

Einfluss von Rohrleitungen auf die Veränderung propagierender Temperaturprofile

Florian Ruesch, Elimar Frank

SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil, Schweiz

Tel: +41 55 222 48 31, Fax: +41 55 222 48 44

E-Mail: florian.ruesch@solarenergy.ch

Internet: solarenergy.ch

1. Einleitung

Die Bereitstellung von Trinkwarmwasser mit Hilfe von Frischwassermodulen (FWM), die meist aus einem Plattenwärmeübertrager und der dazugehörigen Primärpumpe und deren Regelung bestehen, hat in den letzten Jahren stark an Marktpräsenz zugenommen. Dabei werden oft hygienische Vorteile gegenüber der Bevorratung von warmem Trinkwasser hervorgehoben. Bei umfangreichen Tests an handelsüblichen Frischwassermodulen am SPF hat sich gezeigt, dass Betriebsbedingungen mit grösseren Temperaturschwankungen des Trinkwarmwassers am Modulausgang auftreten können (vgl. [1] [2]). Als kritisch wurden sehr kleine Durchflüsse und Leistungswechsel bei hohen Primärvorlauftemperaturen identifiziert.

Weitgehend unklar ist jedoch, wie stark sich Schwankungen, welche direkt am Modulausgang detektiert werden, auf den Komfort an der Zapfstelle auswirken. Besonders entscheidend hierbei ist der dämpfende Einfluss der Rohrleitung zwischen Frischwassermodul und Zapfstelle. Es konnten zu diesem Thema keine vorgängigen Untersuchungen gefunden werden, die es erlauben, diesen Einfluss verlässlich zu quantifizieren. Will man eine praxisrelevante und somit auch aussagekräftige Beurteilung von Temperaturschwankungen bei Frischwassermodulen vornehmen, muss jedoch geklärt werden, wie stark der Einfluss unterschiedlicher Rohrleitungen und Längen ist.

Am SPF wurden dazu theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es wurde ein detailliertes Simulationsmodell für die Rohrleitung in der Umgebung TRNSYS erweitert. Dieses Modell wurde durch genaue Messungen an unterschiedlichen Rohrleitungen (Material, Durchmesser und Leitungslänge) validiert. Damit konnten anschliessend umfangreiche Parametervariationen anhand von simulierten Daten durchgeführt werden.

Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen wird eine Methode vorgeschlagen, welche das Klassifizieren von Temperaturschwankungen in fünf Komfortkategorien erlaubt. Diese können im Rahmen einer geeigneten Testprozedur zur Beurteilung des Komforts von Frischwassermodulen und anderen zentralen Durchlauferhitzern dienen.

2. Vorgehen

Für die Simulationen wurde ein Rohrmodell auf Basis des TRNSYS Type 604 aus der TESS Hydraulics Library [3] erstellt. Dieses detaillierte Mehrknotenmodell erlaubt das Berechnen der Wärmeübergänge zwischen den unterschiedlichen Medien (Fluid, Rohrmantelmaterial, Isolationsmaterial und Umgebungsluft) sowie die Wärmeleitung innerhalb der einzelnen Medien. Dabei kann das Rohr in eine Vielzahl von Segmenten unterteilt werden. Das Modell wurde modifiziert, um den Einfluss unterschiedlicher Materialien und deren Oberflächenrauheit genauer differenzieren zu können. Die Berechnung der Nusselt-Zahl (Nu) für die Bestimmung des Wärmeübergangs an der Rohrinne-Seite anhand der Reynolds-Zahl (Re) und der Prandtl-Zahl (Pr) wurde mit folgenden Formeln aus ([4], S. 442 ff) ergänzt:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \text{mit } f \text{ aus:}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} \right)^{1.11} \right)$$

Dabei wird neu die Rauheit der Rohroberfläche ε (Einheit: Meter) als zusätzlicher Parameter eingegeben, D beschreibt den Rohrinne-Durchmesser (Einheit: Meter).

Die für ε verwendeten Werte betragen: $1.5 \cdot 10^{-5}$ m für Kupfer und $0.7 \cdot 10^{-5}$ m für Polyethylen. Zur Validierung des erweiterten Simulationsmodells wurden Messungen mit drei unterschiedlichen Rohrleitungen (mit und ohne Isolation) durchgeführt.

- Polyethylen temperaturbeständig (PEX 16 x 2.2 mm)
- Kupferleitung (Cu 15 x 1 mm)
- Kupferleitung (Cu 22 x 1 mm)

Dabei wurden die Temperaturen jeweils am Eintritt und nach 1,2,3 und 5m Rohrlänge gemessen. Unterschiedliche Temperaturschwankungen (kontinuierliche sinusförmige Schwingungen und einzelne Spitzen) wurden bei unterschiedlichen Volumenströmen gemessen. Zusätzlich variiert wurden auch die Amplitude (bis 50 K) und die Dauer (ab 5s) der Temperaturschwankung.

Die Versuchsanordnung wurde parallel mit dem oben beschriebenen Simulationsmodell in TRNSYS (Version 16.1) nachgebildet, wobei die physikalischen Materialeigenschaften der Rohre vorgegeben wurden. Als Input für das Simulationsmodell wurde die gemessene Temperatur nach 1m Leitung verwendet, um die Propagation der Temperaturschwankungen für die weiteren Messstellen zu prognostizieren. Dabei wurde eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Werte festgestellt (Beispiel in Abbildung 1). Somit konnte das Berechnungsmodell für die getesteten Leitungen und Temperaturschwankungen validiert werden.

Weitere umfangreiche und systematische Parametervariationen wurden numerisch mit Hilfe des validierten Modelles durchgeführt. Bei einer durchschnittlichen Warmwassertemperatur von 45°C (am Modulausgang resp. Rohreingang) wurden unterschiedliche Temperaturschwankungen mit variabler Amplitude und Frequenz bei unterschiedlichen Volumenströmen betrachtet. Der dämpfende Einfluss von unterschiedlichen Rohrleitungen (mit und ohne Isolation) auf diese Temperaturschwankungen wurde mit dem oben beschriebenen numerischen Modell berechnet.

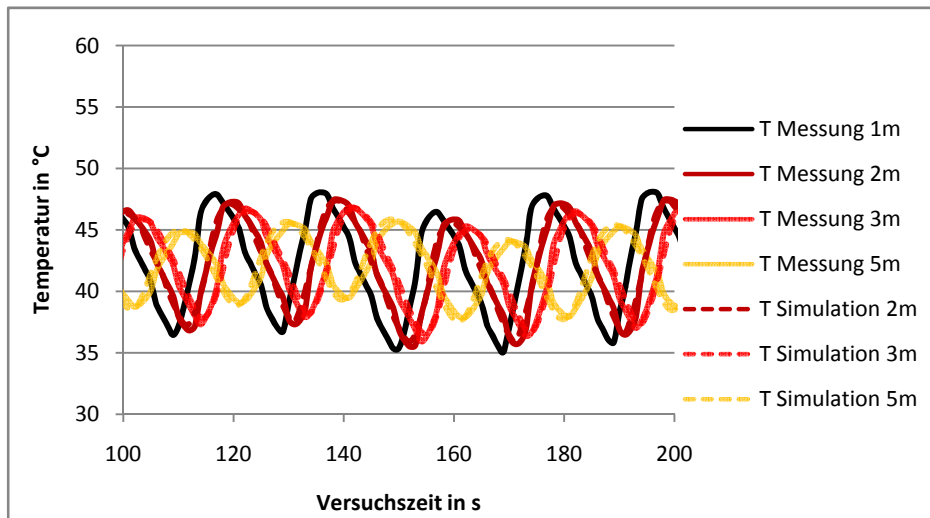


Abbildung 1 Der dämpfende Einfluss einer PE 16 x 2.2 mm Rohrleitung wird durch gemessene und simulierte Werte nach 1,2,3 und 5m Rohrleitung aufgezeigt, welche eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Der Volumenstrom betrug 3 l/min.

Rohrleitung

Es wurden Kupferrohre mit 12 x 1 mm, 15 x 1 mm und 22 x 1 mm und PEX-Rohre mit 12 x 1.8 mm, 16 x 2.2 mm und 25 x 3.5 mm Durchmesser implementiert und die Dämpfungsfaktoren (relatives Verhältnis zur Amplituden am Rohreintritt) nach 1, 2, 3, 5, 10, 20 und 30 m Rohrleitung ermittelt. Die Auswahl der verwendeten Rohre entsprechen den Empfehlungen des SVGW für Volumenströme von ca. 12..55 l/min [5]. Der Einfluss der Rohrisolierung und der Wärmeverluste an die Umgebung generell konnte als sehr gering identifiziert werden (siehe Abschnitt Amplitude). Nach einigen Vergleichen mit und ohne Isolation konnte für die weiteren Simulationen auf eine Isolation verzichtet werden.

Art der Schwankung

Es wurden zwei Formen von Temperaturschwankungen untersucht: Sinusschwingungen mit variabler Periode und Überschwingen in der Form einer ‚Glockenkurve‘ mit variabler Dauer (full width at half maximum; FWHM). Dabei entspricht die FWHM eines Überschwingers der halben Periode einer kontinuierlichen Schwingung. Anhand der Simulationsergebnisse wurde jedoch festgestellt, dass Sinusschwingungen stärker gedämpft werden als reine Überschwinger, bei denen die FWHM einer halben Periode entspricht.

Amplitude

Als Amplitude einer Temperaturschwankung ΔT wird die Differenz zwischen den niedrigsten und höchsten Warmwassertemperaturen bezeichnet. Es wurden Amplituden im Bereich von 2..20 °C simuliert. Dabei wurde festgestellt, dass die Amplitude einer Schwingung einen sehr geringen Einfluss auf ihre Dämpfung (relative Veränderung zwischen Rohrein- und austritt) hat. Einzig sehr hohe und langanhaltende Überschwinger werden durch zusätzliche Wärmeverluste etwas stärker gedämpft als gleichlange Überschwinger mit einer kleineren Amplitude. Für das Komfortbefinden sind aber hauptsächlich Schwankungen im Bereich von wenigen Kelvin relevant, da grössere Schwankungen in jedem Falle als unangenehm empfunden werden und zu einer manuellen Nachregelung führen. Für Amplituden im relevanten Bereich von wenigen Kelvin kann der Einfluss der zusätzlichen Wärmeverluste vernachlässigt werden. Somit kann auf eine weitere Variation der Amplitude verzichtet werden. Für

alle weiteren Simulationen wurden Temperaturschwankungen mit einer Amplitude von 5 °C verwendet.

Volumenstrom

Der Volumenstrom spielt in zweierlei Hinsicht eine entscheidende Rolle bei der Dämpfung von Temperaturschwankungen. Zum einen hängt der Wärmeübergang vom Fluid zum Rohr entscheidend von der Fließgeschwindigkeit (und somit indirekt auch vom Volumenstrom) ab. Bei turbulentem Durchgang ist der Wärmeübergang besser, und somit werden Schwankungen stärker gedämpft. Zum anderen hängt die Fließgeschwindigkeit auch direkt mit der Verweildauer des Fluids im Rohr zusammen. Bei einer kürzeren Verweildauer des Fluids im Rohr verkleinert sich der Einfluss der Wärmeleitung innerhalb des Fluides und vom Fluid zum Rohr, was zu einer geringeren Dämpfung von Temperaturschwankungen führt. Eine Erhöhung des Volumenstroms führt also zu zwei Effekten mit entgegengesetzter Auswirkung. Der genaue Einfluss dieser Größe wurde daher für einen Bereich von 1..20 l/min anhand von Simulationen genauer quantifiziert (siehe Abschnitt 3. Klassifizierung).

Dauer

Hochfrequente Temperaturschwankungen und kurze Peaks mit einer Dauer von wenigen Sekunden werden schon durch eine kurze Rohrleitung stark abgedämpft und wirken sich daher in der Praxis nur in geringem Masse auf den Komfort an der Zapfstelle aus. Langsame Temperaturveränderungen werden hingegen nur sehr schwach durch das Leitungsnetz beeinträchtigt. Die Quantifizierung des genauen Einflusses wurde auch hier anhand von Parametervariationen durchgeführt. Es wurden Sinusschwankungen mit einer Periodendauer von 4..60 s und Überschwinger mit einer FWHM von 2..30 s simuliert und die Resultate zur Klassifizierung von unterschiedlichen Temperaturschwankungen ausgewertet.

3. Klassifizierung

In VDI 6003 [6] werden Kriterien zur Klassifizierung von Temperaturänderungen, welche sich auf die Wassertemperatur an der Zapfstelle beziehen und auch in der DIN EN 13203-1 [7] werden Komfortklassen angegeben. In Anlehnung an diese beiden Quellen wird vorgeschlagen, Temperaturschwankungen in vier Klassen einzuteilen (siehe

Tabelle 1). Dabei wird eine Leitung von 5 m PEX 16 x 2.2 mm als ‚minimale Anschlussleitung‘ angenommen und vorausgesetzt, dass in jedem Fall äquivalente schwingungsdämpfende Elemente bis zur ersten Zapfstelle eingesetzt werden. Als Normalfall wird aber eine Leitung von mindestens 10 m CU 22 x 1 mm angenommen.

Tabelle 1 Klassifizierung von Temperaturschwankungen in Anlehnung an VDI 6003 und DIN EN 13203-1

Auswirkung, Bezeichnung	Leitung	Kriterium
keine störenden Schwankungen	5 m PEX 16 x 2.2 mm	$\Delta T < 2 \text{ °C}$
im Normalfall keine störenden Schwankungen	10 m CU 22 x 1 mm	$\Delta T < 2 \text{ °C}$
störende Schwankungen	10 m CU 22 x 1 mm	$\Delta T < 5 \text{ °C}$
starke Schwankungen	10 m CU 22 x 1 mm	$\Delta T \geq 5 \text{ °C}$

In der Realität auftretende Temperaturschwankungen können selten als reine Überschwinger oder periodische Schwingungen identifiziert werden, da meistens eine Mischform zu beobachten ist. Es wird vorgeschlagen alle Temperaturschwankungen als Über- oder Unterschwinger zu betrachten, da diese weniger stark gedämpft werden. Somit wird verhindert, dass Überschwinger als harmlos eingestuft werden, obwohl sie in der Realität zu Komforteinbußen führen können. Dabei wird aber in Kauf genommen, dass Temperaturschwankungen, welche eher einer kontinuierlichen Schwingung entsprechen, in der Realität noch stärker gedämpft werden als für die Beurteilung angenommen. Eine gemessene Temperaturschwankung (mit gegebener Amplitude, Dauer und Volumenstrom) kann anhand von Tabelle 2 und den Tabellen im Anhang (nur elektronische Version) einer Komfortklasse zugeordnet werden. Temperaturschwankungen werden einerseits durch das Passieren von Rohrleitungen oder anderen Armaturen abgedämpft, andererseits werden sie aber auch an der Zapfstelle (durch die Beimischung von Kaltwasser mit konstanter Temperatur) vermindert. Diese Verminderung ist vom Anteil an Kaltwasser und somit von der Temperatur des Warmwassers abhängig. Auftretende Temperaturschwankungen können zur praxisrelevanten Beurteilung also um den Anteil an Kaltwasser vermindert werden. In Anlehnung an die VDI 6003 [6] wird vorgeschlagen, diesen Anteil unter der Annahme einer Kaltwassertemperatur von 10 °C und einer Verbrauchstemperatur von 42 °C (für eine Duschzapfung) zu berechnen. Für eine realistische Beurteilung anhand der Tabellen (Tabelle 2 und Anhang) muss also die somit berechnete und bereits reduzierte Amplitude ΔT_R verwendet werden.

Tabelle 2 Klassifizierung von Temperaturschwankungen am Austritt eines FWM für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude ΔT_R muss unter dem angegebenen Wert in Kelvin liegen, so dass ‚keine störenden Schwankungen‘ zu erwarten sind. Die Tabellen für die anderen Komfortklassen werden im Anhang der elektronischen Version gegeben.

Dauer in s	Volumenstrom in l/min														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
2	8.4	5.6	4.3	3.9	3.6	3.4	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5
4	4.8	3.7	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
6	3.9	3.1	2.7	2.6	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1
8	3.5	2.9	2.6	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
10	3.2	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
15	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
20	2.9	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
25	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
30	2.7	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Bedingungen ausgearbeitet, welche bei einer minimalen Anschlussleitung oder einer typischen Anschlussleitung eine Einschätzung der zu erwartenden Tem-

peraturschwankungen an der Zapfstelle zulassen. Diese Bedingungen sind sowohl von der Amplitude also auch von der Dauer einer Temperaturschwankung und des Zapfvolumenstromes abhängig. Rasche Temperaturschwankungen mit einer Dauer von wenigen Sekunden werden selbst von kurzen Rohrleitungen stark gedämpft und beeinträchtigen den Komfort somit nur wenig. Anhand von Tabellen kann die Einteilung von konkret gemessenen Temperaturschwankungen in unterschiedliche Komfortklassen vorgenommen werden.

Die Erkenntnisse aus dieser Studie sind grundsätzlich auf alle Trinkwassererwärmer übertragbar, bei denen Temperaturschwankungen auftreten können (z.B. Gastherme). Sie bieten eine Grundlage, um die Praxisrelevanz von Temperaturschwankungen, welche am Geräteausgang auftreten, besser abschätzen und beurteilen zu können.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird derzeit am SPF eine Testprozedur für Frischwassermodule entwickelt bei welcher die beschriebene Einteilung in Komfortklassen verwendet wird. Dabei wird eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Produkten getestet und miteinander verglichen.

Literatur

- [1] F. Ruesch und E. Frank, "Entwicklung einer Testprozedur zum systematischen Vergleich von Frischwassermodulen," präsentiert an OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland, 2010.
- [2] F. Ruesch und E. Frank, "Development of a Test Procedure for External Domestic Hot Water Modules," presented at the EuroSun International conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Austria, 2010.
- [3] "TESS Component Libraries - General Descriptions," *Transsolar*. [Online]. Verfügbar: <http://www.transsolar.com>. [22-Feb-2011].
- [4] Y. A. çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2. Aufl. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] R. Bernasconi u. a., "SVGW W3 - Leitsätze für die Erstellung von Trinkwasserinstallationen," Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, 2000.
- [6] VDI - Verein Deutscher Ingenieure, "VDI 6003 - Trinkwassererwärmungsanlagen Komfortkriterien und Anforderungsstufen für Planung, Bewertung und Einsatz," Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [7] DIN - Normenausschuss NAGas, FNH und NHRS, "DIN EN 13203-1- Gasbeheizte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch - Geräte, die eine Nennwärmebelastung von 70 kW und eine Speicherkapazität von 300 Liter Wasser nicht überschreiten - Teil 1," Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden mit einer Finanzierung des Bundesamts für Energie (BFE) durchgeführt. Wir danken ebenfalls den an den Messreihen beteiligten Herstellern.

Annex – Tabellen zur Klassifizierung

Tabelle 3 Klassifizierung von Temperaturschwankungen für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude ΔT_R muss unter dem angegebenen Wert in Kelvin liegen, so dass ‚keine störenden Schwankungen‘ zu erwarten sind.

Dauer der Schwankung in s	Volumenstrom in l/min																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	8.4	5.6	4.3	3.9	3.6	3.4	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5
3	5.9	4.3	3.6	3.2	3.0	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
4	4.8	3.7	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
5	4.2	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1
6	3.9	3.1	2.7	2.6	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
7	3.6	3.0	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
8	3.5	2.9	2.6	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
9	3.3	2.8	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
10	3.2	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
11	3.2	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
12	3.1	2.7	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
13	3.1	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
14	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
15	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
16	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
17	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
18	2.9	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
19	2.9	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
20	2.9	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
21	2.8	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
22	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
23	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
24	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
25	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
26	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
27	2.8	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
28	2.7	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0
29	2.7	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0
30	2.7	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0

Tabelle 4 Klassifizierung von Temperaturschwankungen für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude ΔT_R muss unter dem angegebenen Wert in Kelvin liegen, so dass ,im Normalfall keine störenden Schwankungen' zu erwarten sind.

Dauer der Schwankung in s	Volumenstrom in l/min																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	33.7	17.1	13.7	11.6	10.2	9.2	8.4	7.7	7.2	6.8	6.4	6.1	5.8	5.6	5.4	5.2	5.0	4.9	4.7	4.6
3	21.6	11.7	9.5	8.1	7.2	6.5	5.9	5.5	5.2	4.9	4.7	4.4	4.3	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5
4	16.4	9.1	7.4	6.4	5.7	5.2	4.8	4.5	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0
5	13.3	7.6	6.3	5.4	4.9	4.4	4.1	3.9	3.7	3.5	3.4	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7
6	11.3	6.6	5.5	4.8	4.3	4.0	3.7	3.5	3.3	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5
7	9.9	5.9	5.0	4.4	3.9	3.6	3.4	3.2	3.1	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4
8	8.9	5.5	4.6	4.0	3.6	3.4	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3
9	8.1	5.1	4.3	3.8	3.4	3.2	3.0	2.9	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
10	7.5	4.8	4.0	3.6	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2
11	7.0	4.5	3.8	3.4	3.1	2.9	2.8	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2
12	6.6	4.3	3.7	3.3	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
13	6.2	4.2	3.5	3.2	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1
14	5.9	4.0	3.4	3.1	2.8	2.7	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1
15	5.7	3.9	3.3	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1
16	5.5	3.8	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
17	5.3	3.7	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
18	5.1	3.6	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
19	4.9	3.5	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
20	4.8	3.4	2.9	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
21	4.7	3.3	2.9	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
22	4.6	3.3	2.8	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
23	4.5	3.2	2.8	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
24	4.4	3.2	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
25	4.3	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
26	4.2	3.1	2.7	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0
27	4.1	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
28	4.0	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
29	4.0	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
30	3.9	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Tabelle 5 Klassifizierung von Temperaturschwankungen für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude ΔT_R muss unter dem angegebenen Wert in Kelvin liegen, so dass zwar ‚störende Schwankungen‘ aber keine ‚starken Schwankungen‘ zu erwarten sind.

Dauer der Schwankung in s	Volumenstrom in l/min																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	84.2	42.8	34.2	29.1	25.6	23.0	21.0	19.4	18.1	17.0	16.0	15.3	14.6	14.0	13.4	13.0	12.5	12.2	11.8	11.5
3	54.1	29.3	23.7	20.3	17.9	16.2	14.9	13.8	13.0	12.2	11.6	11.1	10.7	10.3	9.9	9.6	9.4	9.1	8.9	8.7
4	41.0	22.8	18.6	16.1	14.3	13.0	12.0	11.2	10.5	10.0	9.6	9.2	8.9	8.6	8.3	8.1	7.9	7.7	7.6	7.5
5	33.3	19.0	15.7	13.6	12.2	11.1	10.3	9.7	9.2	8.7	8.4	8.1	7.8	7.6	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9	6.7
6	28.3	16.6	13.8	12.0	10.8	9.9	9.2	8.7	8.3	7.9	7.6	7.4	7.2	7.0	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3
7	24.8	14.9	12.4	10.9	9.8	9.1	8.5	8.0	7.7	7.4	7.1	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0
8	22.2	13.6	11.5	10.1	9.1	8.4	7.9	7.5	7.2	7.0	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.9	5.8
9	20.3	12.7	10.7	9.4	8.6	8.0	7.5	7.1	6.9	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7
10	18.7	11.9	10.1	8.9	8.1	7.6	7.2	6.9	6.6	6.4	6.3	6.1	6.0	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6
11	17.5	11.3	9.6	8.5	7.8	7.3	6.9	6.6	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6	5.5	5.5
12	16.4	10.8	9.2	8.2	7.5	7.0	6.7	6.4	6.2	6.1	5.9	5.8	5.8	5.7	5.6	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4
13	15.6	10.4	8.9	7.9	7.3	6.8	6.5	6.3	6.1	5.9	5.8	5.7	5.7	5.6	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4
14	14.8	10.0	8.5	7.6	7.0	6.6	6.4	6.1	6.0	5.8	5.7	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3
15	14.2	9.7	8.3	7.4	6.9	6.5	6.2	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3
16	13.7	9.4	8.1	7.2	6.7	6.4	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2
17	13.2	9.2	7.8	7.1	6.6	6.2	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2
18	12.8	8.9	7.7	6.9	6.5	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2
19	12.4	8.7	7.5	6.8	6.3	6.1	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2
20	12.0	8.5	7.4	6.7	6.3	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
21	11.7	8.4	7.2	6.6	6.2	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
22	11.4	8.2	7.1	6.5	6.1	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1
23	11.2	8.1	7.0	6.4	6.0	5.8	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1
24	10.9	7.9	6.9	6.3	6.0	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1
25	10.7	7.8	6.8	6.2	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1
26	10.5	7.7	6.7	6.2	5.9	5.7	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
27	10.3	7.6	6.6	6.1	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
28	10.1	7.5	6.5	6.0	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
29	9.9	7.4	6.5	6.0	5.7	5.6	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
30	9.8	7.3	6.4	6.0	5.7	5.5	5.4	5.4	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1