2002 bis 2008		
	Mehrfamilienhaus (40 Wohneinheiten)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe
Nutzfläche A _N	m ²	3.800								
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²	2.850								
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	11		12		10		11		
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	31.350		34.200		28.500		31.350		
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	1.662		1.813		1.938		2.132		
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	615	390	615	390	615	390	615	390	
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		25%		
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	154	98	154	98	154	98	154	98	
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	42	26	42	26	42	26	42	26	
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	1.703	1.688	1.854	1.839	1.980	1.964	2.173	2.158	
Kosten hydraulischer Abgleich	€	6.700		6.000		6.700		6.000		
statische Amortisationszeit J	a	3,9 a	4,0 a	3,2 a	3,3 a	3,4 a	3,4 a	2,8 a	2,8 a	
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas / Fernwärme	1,0%	3,9 a	3,9 a	3,2 a	3,2 a	3,3 a	3,4 a	2,7 a	2,8 a
	Zinssatz	0,0%								

Tabelle 14 Ergebnisse dynamischer hydraulischer Abgleich: Einbau neuer TRV mit Differenzdruckregler/Volumenstrombegrenzer - MFH mit 40 WE

(4) dynamischer hydraulischer Abgleich - neue TRV mit Differenzdruckregler/Volumenstrombe- grenzer	Heizsystem	Brennwertkessel + Heizkörper				Fernwärme + Heizkörper			
		Altbau		Neubau		Altbau		Neubau	
	Baualterklasse	bis 2001		ab 2002 bis 2008		bis 2001		ab 2002 bis 2008	
Mehrfamilienhaus (40 Wohneinheiten)	IST-Zustand	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe	Pumpe stufig	HE-Pumpe
Nutzfläche A _N	m ²	3.800							
Wohnfläche A _{Wfl}	m ²	2.850							
Einsparung Wärme spezifisch	kWh/m ² a	15		16		14		15	
Einsparung Wärme absolut	kWh/a	42.750		45.600		39.900		42.750	
Einsparung Energiekosten Wärme	€/a	2.266		2.417		2.713		2.907	
Hilfsenergieverbrauch ohne hydraulischen Abgleich	kWh/a	615	390	615	390	615	390	615	390
Einsparpotenzial Strom	%	25%		25%		25%		25%	
Einsparung Hilfsenergie	kWh/a	154	98	154	98	154	98	154	98
Einsparung Energiekosten Strom für Hilfsenergie	€/a	42	26	42	26	42	26	42	26
Einsparung Energiekosten gesamt	€/a	2.307	2.292	2.458	2.443	2.755	2.740	2.949	2.933
Kosten hydraulischer Abgleich	€	18.700		15.100		18.700		15.100	
statische Amortisationszeit J	a	8,1 a	8,2 a	6,1 a	6,2 a	6,8 a	6,8 a	5,1 a	5,1 a
Amortisationsdauer T_A	Preissteigerung Erdgas / Fernwärme	1,0%		7,8 a	7,9 a	6,0 a	6,0 a	6,6 a	6,6 a
	Zinssatz	0,0%							

6 Vereinfachte Abschätzung des gesamtwirtschaftlichen Einsparpotenzials

In Deutschland gibt es derzeit etwa 18,9 Mio. Wohngebäude [39], von denen etwa 84 % mit einer Zentralheizung (einschließlich Fernwärmeheizung) versorgt werden [40]. Entsprechend der statistischen Auswertung im Anhang B - Aktuelle Statistik zum durchgeführten hydraulischen Abgleich weisen 85 % der Wohngebäude keinen hydraulischen Abgleich auf.

Im dena-Gebäudereport 2018 werden für Deutschland energiebedingte emittierte Treibhausgasemissionen für Gebäudewärme mit 190,2 Mio. t CO₂-Äquivalent ausgewiesen [41]. Daraus lassen sich bei einem durchschnittlichen Einsparpotenzial von 5 % bis 10 % gesamtwirtschaftliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen von 6,8 bis 13,5 Mio. t_{CO2}-Äquivalent ermitteln, vgl. Tabelle 15. Legt man den mittleren Wert von 7,5 % zu Grunde, ergibt sich ein Einsparpotenzial von jährlich etwa 10 Mio. t_{CO2}-Äquivalent durch eine vollständige Umsetzung des hydraulischen Abgleichs im Gebäudebestand.

Tabelle 15 Abschätzung des gesamtwirtschaftlichen Einsparpotenzials durch hydraulischen Abgleich

emittierte Treibhausgasemissionen aus Gebäudewärme		190.200.000	t CO ₂ -Äquivalent	[41]
davon aus Zentralheizungen (incl. Fernwärme)	83,6%	159.007.200	t CO ₂ -Äquivalent	[40]
davon aus Zentralheizungen nicht hydraulisch abgeglichen	85,0%	135.156.120	t CO ₂ -Äquivalent	Anhang B
Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch hydraulischen Abgleich	von	5,0%	6.757.806	t CO₂-Äquivalent
	bis	10,0%	13.515.612	t CO₂-Äquivalent
	mittel	7,5%	10.136.709	t CO₂-Äquivalent

7 Fazit

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der energetischen und wirtschaftlichen Einschätzung von Verfahren zum hydraulischen Abgleich. Wesentliches Ziel der Studie ist es, eine realistische Einschätzung für Systeme zu detektieren, die einen statischen und dynamischen hydraulischen Abgleich realisieren.

Zu diesem Zwecke wird die vorliegende Studie in zwei Teilbereiche gegliedert. Im ersten Teil wird ein Überblick zu den wichtigsten derzeit vorliegenden Literaturwerten im Zusammenhang mit dem hydraulischen Abgleich gegeben. Im Zuge der Bearbeitung wird hierbei festgestellt, dass die verfügbaren Literaturquellen bezüglich Untersuchungsansatz (Simulation, Messung, Feldtest), Ergebnissen und Qualität der Arbeit wesentliche Unterschiede aufweisen. Die Autoren dieser Studie haben sich dazu entschlossen nur Literaturstellen in die vorliegende Arbeit aufzunehmen, die thermodynamisch und hydraulisch exakt bilanziert wurden und bei denen die wesentlichen Randbedingungen nachvollziehbar dokumentiert sind.

Basierend auf diesen Vorgaben kann festgestellt werden, dass in der Literatur die Bandbreite von dokumentierten thermischen Einsparpotentialen zwischen 0...15% bezogen auf den jeweiligen Ausgangszustand dokumentiert ist. Hinsichtlich der elektrischen Einsparungen sind größere Schwankungsbreiten zu detektieren, die in einem Bereich von 12%...50% liegen. Für den Wohngebäudebereich mit Heizkörperheizungen ist eine belastbare Datenbasis für konventionelle Verfahren zum hydraulischen Abgleich verfügbar.

Aussagen zur Differenzierung der Einsparpotentiale bei unterschiedlicher Gebäudearten und -größen, bei bauteilintegrierten Heizflächen sowie der zusätzlichen Verbesserungen durch einen dynamischen hydraulischen Abgleich sind demgegenüber nur bedingt vorhanden. Um dennoch eine verlässliche Aussage bezüglich der Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen, werden die Literaturwerte durch aktuelle normative Angaben aus der DIN V 18599 bzw. EN 15316-2 ergänzt. Dies betrifft insbesondere Fragestellungen zur Systemgestaltung und zum Austausch von regelungstechnischen Armaturen.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Fragestellungen zeigen die Analysen im Rahmen der Studie deutlich, dass die Amortisationszeiten stark vom Installationsaufwand abhängen. Bei vorhandenen voreinstellbaren Ventilen, bei denen eine Berechnung und Einstellung vorgenommen werden muss, beträgt die Amortisationszeit bei Bestandswohngebäuden mit Heizkörperheizungen zwischen 6 und 9 Jahren im Einfamilienhaus und zwischen 2,5 und 4 Jahren im betrachteten Mehrfamilienhaus. Erfolgt beim Mehrfamilienhaus zusätzlich zur Einstellung vorhandener voreinstellbarer Ventile ein dynamischer Gruppenabgleich mit Einbau neuer Strangdifferenzdruckregler steigt das Einsparpotenzial, die Amortisationszeiten bewegen sich in vergleichbaren Bereichen. Müssen die voreinstellbaren Ventile erst installiert werden, so steigt die entsprechende Zeit der Refinanzierung der Investitionen an. Erfolgt der hydraulische Abgleich dynamisch durch Einbau von Ventilen mit Differenzdruckregler bzw. Volumenstrombegrenzer am Heizkörper, können höhere Einsparungen erzielt werden. Trotz höherer Kosten sinken die Amortisationszeiten gegenüber dem Einbau von voreinstellbaren Ventilen auf 8,5 bis 12,2 Jahre im Einfamilienhaus und auf 5 bis 8,1 Jahre im betrachteten Mehrfamilienhaus.

Die ausgewerteten statistischen Erhebungen zeigen, dass etwa 85 % der Wohngebäude in Deutschland keinen hydraulischen Abgleich aufweisen. Durch die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs können unter Ansatz einer mittleren Energieeinsparung von 7,5 % Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 10 Mio. t_{CO_2} -Äquivalent pro Jahr vermieden werden.

Zusammenfassend kann aus der vorliegenden Studie entnommen werden, dass der hydraulische Abgleich einen positiven energetischen Effekt auf den Wärmeverbrauch sowie auf den elektrischen Hilfsenergieverbrauch von Heizungsanlagen hat. Die relativen und absoluten Einsparungen unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Ausgangszustand und den umgesetzten Maßnahmen zum hydraulischen Abgleich.

Typischerweise werden Einsparungen von 2,5 kWh/m²a...16 kWh/m²a¹⁶ beim Wärmeverbrauch (Endenergie) sowie von 25% beim Hilfsenergieverbrauch (Strom) erreicht.

Diese energetischen Einsparungen führen bei Bestandswohngebäuden mit Heizkörperheizungen bei vorhandenen einstellbaren Thermostatventilen zu Amortisationszeiten im Bereich von etwa 8 bis 9 Jahren (EFH) und etwa 3,5 bis 4 Jahren (MFH) für den nachträglichen hydraulischen Abgleich. Die rechnerische Lebensdauer beträgt 15 Jahre. Der nachträgliche hydraulische Abgleich eines Bestandsnetzes ist damit wirtschaftlich im Sinne des §5 des Energieeinsparungsgesetzes.

In neuen Heizungsanlagen ist der hydraulische Abgleich eine zwingend erforderliche Maßnahme für die Installation eines den technischen Vorgaben entsprechenden Heizungssystems. Die Durchführung erfolgt im Zuge der ohnehin erforderlichen Planung und Installation.

Ein dynamischer hydraulischer Abgleich erschließt zusätzliche Einsparpotenziale gegenüber einem statischen Abgleich. Ist für die Durchführung des hydraulischen Abgleichs der Einbau neuer Thermostatventile erforderlich, ergeben sich günstigere Amortisationszeiten als beim statischen Abgleich.

Durch eine vollständige Umsetzung des hydraulischen Abgleichs im Gebäudebestand kann ein Einsparpotenzial von jährlich etwa 10 Mio. t_{CO_2} -Äquivalent erschlossen werden.

¹⁶ Die höheren Einsparwerte enthalten auch Einsparungen, die sich aus dem Austausch von thermischen Regelventilen zur Durchführung des hydraulischen Abgleichs ergeben.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Energieeinsparungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2684), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Juli 2013 (BGBl. I S. 2197) geändert worden ist.*
- [2] *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 16. Oktober 2013 (Energieeinsparverordnung - EnEV 2014).*
- [3] *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz - EEWärmeG) in der seit 1. Mai 2011 geltenden Fassung.*
- [4] *RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung), Änderung vom 30. Mai 2018 durch RICHTLINIE (EU) 2018/844 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES.*
- [5] *RICHTLINIE (EU) 2018/844 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz.*
- [6] *VDZ: Fachregel – Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand, VDZ – Spitzenverband der Gebäudetechnik, Berlin.*
- [7] *SAENA: Hydraulischer Abgleich für Heizungssysteme, Sächsische Energieagentur GmbH SAENA, 2012.*
- [8] *Schweikhardt, F.: Hydraulischer Abgleich und Heizungspumpentausch – Ein Pilotprojekt der Evangelischen Landeskirche in Baden, Evangelische Landeskirche in Baden, 2014.*
- [9] *Schweikhardt, F.: Hydraulischer Abgleich und Heizungspumpentausch – Ein Pilotprojekt der Evangelischen Landeskirche in Baden, Evangelische Landeskirche in Baden, 2017 - Abschlussbericht.*
- [10] *ASUE: Hydraulischer Abgleich von Heizungsanlagen in Frage und Antwort – Für Wohnungseigentümer, Hausbesitzer und Wohnungsverwaltungen, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2017.*
- [11] *DENA: Hydraulischer Abgleich - So wird es behaglich! Effizient geheizt mit dem hydraulischen Abgleich, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 02/2017.*
- [12] *Recknagel, Sprenger, Albers: Taschenbuch für Heizungs + Klimatechnik, 78. Auflage, 2017/2018.*
- [13] *Wolff, D.; Jagnow, K.: Optimus - Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen / Deutsche Bundesstiftung.*
- [14] *Jagnow, K.: Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik, Universität Dortmund, Dissertation, 2004.*
- [15] *Irrek, W.: Optimierung der Heizungssysteme und hocheffiziente Umwälzpumpen in größeren Gebäuden / Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen - Abschlussbericht. 2005. _ Forschungsbericht.*

- [16] Felsmann, C.; Hirschberg, R.: *Das Rohrnetz in Heizungsanlagen - Eine Analyse des Teillastverhaltens und der Effizienz von Rohrnetzen*. VDI Verlag Düsseldorf, 2007., ISBN 978 3 18 315519 4.
- [17] Hirschberg, R.: *Vom Heizkessel zum Heizkörper - ohne Wärmeverteilung geht nichts*. In: TGA-Kongress (2007).
- [18] Hirschberg, R.: *Auslegung und dynamischer Betrieb von Wärmeverteilssystemen*. In: TGA Kongress (2007).
- [19] Guzek, G.: *Zur Energieeinsparung in Heizungsanlagen durch den hydraulischen Abgleich*, Dissertation TU Dresden (2009).
- [20] Seifert, J.; Meinzenbach, A., Knorr, M. Perschk, A.: *Energetischer Vergleich von thermostatischen Heizkörperventilen mit und ohne Durchflussregelung*, TU Dresden (unveröffentlichter Forschungsbericht), 2014.
- [21] DIN V 18599:2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung (11 Normenteile)*, Beuth Verlag GmbH.
- [22] DIN EN 15316-2: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen – Teil 2: Wärmeübergabesysteme (Raumheizung und -kühlung)*, Modul M3-5, M4-5; 2017, Beuth Verlag GmbH.
- [23] Thalfeldt, M.; Simson, R.; Kurnitski, J.: *The effect of hydronic balancing on room temperature and heat pump efficiency of a building with underfloor heating* In: *Energy Procedia* 96 (2016) 467 – 477.
- [24] Oschatz, B.; Felsmann, C.: *Hydraulischer Abgleich in DIN V 18599 – Überarbeitung der Kennwerte für den hydraulischen Abgleich in Rohrleitungen*, ITG Dresden 2007.
- [25] Osojnik, M; Kolb, S.; Chambris, A.; Schramm, H.: *Hydronic balancing and control - how to overcome the global challenge of reducing energy use in multifamily housing*, ECEEE 2017 summer study, 2017 (<https://www.eceee.org/summerstudy/>).
- [26] EN 14336: *Heizungsanlagen in Gebäuden – Installation und Abnahme der Warmwasser-Heizungsanlagen*; 2005, Beuth Verlag GmbH.
- [27] DIN 18380:2012-09: *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Heizanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen*.
- [28] DIN EN 15378:2008-07: *Heizungssysteme in Gebäuden - Inspektion von Kesseln und Heizungssystemen; Deutsche Fassung*.
- [29] DIN V 4701-10:2003-08. *Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*.
- [30] VDMA 24199: *Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwarmwasser- Raumluftechnischen Anlagen*, Mai 2005.
- [31] ZUB Kassel e.V. im Auftrag des BMVBS/BBSR: *Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit*, Oktober 2010.
- [32] BMVBS-Online-Publikation, Nr. 11/2012: *Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden*, Juni 2012.

-
- [33] *ITG Dresden: Wirtschaftlichkeit von Systemen zur Erfassung und Abrechnung des Wärmeverbrauchs, Januar 2014 im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).*
 - [34] *VDI 6025 2012-11: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen, November 2012.*
 - [35] *BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017, Stand Januar 2017.*
 - [36] *IB Hauser u.a.: Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie zu Flexibilisierungsoptionen, im Auftrag des BMWi, April 2018.*
 - [37] *VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung, September 2012.*
 - [38] *Seifert, J.; Meinzenbach, A., Haupt, J. Perschk, A.: Energieeinsparung durch den Austausch von thermostatischen Reglern, HLH Bd. 62 2011.*
 - [39] *Gebäude und Wohnungen Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden 2017, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018.*
 - [40] *BDEW-Studie zum Heizungsmarkt: Wie heizt Deutschland?, Berlin Juli 2015.*
 - [41] *dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2018: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, 04/2018.*

9 Symbolverzeichnis

b	Überdimensionierungsfaktor	-
f_{hydr}	hydraulischer Faktor	-
c_p	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg K)
C_{P1}, C_{P2}	Konstanten	-
$e_{h,d,aux}$	Aufwandszahl für Betrieb der Heizungspumpe	-
EEl	Energieeffizienzindex	-
f_e	Effizientfaktor der Pumpe	-
J	statische Amortisationszeit	a
\dot{m}	Massestrom	kg/s
n	Heizflächenexponent	-
P_{hydr}	hydraulische Leistung	W
p	Zinssatz	%
P_V	jährliche Preisänderung	%
$Q_{h,b}$	Heizwärme - Verteilung	kWh
Q_{ce}	Heizwärme - Übergabe	kWh
\dot{Q}	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_{h,max}$	maximale Heizleistung	W
q	Zinsfaktor	-
r	Preisänderungsfaktor	-
T_A	Amortisationsdauer	a
T_N	rechnerische Nutzungsdauer	a
t_h	Betriebszeit	h
$W_{h,d}$	elektrischer Aufwand	kWh
$W_{h,d,hydr}$	hydraulischer Energiebedarf	kWh
$\beta_{h,d}$	hydraulischer Belastungsgrad	-
β_i	thermischer Belastungsgrad	-
$\vartheta_{i,h,soll}$	Sollinnentemperatur	°C
ϑ_{RL}	Rücklauf-temperatur	°C
$\vartheta_{RL,m}$	mittlere Rücklauf-temperatur	°C
ϑ_{RA}	Auslegungs-rücklauf-temperatur	°C
ϑ_{VL}	Vorlauf-temperatur	°C
$\vartheta_{VL,m}$	mittlere Vorlauf-temperatur	°C
ϑ_{VA}	Auslegungs-vorlauf-temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperatur-differenz	K
$\Delta\vartheta_{ce}$	Summe der Temperaturschwankung	K
$\Delta\vartheta_{ctr}$	Temperaturschwankung infolge Regelabweichung	K
$\Delta\vartheta_{emb}$	Temperaturschwankung infolge zusätzlichen Wärmeverlust	K
$\Delta\vartheta_{hydr}$	Temperaturschwankung infolge nicht durchgeführten hydraulischen Abgleiches	K
$\Delta\vartheta_{im}$	Temperaturschwankung infolge intermittierenden Betrieb	K
$\Delta\vartheta_{rad}$	Temperaturschwankung infolge Strahlung des Wärmeübergabesystems	K
$\Delta\vartheta_{roomaut}$	Temperaturschwankung infolge Raumautomation	K
$\Delta\vartheta_{str}$	Temperaturschwankung infolge Schichtung	K

Anhang A - Maßnahmen für den hydraulischen Abgleich nach VdZ

Im Rahmen von verschiedenen Aktivitäten von Verbänden der Heizungstechnik entstand in den letzten Jahren eine Bewertungsmatrix zum hydraulischen Abgleich, welcher von dem VdZ - Forum für Energieeffizienz in der Gebäudetechnik e.V (Spitzenverband der Gebäudetechnik) veröffentlicht wurde. Das Verfahren wird im Rahmen der KfW-Förderung als Grundlage der Bewertung verwendet. Es soll nachfolgend überblicksartig beschrieben werden.

Die Vorgehensweise um zu einem hydraulischen Abgleich zu kommen kann grundsätzlich nach einem Verfahren A oder B vorgenommen werden. Detailliert beschrieben sind diese in Tabelle 16.

Tabelle 16 Verfahren zur Durchführung des hydraulischen Abgleiches (Zweirohrheizung mit Heizflächen) - Einzelmaßnahmen

	Verfahren A	Verfahren B
	(Näherungsverfahren zulässig bei beheizten Nutzflächen bis 500 m ² je Heizkreis ausgestattet mit einer Pumpe oder Differenzdruckregler/ Durchflussreglern, siehe auch Fachregel, Mindestleistung)	(in der Regel: Softwareberechnung, für alle Anlagengrößen, siehe auch Fachregel, grundsätzlich empfohlen)
Zur Verwendung bei Fördermaßnahme:	Zulässig bei: <ul style="list-style-type: none"> - Austausch von Wärmeerzeuger - Heizungsoptimierung - Nachträgliche Maßnahmen zur Wärmedämmung 	Erforderlich bei: <ul style="list-style-type: none"> - Heizungspaket
Nachzuweisende Leistungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Heizflächendurchflüsse anhand einer abgeschätzten Heizlast (z.B. nach Baualtersklasse (W/m²) oder installierter Heizflächengröße) - Thermostatventile mit konventioneller Voreinstellung: Ermittlung der Voreinstellung mittels Heizflächendurchfluss und Annahme eines Differenzdruckes - Thermostatventil mit automatischer Durchflussbegrenzung: Voreinstellwert= ermittelter Heizflächendurchfluss - Überschlägige Ermittlung von <ul style="list-style-type: none"> o Systemtemperatur o Pumpenförderhöhe o Gesamtdurchfluss o Ggf. Einstellwerte von Strangarmaturen und / oder Differenzdruckreglern 	<ul style="list-style-type: none"> - Raumweise Heizlastberechnung in Anlehnung an DIN EN 12831 inkl. relevanter Beiblätter. Vereinfachungen sind möglich (z.B. U-Werte nach Typologien) - Heizflächenauslegung: Berechnung der Heizflächendurchflüsse in Abhängigkeit der geplanten Vor- und Rücklauftemperaturen und der Heizflächengrößen - Ermittlung (in der Regel durch Rohrnetz-berechnung) von: <ul style="list-style-type: none"> o Voreinstellwerten der Thermostatventile o Pumpenförderhöhe o Gesamtdurchfluss o gef. Einstellwerte von Strangarmaturen und / oder Differenzdruckreglern o Optimierung der Vorlauf-temperatur bei Heizflächen im Bestand - Wenn große Teile der Alt-Installation des Rohrnetzes im nicht sichtbaren Bereich liegen, ist eine Ermittlung der Voreinstellwerte durch Annahme von Rohrlängen und Nennweiten möglich

Speziell bei Fußbodenheizungen und bei Einrohrheizungen werden zusätzliche Anforderungen benannt:

Nachzuweisende Leistungen bei Einrohrheizungen:

- Ermittlung der einzelnen Einrohr-Heizkreisdurchflüsse: Die Heizlast wird entsprechend den Baualtersklassen (Verfahren A) oder dem Verfahren B ermittelt.
- Abgleich der Einrohr-Heizkreise mittels Durchflussbegrenzung oder Durchflussregelung und Rücklauftemperaturebegrenzung
- Ermittlung der notwendigen Pumpenförderhöhe und des Gesamtdurchflusses
- Erstellung der Heizkreis-Umwälzpumpe(n)
- Freiliegende Rohre sind zu dämmen (Förderfähigkeit der jeweiligen Programme prüfen)
- Hinweis: der Wechsel auf ein Zweirohrsystem mit Heizkörpern wird empfohlen und ist förderfähig

Nachzuweisende Leistungen bei Fußbodenheizung:

- Die einzelnen Heizkreise müssen mit voreinstellbaren Abgleicharmaturen, Durchflussmengenmessern oder Durchflussreglern /-begrenzern versehen sein.
- Grundsätzlich ist nach Verfahren A oder B vorzugehen.

Zusätzlich zum beschriebenen Vorgehen sind bei dem VdZ technische Regelwerke für die Durchführung des hydraulischen Abgleiches bei Nichtwohngebäuden und Effizienzhäusern (Neubau) verfügbar. Sie reihen sich in die Systematik der Tab. 6 ein.

Anhang B - Aktuelle Statistik zum durchgeführten hydraulischen Abgleich

Im Rahmen einer statistischen Erhebung des Internetportals www.energiesparclub.de sowie der [co2online gGmbH](http://co2online.gGmbH) wurden 23.000 Gebäude hinsichtlich des hydraulischen Abgleiches analysiert. In Tabelle 17 sind der Anteil der Gebäude mit hydraulischen Abgleich nach Bundesländern dargestellt. Mit der Anzahl der Wohngebäude je Bundesland nach Destatis [39] wurde der Anteil an Wohngebäuden mit hydraulischem Abgleich für Deutschland gesamt ermittelt.

Tabelle 17 Anteil der Gebäude mit hydraulischen Abgleich in Prozent

Bundesland	Anteil der Gebäude mit hydraulischen Abgleich	Anzahl Wohngebäude gesamt	Anzahl Wohngebäude mit hydraulischem Abgleich
Sachsen	24,3%	822.586	199.888
Brandenburg	20,7%	665.899	137.841
Thüringen	19,0%	528.318	100.380
Mecklenburg-Vorpommern	18,6%	392.676	73.038
Sachsen-Anhalt	18,5%	574.780	106.334
Berlin	16,0%	324.681	51.949
Rheinland-Pfalz	15,6%	1.181.157	184.260
Baden-Württemberg	15,3%	2.414.446	369.410
Bayern	15,3%	3.040.234	465.156
Hessen	15,2%	1.387.704	210.931
Hamburg	15,1%	250.872	37.882
Saarland	15,0%	304.717	45.708
Nordrhein-Westfalen	13,6%	3.868.712	526.145
Schleswig-Holstein	12,4%	815.222	101.088
Niedersachsen	12,1%	2.236.433	270.608
Bremen	11,8%	139.544	16.466
Anteil Wohngebäude in Deutschland mit hydraulischem Abgleich (gerundet)		18.947.981	2.897.085
		15 %	

Anhand dieser Statistik lässt sich zum einen zeigen, dass es im gesamten Bundesgebiet noch ein erhebliches Potenzial mit Gebäuden gibt, wo ein hydraulischer Abgleich durchgeführt werden kann. Weiterhin ist erkennbar, dass die neuen Bundesländer aufgrund der vielen Neubauten nach der Wende einen höheren Anteil an Gebäuden mit einem durchgeführten hydraulischen Abgleich aufweisen.