



Untersuchung zu Methoden der technischen Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen auf Basis von Ganglinien

Sebastian Thi Sauerwein

Juni 2013

Abstract

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Methoden der Zustandsanalyse von Fernwärmeleitungen auf Basis von Temperaturganglinien. Hinsichtlich der deutschen Energiewende und dem geplanten höheren Anteil erneuerbarer Energieträger an der Strom- und Wärmeversorgung könnten Fernwärmenetze einer stärkeren Belastung ausgesetzt sein. Auswertungen von Lastganglinien sollen zeigen, ob die aktuellen Regelwerke der Fernwärme und die Methoden zur Gebrauchsdauerermittlung den erwarteten Veränderungen gerecht werden. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Auslegung und Bewertung der Gebrauchsdauer von Fernwärmeleitungen anhand von gleichwertigen Volllastwechseln. Dazu wurden Messwerte von realen Fernwärmeleitungen ausgewertet.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Auslegung nach Volllastwechseln zu einer großen Sicherheit gegen Ermüdung führt. Die Möglichkeit neue Werkstoffkenntnisse und abweichende Betriebsparameter treffsicher zu berücksichtigen entfällt. Daraus resultieren Unsicherheiten bei der Gebrauchsdauerermittlung einer Leitung, was im Widerspruch an die Forderung nach einer wirtschaftlichen Auslegung steht. Durch einen genaueren Ermüdungsnachweis sowie einer Berechnung mit Standardkollektiven kann die Anpassung an zukünftige Rahmenbedingungen erleichtert werden. Hierzu ist jedoch weitere Forschungsarbeit erforderlich. Als Grundlage für Standardkollektive wurden aus den Temperaturkollektiven Näherungskurven ermittelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	Schwingfestigkeit	3
2.2	Wöhlerversuch	4
2.3	Betriebsfestigkeit	7
2.4	Ermüdungsfestigkeit von Fernwärmeleitungen	14
3	Untersuchung von Betriebskollektiven	18
3.1	Messwerte NRM	18
3.1.1	Untersuchung der Messwerte	19
3.1.2	Messfrequenz	21
3.1.3	Volllastwechsel	22
3.2	Messwerte München	24
3.2.1	Untersuchung der Messwerte	27
3.2.2	Volllastwechsel	29
3.3	Temperaturkollektive	30
4	Auslegung nach Volllastwechseln	34
4.1	Parameter der Volllastwechselberechnung	34
4.2	Wöhlerkurven	35
4.3	Vergleich der Kurven	40
5	Analyse der Ergebnisse	41
5.1	Näherungskollektive	42
5.2	Volllastwechsel	43
6	Rainflow-Algorithmus	46
7	Fazit und Ausblick	48
	Literaturverzeichnis	50

1 Einleitung und Problemstellung

Die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes erfordern den Ausbau von erneuerbaren Energieträgern zur Deckung des Energiebedarfs [20, 11]. Hierbei stehen verschiedene Systeme zur Verfügung, unter anderem Erdwärme, unterteilt in Erdkollektoren, Tiefengeothermie und Luft-Wasser Wärmepumpen, Solarthermie, Photovoltaik, Windkraft und Biomasse in Form von Pellets, Biokraftstoffen und Biogas.

Die Frage, welches System die beste Lösung darstellt, lässt sich jedoch nicht eindeutig beantworten. Keines der Systeme reicht für sich genommen aus, um die Energieversorgung in Deutschland zu sichern. Die Verfügbarkeit von Biomasse ist begrenzt, wohingegen biogene Brennstoffe besser speicherbar sind als Strom. Energie aus Sonne und Wind unterliegt großen Schwankungen und benötigt deshalb entsprechende Speicher und Ausgleichskapazitäten. Zur Deckung des Raumwärmebedarfs stellen Wärmenetze eine Lösung dar, um die Nachfrage an eine dezentrale Energieerzeugung mit zentralen Speichersystemen bei starken Schwankungen von Angebot und Nachfrage effizient zu erfüllen [7]. Die solarthermische Einspeisung gerät hierbei vermehrt ins Interesse der Erzeuger, da Solarkollektoren einen großen Beitrag zur CO₂-Vermeidung leisten können.

Bedeutung für die Fernwärme

In Wärmenetzen wird ein Wärmeträgermedium von Wärmeerzeugungsanlagen zu Verbrauchern transportiert. An der Verbraucherstation wird mittels eines Wärmetauschers Brauchwasser erhitzt oder das Wärmedium direkt verwendet. In der Fernwärme kommt meistens enthärtetes Wasser, welches je nach Betriebsweise und Leitungsbeschaffenheit noch mit Zusatzstoffen versehen wird, zum Einsatz [2].

Das Fernwärmemedium ist ständigen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Eine Temperaturerhöhung des Wärmeträgers hat Dehnungen und Verschiebungen der Leitung zur Folge und die daraus resultierende Interaktion des Rohres mit dem Baugrund verursacht hohe Spannungen im Werkstoff. Wiederholte Temperaturschwankungen führen zu zyklischen Verschiebungen des Rohres, wodurch es zum lokalen Versagen des Werkstoffs kommen kann. Das zyklische Langzeitverhalten von erdverlegten Leitungen und dem umliegenden Baugrund hat entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer des Netzes und bedarf daher besonderer Betrachtung. Dabei spielt die Temperaturhistorie einer Leitung eine entscheidende Rolle.

Die Auslegung gegen Versagen der Leitung durch zyklische Verschiebungen erfolgt im Bereich der Fernwärme anhand der Anzahl ertragbarer gleichwertiger Volllastwechsel. Als Volllastwechsel wird hierbei ein Temperaturwechsel mit der höchsten erwarteten Temperaturdifferenz bezeichnet. Wegen der für Fernwärmeleitungen typischen Anzahl von

1 Einleitung und Problemstellung

Lastwechseln spricht man von niederzyklischer Ermüdung. Die absolute Zahl unterliegt je nach Leitungstyp und den verwendeten Berechnungsparametern großen Schwankungen.

Im Rahmen der Energiewende wird durch den Ausbau von erneuerbaren Energieträgern mit vermehrten Temperaturwechseln im Fernwärmenetz gerechnet [21]. Solarkollektorfelder, welche schon heute zur Fernwärmeversorgung von Wohngebieten eingesetzt werden, unterliegen besonderen Betriebsbedingungen. Die Solarkollektoren sind einem täglichen Wechsel von Betriebstemperatur auf Umgebungstemperatur ausgesetzt. Während des Tages heizt sich der Kollektor durch die Sonneneinstrahlung auf, wohingegen er nachts, wenn die Temperaturen fallen, auskühlt. Auf eine Lebenszeit von 30 Jahren gerechnet ergibt das 10950 solcher Zyklen. Die Rohrleitungen der Kollektoren unterliegen zu einem gewissen Grad den gleichen Schwankungen und könnten somit einer erheblichen Mehrbelastung im Vergleich zu den Vorgaben aus [6] ausgesetzt sein.

Auch im Bereich der Hausanschlüsse ist mit einem Anstieg der Temperaturvariationen zu rechnen. In Deutschland zeigt sich ein Trend zu immer größeren Wohnungen. Die durchschnittliche Wohnfläche pro Person lag im Jahr 2000 bei $39,5 \text{ m}^2$. Bis zum Jahr 2009 stieg diese auf $42,5 \text{ m}^2$ an [19]. Der steigenden Quadratmeterzahl je Einwohner, steht die Energieeinsparverordnung (EnEV) mit der Anforderung an den Energiebedarf von Neubauten sowie das Ziel der Bundesregierung zur Steigerung der energetischen Sanierungsrate im Gebäudebestand gegenüber. Der Trend zu mehr Wohnfläche, bei sinkendem, unregelmäßigeren Wärmebedarf, kann im Bereich der Hausanschlüsse zu stark belasteten Leitungen führen, da es zum regelmäßigen Auskühlen der Hausanschlussleitung (HAL) kommt.

Diese neuen Rahmenbedingungen machen es erforderlich, die bisherigen Regelwerke und Methoden zur technischen Zustandsanalyse und Gebrauchsdauerberechnung von Fernwärmenetzen genauer zu betrachten, um zu überprüfen, ob diese den neuen Anforderungen im Wärmemarkt gerecht werden. Insbesondere die Auslegung nach gleichwertigen Vollastwechseln und deren Ermittlung soll untersucht werden.

2 Stand des Wissens

Temperaturschwankungen des Fernwärmemediums sind unvermeidlich. Insbesondere im Rücklauf der Kundenanschlüsse kommt es zu einer hohen Anzahl an Temperaturschwankungen, welche durch unregelmäßigen Wärmebedarf, insbesondere bei Durchflusswärmetauschern oder schlecht ausgelegter Technik verursacht werden.

Die genaue Kenntnis über die Belastung einer Fernwärmeleitung durch Temperaturschwankungen ist notwendig, um diese entsprechend den Anforderungen an eine ausreichende Ausfallsicherheit gegen Ermüdung auszulegen sowie Wartungs-, Instandhaltungs- und Sanierungsarbeiten effizient planen zu können.

Die Gebrauchsdauerberechnung von Bauteilen ist ein komplexes Thema, welches von vielen Parametern abhängig ist. Nachfolgend soll ein Überblick über das Gebiet der Ermüdungsfestigkeit gegeben und die Anwendung im Fall der Fernwärme dargestellt werden.

2.1 Schwingfestigkeit

Unter zeitlich veränderlicher, häufig wiederholter Belastung kann es zum Ausfall eines Bauteils kommen. Für dieses, als Werkstoffermüdung bezeichnetes Phänomen sind Belastungen unterhalb der statischen Festigkeit ausreichend. Die Kenntnis des Ermüdungsverhaltens eines Bauteils unter Betriebsbelastung ist elementar, um dieses Kosten- und Ressourceneffizient zu gestalten oder Schäden und Betriebsausfällen durch Bauteilversagen vorzubeugen. Grundlage der Betriebsfestigkeit ist die Schwing- oder auch Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils. Als Schwingfestigkeit wird das Versagens- und Verformungsverhalten von Bauteilen unter zyklischer Belastung bezeichnet.

Ein Schwingenspiel im Sinne der Ermüdungsfestigkeit ist eine zeitliche, periodische Veränderung eines Belastungsvorgangs. Dies kann durch Einwirkung von äußeren und inneren Kräften auftreten. In Abbildung 2.1 ist ein Schwingenspiel mit den beschreibenden Werten dargestellt.

Die Spannungsamplitude σ_a ist der Ausschlag der Schwingung ausgehend von der Mittelspannung σ_m . Die Lebensdauer eines Bauteils wird von der Höhe der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ sowie dem Mittelspannungsverhältnis R , gemäß Gleichung 2.4, von der Oberspannung σ_o zur Unterspannung σ_u beeinflusst.

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o - \sigma_u) \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o + \sigma_u) \quad (2.2)$$

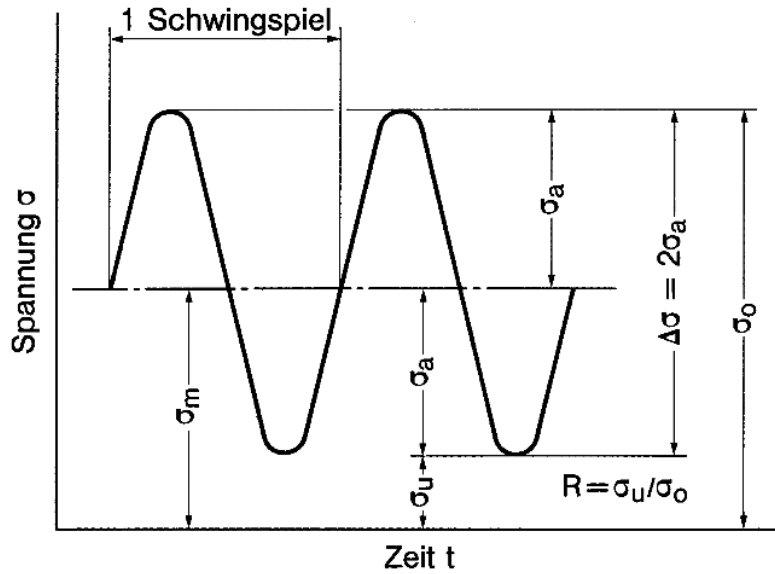


Abbildung 2.1: Kennwerte eines Schwingenspiels [15]

$$\Delta\sigma = \sigma_m + \sigma_a = 2 \cdot \sigma_a \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (2.4)$$

Durch das Spannungsverhältnis werden verschiedene Arten der Belastung unterschieden. Diese sind wie folgt aufgegliedert:

1. Zugschwellbelastung mit $0 < R < 1$
2. Wechselbelastung $-\infty < R < -1$
3. Druckschwellbelastung $1 \leq R < \infty$

Das Spannungsverhältnis wirkt sich direkt auf die Lebensdauer eines Bauteils aus. Im Vergleich zu wechselnd belasteten Bauteilen haben zugschwellbelastete eine niedrigere und druckschwellbelastete eine höhere Lebensdauer [15, 8]. Dieser Effekt ist werkstoffabhängig und wird als Mittellastempfindlichkeit bezeichnet. Eine Art der Darstellung ist das Haigh Diagramm. Hierbei wird die Anzahl der ertragbaren Schwingenspiele bei unterschiedlicher Mittelspannung und Amplitude aufgezeichnet. Abbildung 2.2 zeigt ein Dauer- und Zeitfestigkeitsschaubild einer Aluminiumlegierung im Haigh-Diagramm [8].

2.2 Wöhlerversuch

Im Wöhlerversuch, benannt nach seinem Erfinder A. Wöhler, wird eine Gruppe identischer Bauteile auf unterschiedlichen Lasthorizonten bis zum Bruch oder technischen

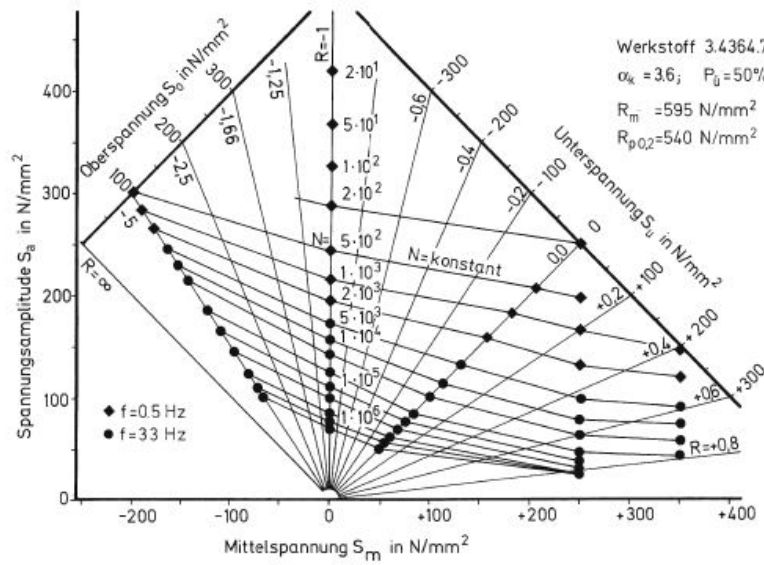


Abbildung 2.2: Dauer- und Zeitfestigkeitsschaubild für Kerbstäbe aus der Aluminium-Knetlegierung 3.4364.7 [8]

Anriss belastet. Die Mittelspannung bleibt dabei unverändert. Als technischer Anriss wird hierbei eine rissartige Werkstofftrennung bezeichnet, welche mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie der Farbeindringprüfung oder einer Ultraschalluntersuchung, feststellbar ist. Weitere Informationen zu zerstörungsfreien Prüfverfahren sind in [6] einsehbar. Der technische Anriss stellt ein wichtiges Ausfallkriterium dar, dessen Anwendung jedoch nicht unproblematisch ist, da sich ein Abbruch des Versuchs bei einer definierten Rissgröße als schwierig darstellt. Radaj [15] gibt als Versagenskriterium im dehnungsgesteuerten Wöhlerversuch eine technisch erfassbare Oberflächenbeschädigung mit einer Tiefe von 0,5 mm und einer Länge von 2 mm an, macht dies aber zugleich abhängig vom angewendeten Prüfverfahren.

Zusätzlich zu dem Problem das Abbruchkriterium einheitlich zu definieren und mit geringen Abweichungen zu messen, führen Unregelmäßigkeiten im Materialgefüge zu einer Streuung der Ergebnisse [18, 15, 8]. Eine statistische Auswertung der Versuche ist daher notwendig, um aussagekräftige Resultate zu erhalten. Aus diesen Gründen stellt die Wöhlerlinie nur eine Vertrauenslinie dar, welche die Ausfalls- (P_a) oder die Überlebenswahrscheinlichkeit (P_u) eines Bauteils bei bekannter Belastung beschreibt. Die Darstellung der Ergebnisse des Wöhlerversuchs erfolgt in einem σ_a -N Diagramm. Dort werden die mit der jeweiligen Spannungsamplitude erreichten Schwingungszahlen (N) bei logarithmischer Skalierung aufgetragen. Aufgrund des typischen Verlaufs der Wöhlerkurven und technischen Anforderungen an Bauteile werden drei Bereiche der Ermüdungsfestigkeit unterschieden: Die Kurzzeit-, die Zeit- und die Dauerfestigkeit. Die Unterscheidung der Bereiche erfolgt anhand der Schwingungszahl.

Die Dauerfestigkeit beschreibt den Spannungsbereich, bei welchem ein Bauteil unend-

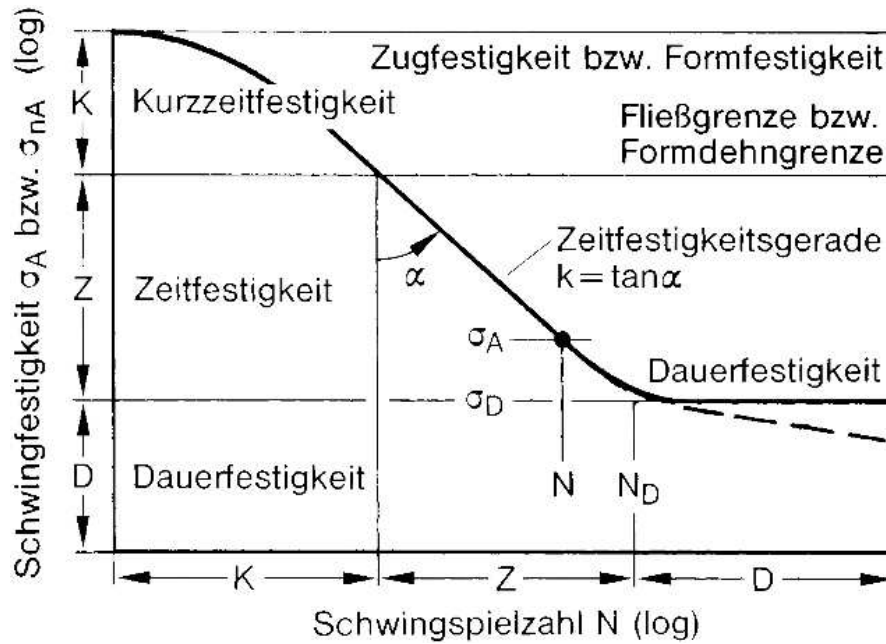


Abbildung 2.3: Kennwerte einer Wöhlerlinie und Abgrenzung der Bereiche nach Haibach

lich viele Schwingungen ohne Bruch übersteht. Dies wird durch das horizontale Auslaufen der Wöhlerlinie im Wöhlerdiagramm dargestellt (siehe Abbildung 2.3). Im Versuchsbetrieb wird die Anzahl der Schwingungen, besonders um die Versuchszeit zu verkürzen, auf eine technisch sinnvolle Anzahl beschränkt z.B. $N_D > 2 \cdot 10^6$. Im Bereich der Dauerfestigkeit herrscht zwischen örtlicher Dehnung und örtlicher Spannung ein weitgehend linearer Zusammenhang. Mit zunehmender Spannung kommt es zu großen Abweichungen zwischen der lineare Beschreibung und den Beobachtungen.

Nicht alle Werkstoffe weisen einen ausgeprägten Dauerfestigkeitsbereich auf. Beispielsweise ist bei legierten Stählen, Aluminium- oder Kupferlegierungen ein Abfall der Schwingfestigkeit über alle Spannungsbereiche zu beobachten [15].

Die Kurzzeitfestigkeit (engl. Low-Cycle-Fatigue LCF) beschreibt den Spannungsbereich, bei dem es im Werkstoff zu großen plastischen Wechselverformungen kommt. Die Schwingspielzahlen der Kurzzeitfestigkeit liegen bei etwa $N_K < 2 \cdot 10^5$. Wöhlerversuche im Kurzzeitfestigkeitsbereich werden in der Regel Dehnungsgesteuert durchgeführt und als Wöhlerlinien der Dehnungsamplituden dargestellt. Hinweise zur Durchführung eines Kurzzeitschwingfestigkeitsversuchs sind in der ASTM-Norm E 606 [5] aufgeführt.

Als Zeitfestigkeitsbereich wird der Bereich zwischen Dauerfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit bezeichnet. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgerade wird durch den Koeffizienten $k = \tan \alpha$ beschrieben (siehe Abbildung 2.3). Dies ermöglicht die Beschreibung einer Wöhlerlinie mit der Angabe weniger Parameter.

Vergleichsspannungen

Wöhlerversuche finden oft an speziellen Probestäben statt, welche nur durch Zug und Druck belastet werden und damit einachsigen Spannungen ausgesetzt sind. In Rohren und andere Bauteilen treten im räumlichen Zustand allerdings mehrachsige Spannungen, unter anderem Normal- und Schubspannungen, auf. Zur Anwendung der Resultate aus dem Wöhlerversuch müssen die mehrachsigen Spannungen auf einachsige Vergleichsspannungen mittels geeigneter Hypothesen umgewandelt werden. In den Regelwerken der Fernwärme wird die Anwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) nach von Mises, oder die Hauptschubspannungshypothese (SSH) nach Tresca empfohlen. Wobei die GEH nach [4] als die genauere gilt, während die SSH die konservativeren Ergebnisse liefert.

2.3 Betriebsfestigkeit

Als betriebsfeste Auslegung wird die Auslegung eines Bauteils für eine definierte Nutzungsdauer bei "ausreichender" Sicherheit bezeichnet. Wie ausreichende Sicherheit definiert ist, hängt vom Kosten- und Gefährdungspotential ab, welches durch das Versagen eines Bauteils auftreten könnte. Zur Ermittlung der Nutzungsdauer ist die Kenntnis über die im Betrieb auftretenden Belastungen, sowohl von der Häufigkeit als auch der Frequenz, sowie weitere die Schwingfestigkeit eines Bauteils beeinflussenden Faktoren notwendig. In der Luftfahrt und der Automobilbranche werden sogenannte Standardkollektive verwendet, um Bauteile betriebsfest auszulegen [9]. Diese Standardkollektive beinhalten übliche Belastungen wie sie im realen Betrieb auftreten. Daraus können im Betriebsfestigkeitsversuch Lebensdauerlinien erstellt werden. Kritik am Betriebsfestigkeitsversuch liegt in der schlechten Verallgemeinerbarkeit von Betriebslasten und der schwierigen Vergleichbarkeit von solchen Versuchen untereinander [15].

Rechnerischer Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Der Nachweis ausreichender Sicherheit eines Bauteils gegen Ermüdung kann auf rechnerischem oder experimentellem Weg erfolgen. Da eine Auslegung mittels Bauteilversuchen eine erhebliche Zeit- und Kostenbelastung darstellt, wurden verschiedene rechnerische Nachweisverfahren entwickelt. Es wird zwischen folgenden Nachweisverfahren unterschieden: Nennspannungs-, Strukturspannungs-, Kerbspannungs-, Kerbdehnungs- und Rissfortschrittskonzept. Auf das Nennspannungs- und das Strukturspannungskonzept soll hier kurz eingegangen werden. Informationen zu den anderen Konzepten sind z.B. in [8, 15] verfügbar.

Beim Nennspannungskonzept werden die Nennspannungen auf der Bauteiloberfläche über dem am höchsten belasteten Querschnitt ermittelt. Die Berechnung der Spannung erfolgt nach linear-elastischer Mechanik. Der Einfluss örtlicher Kerbwirkungen, nichtlinearem elastisch-plastischem Verhalten sowie andere festigkeitsrelevante Einflüsse werden hier in der Wöhlerlinie erfasst. Die aus dem Betrieb auftretenden Belastungen werden dann mit einer Schadensakkumulationstheorie bewertet.

Da bei komplexen Bauteilen und Verbindungen die Festlegung eines Nennquerschnitts nicht immer praktikabel ist, wurde das Strukturspannungskonzept entwickelt. Mithilfe von Messungen mit Dehnmessstreifen oder Finite-Elemente-Simulation wird die Spannung am versagenskritischen Ort des Bauteils ermittelt (hot spot stress). Dieses Verfahren wird besonders bei der Berechnung von Schweißnähten angewendet [15].

Belastungs-Zeit-Funktion

Die aus dem Betrieb gemessene, über die Zeit aufgetragene, Belastung eines Bauteils wird als Belastungs-Zeit-Funktion (BZF) bezeichnet. Eine betriebsfeste Auslegung eines Bauteils anhand einer BZF stellt einen großen Kosten- und Zeitaufwand dar. Aus diesem Grund werden, um die Ergebnisse von Wöhlerversuchen auf den realen Betrieb zu projizieren, die in der Regel irregulären Variationen im Lastgang erfasst und die daraus resultierenden Lastschwingspiele gezählt. Hierzu wurden verschiedene Zählmethoden entwickelt. Eine Übersicht gängiger Methoden kann in [15, 8] eingesehen werden. Allgemein wird die Anwendung der Rainflow Methode (RF) vorgezogen, da diese als den anderen überlegen gilt [16, 18, 8, 15]. Zusätzlich lassen sich die Ergebnisse vieler einparametrischer Zählverfahren, wie zum Beispiel der Bereichspaarzählung, der Spitzenzählung und der Klassengrenzenüberschreitungszählung, aus dem Ergebnis einer RF-Zählung herleiten. Nachteil der aktuell angewendeten Zählverfahren ist der Verlust der Reihenfolge, in der die Belastungen auftreten. Durch Veränderung der Reihenfolge in der Belastungen auf ein Bauteil einwirken, verändert sich auch die Lebensdauer des Bauteils [22, 18]. Beispielsweise haben regelmäßige Spannungsspitzen bei gekerbten Probestäben eine lebensdauerverlängernde Wirkung [22].

Rainflow-Methode

Im von Matsuishi & Endo entwickelten Rainflow Zählverfahren werden die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm auftretenden geschlossenen Hystereseschleifen gezählt. Dieser werkstoffmechanische Zusammenhang ist ein weiterer Grund für die Überlegenheit dieses Verfahrens. In Abbildung 2.4 ist der Zusammenhang zwischen Spannungs-Dehnungsdiagramm und der zugehörigen BZF abgebildet.

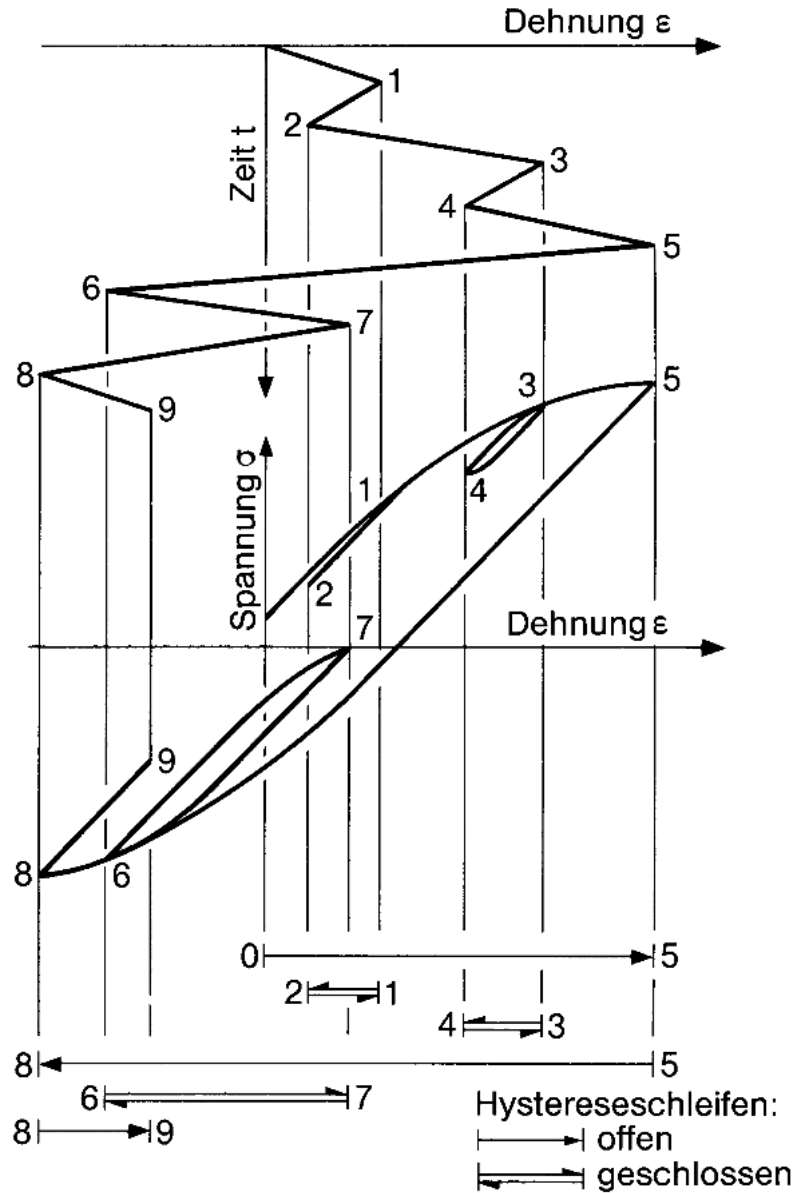


Abbildung 2.4: Rainflow Zählmethode nach Steinhilber u. Schütz [8]. Darstellung der Belastungs-Zeit-Funktion, dem zyklischen Werkstoffverhalten und den gezählten Hystereseschleifen.

Die Bezeichnung Rainflow stammt aus der ursprünglichen Beschreibung des Verfahrens, bei der die Belastungs-Zeit-Funktion um 90° gedreht wird und der Vorstellung nach ein Regenwasserfluss an dem Diagramm herabfließt. Ausgehend vom jedem Lastumkehrpunkt läuft ein Wasserfluss links und rechts an dem Graphen herunter. Dabei gelten folgende Regeln: Ein Wasserfluss wird gestoppt wenn,

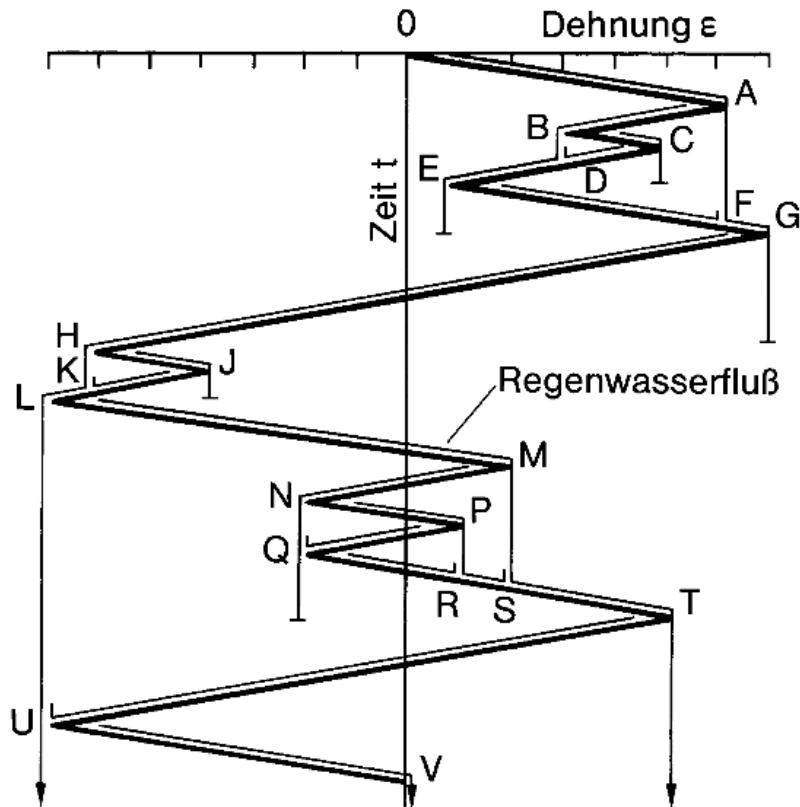


Abbildung 2.5: Darstellung der Rainflow-Zählung [8]

1. er auf einen Fluss trifft, welcher von oben herabfällt.
2. der Fluss an einer horizontal gegenüberliegenden Spitze mit größerer Ausprägung vorbeifällt.
3. der Fluss bis zum Ende der BZF auf keine weitere Spitze trifft.

Jeder gestoppte Fluss wird als halbes Schwingspiel gezählt. Halbe Schwingspiele gegensätzlicher Ausrichtung werden zu einem vollen Schwingspiel zusammengefasst. Halbe Schwingspiele, welche nicht geschlossen werden konnten sowie solche, welche durch Flüsse entstehen, die durch das Diagramm hindurchfallen, stellen offenen Hystereseschleifen dar.

Offene Hystereseschleifen verbleiben als Residuum in der Zählung. Das Residuum kann zur Verbesserung einer Rekonstruktion der BZF verwendet werden. Bei Lebensdauerberechnungen werden die Schwingspiele des Residuums als halbe Schwingspiele gewertet. Da im Residuum oft Schwingspiele mit großer Amplitude verbleiben, erhöht sich dadurch die Genauigkeit der Berechnungen.

Es existieren verschiedene Algorithmen, um eine Rainflow-Zählung automatisiert durchzuführen. Hierbei wird zwischen Drei- und Vierpunkt-Verfahren unterschieden, wobei die

Ergebnisse der Verfahren identisch sind [14]. Die Vierpunkt-Algorithmen ermöglichen eine kontinuierliche Erfassung der Schwingspiele, während Dreipunkt-Verfahren nur diskontinuierlich angewendet werden können. Daher ist die Anwendung von 4-Punkt Algorithmen vorzuziehen [3, 8].

Der Vierpunkt-Algorithmus aus [3] soll nachfolgend kurz erläutert werden. Die Messwerte des Lastgangs werden auf eine Folge von lokalen Extrema reduziert. Aus diesen Werten werden jeweils vier aufeinanderfolgende Punkte $S_{i-4}, \dots, S_i$ ausgewählt und die drei Differenzen $X_i = |S_{i-1} - S_i|$, $X_{i-1} = |S_{i-2} - S_{i-1}|$, $X_{i-2} = |S_{i-3} - S_{i-2}|$ gebildet. Eine Folge von Werten stellt ein Schwingspiel dar, wenn folgendes Kriterium erfüllt ist: $X_{i-1} \leq X_i \wedge X_{i-1} \leq X_{i-2}$. Die Werte S_{i-2} und S_{i-1} werden dann aus der Folge entfernt, für eine spätere Verwendung gespeichert und mit den aufrückenden Werten wird fortgefahren. Ist das Kriterium nicht erfüllt, fährt man mit $i = i + 1$ fort. Dies wird bis an das Ende der Messreihe durchgeführt und mit den restlichen Werten wird das Verfahren erneut durchlaufen.

Lastkollektiv

Als Lastkollektiv (oder auch Beanspruchungskollektiv) bezeichnet man die statistisch nach Größe und Häufigkeit erfassten Beanspruchungsamplituden, welche mittels geeigneter Zählmethoden aus dem Lastgang oder der Beanspruchungs-Zeit-Funktion ermittelt wurden. Es wird zwischen Grund- und Zusatzbeanspruchung unterschieden. Folgende Eigenschaften beschreiben die Beanspruchungsformen [15]:

Tabelle 2.1: Beanspruchungsformen

Grundbeanspruchung	Zusatzbeanspruchung
ständig statisch	periodisch veränderlich
zeitweise statisch	einmalig aperiodisch
periodisch veränderlich	regellos aperiodisch

Weiterhin wird zwischen deterministischen, also eindeutig beschreibbaren, streng vorhersagbaren Beanspruchungs-Zeit-Funktionen und stochastischen BZF unterschieden. Im Falle eines Solarkollektors stellt der Tag-Nacht-Wechsel eine Grundbeanspruchung dar, während die wechselnde Sonneneinstrahlung eine regellose aperiodische, also stochastische, Zusatzbeanspruchung darstellt.

Schädigung und Schadensakkumulation

Den Zusammenhang zwischen der Lebensdauer von real, also irregulär, belasteten Bauteilen und der Wöhlerkurve schafft die von Palmgren und Miner entwickelte Schadensakkumulationstheorie. Der Gedanke der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner ist, dass jede Schwingung eine Teilschädigung entsprechend $\frac{1}{N_i}$ verursacht. N_i bezeichnet die mit der Amplitude σ_i ertragbare Anzahl an Schwingungen. Die Gesamtschädigung D des Bauteils ergibt sich durch die Summe aller Teilschäden und ist gegeben durch:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.5)$$

Der Bruch des Bauteils erfolgt bei Erreichen der Schadenssumme $D = 1$. Schwingungen im dauerfesten Bereich werden nicht mitgezählt. Verschiedene Untersuchungen zeigen allerdings, dass auch Schwingungen unterhalb der Dauerfestigkeit zur Gesamtschädigung beitragen. Daher wurde eine Reihe von Modifikationen der Palmgren-Miner Regel entwickelt, um diesem Umstand Rechnung zu tragen. Einige sind zum Beispiel *Miner elementar* und *Miner modifiziert*. Bei der Variante *Miner elementar* wird die Wöhlerlinie in den Bereich der Dauerfestigkeit durch Verlängern der Kurve fortgesetzt, während bei *Miner modifiziert* die Wöhlerlinie mit veränderter Neigung $k = 2k - 1$ fortgesetzt wird. In Abbildung 2.6 ist der Unterschied zwischen diesen Varianten dargestellt.

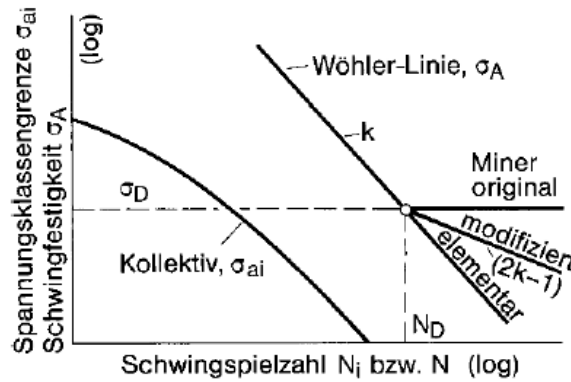


Abbildung 2.6: Modifikationen der Palmgren-Miner Hypothese [15]

Nachteile der linearen Schadensakkumulationstheorien sind, dass die aus vorhergehender Belastung resultierende Gefügeänderung, die damit einhergehende Festigkeitsänderung sowie Frequenz- und Reihenfolgeeffekte nicht beachtet werden. Zum Teil weicht die mit der Palmgren-Miner Regel berechnete Lebensdauer um 0,2 bis 10 von der eingetretenen Lebensdauer ab [15]. Um eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen zu erreichen, hat es sich etabliert eine Wöhlerkurve mit hoher Überlebenswahrscheinlichkeit mit einem weiteren Sicherheitsfaktor zu beaufschlagen. Zum Beispiel durch Begrenzung der Schadenssumme auf $D < 1$ oder durch Verschieben der Wöhlerkurve.

Aufbauend auf der Palmgren-Miner Regel wurde eine Vielzahl nichtlinearer Schadensakkumulationstheorien entwickelt. Viele dieser nichtlinearen Schadensakkumulationstheorien unterscheiden sich nur in der Berechnung des Schädigungs- bzw. Werkstoffexponentens. Nachfolgend soll eine allgemeine, nichtlineare Schadensakkumulation am zweistufigen Beispiel kurz beschrieben werden:

Ein Probekörper wird mit n_1 Schwingspielen der Amplitude σ_1 belastet. Basierend auf der Palmgren-Miner-Regel wird, erweitert um einen Werkstoff- oder Schädigungsexponenten χ , der Schädigungsverlauf der ersten Belastungsstufe beschrieben durch:

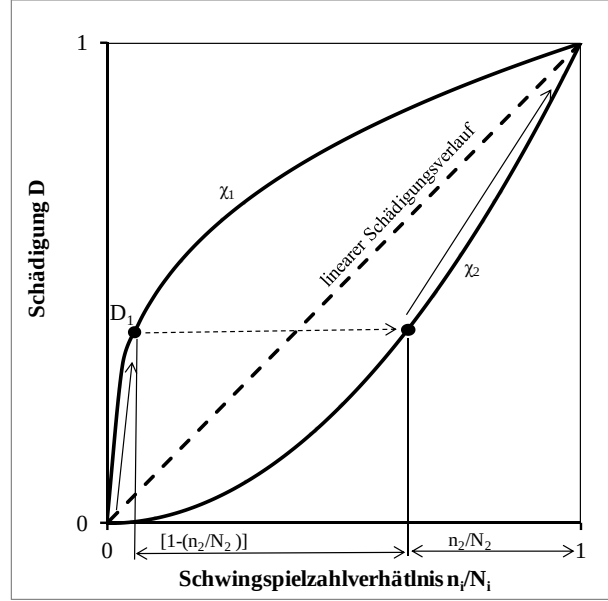


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der linearen und nichtlinearen Schädigung am zweistufigen Beispiel

$$D_1 = \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\chi_1}$$

Danach erfolgt bei geänderter Spannung die Beanspruchung des Bauteils bis zum Bruch ($D = 1$). Damit ergibt sich:

$$\left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\chi_1} = \left[1 - \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \right]^{\chi_2}$$

Und Umstellen liefert:

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\frac{\chi_1}{\chi_2}} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) = \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\chi} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

In Abbildung 2.7 ist der nichtlineare Schädigungsverlauf unterschiedlicher Beanspruchungsstufen, der lineare Schädigungsverlauf im Vergleich sowie der Zusammenhang zwischen den Exponenten dargestellt.

Siemon [18] untersuchte eine Auswahl an nichtlinearen Theorien und bestätigte deren gute Treffsicherheit, wenn Ergebnisse von mehrstufigen Werkstoffversuchen zur Verfügung standen. Bei Anwendung auf Versuche höherer Ordnung konnte eine höhere Treffsicherheit der nichtlinearen Schadensakkumulationstheorien gegenüber der Palmgren-Miner Methode nicht festgestellt werden. Dadurch sind die nichtlinearen Schadensakkumulationstheorien bisher nicht für die Praxis relevant. Bis zur allgemeinen Anwendbarkeit der nichtlinearen Schadensakkumulationstheorien ist daher weitere Forschungsarbeit

notwendig.

2.4 Ermüdungsfestigkeit von Fernwärmeleitungen

Die Grundlage zur Ermittlung der Gebrauchsdauer von Rohrleitungen schaffte Markl in den 50er Jahren, indem er an Rohren und Bögen Bauteilwöhler tests durchführte [12, 13]. Für die Ermüdungsfestigkeit von Rohren relevante Regelwerke sind das Merkblatt S2 der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD) [4], das Regelwerk des Kerntechnischen Ausschuss (KTA) KTA3211.2 [10] sowie die auf den Ergebnissen der AD und des KTA aufbauenden Abschnitte in der DIN EN 13941 [6] und der FW401 [1].

Die DIN EN 13941:2009+A1:20120 vom Technischen Komitee CEN/TC107 “Werkmäßig gedämmte Mantelrohre für die Fernwärme” ist das europäische Regelwerk, welches von der JWG1, einer gemeinsamen Arbeitsgruppe mit dem CEN/TC267 “Industrielle Rohrleitungen und Fernrohrleitungen”, erarbeitet worden ist. In dieser Norm ist eine Vielzahl an Grundsätzen und Anwendungsregeln für die Analyse, Auslegung und statische Berechnung von Fernwärmeleitungen enthalten.

Das Arbeitsblatt FW401-Teil 10 “Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze” des AGFW “Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.”, ist das deutsche Regelwerk für die statische Auslegung von Fernwärmeleitungen. Dort sind die Anforderungen und Berechnungsgrundlagen für KMR ausführlich erklärt sowie einige Berechnungsbeispiele enthalten.

Statische Auslegung

Die Auslegung von Fernwärmeleitungen erfolgt gegen Versagen durch Primäreinwirkungen, also durch Gewichtskraft des Bodens, des Rohres sowie eventuell auftretender Verkehrslasten und gegen Versagen durch Sekundäreinwirkungen. Sekundäreinwirkungen sind temperaturbedingte Dehnungen und Verschiebungen einer Leitung, Druckvariationen und Verkehrslasten. Belastungen durch Druckschwankungen liegen in der Regel unterhalb des ermüdungsrelevanten Bereichs [17, 1] und werden bei der Schadensberechnung nicht separat betrachtet.

Aktuelle Methoden zur Zustandsanalyse von Fernwärmeleitungen beschränken sich auf die Fehlersuche, also auf die Lecksuche. Hierfür werden die sogenannten Molche oder Leckwarnsysteme verwendet. Eine lastgangbasierte Lebensdauerberechnung findet bei Fernwärmeleitungen nur in der Auslegung statt. Hierbei werden die durch Dehnungen und Verschiebungen auftretenden Spannungen, unter Bezugnahme auf eine Wöhlerlinie und entsprechenden Anforderungen an die Gebrauchsdauer der Leitung, begrenzt.

Volllastwechsel

Die wichtigste Kenngröße der Ermüdungsberechnung in der Fernwärme ist der Volllastwechsel. Ein Volllastwechsel ist ein Schwingenspiel mit der größten erwarteten Temperaturschwingbreite ΔT_{ref} . Diese Temperaturdifferenz stellt die größte Belastung der Leitung

Tabelle 2.2: Gleichwertige Volllastwechsel für $m = 4$ und $\Delta T_{ref} = 110 \text{ K}$ nach DIN EN 13941 [6]

Hauptrohrleitungen	100
Verteilungsrohrleitungen	250
Hausanschlussleitungen	1000

im Betrieb dar, da daraus die größten Verschiebungen und damit die größten Spannungen resultieren.

Die Temperaturdifferenz, die als Volllastwechsel angesetzt wird, setzt sich aus der höchsten geplanten Betriebstemperatur T_B und der Außentemperatur bei Einbau der Leitung T_0 (auch Montagetemperatur) zusammen (siehe Formel 2.6). Da die Temperaturen bei Einbau der Leitung nicht immer bekannt sind, wird vereinfachend eine Außentemperatur von 10°C angenommen.

$$\Delta T_{ref} = T_B - T_0 \quad (2.6)$$

Abgesehen von der Inbetriebnahme der Leitung ist ein Schwingspiel mit voller Temperaturdifferenz im Betrieb ein eher seltenes Ereignis und das Anfahren der Leitung stellt noch keinen Volllastwechsel dar, da das Schwingspiel nicht beendet wurde. Temperaturschwingspiele mit einer geringeren Temperaturdifferenz als ΔT_{ref} werden als Teillastwechsel bezeichnet.

Gebrauchsdauerberechnung

Die Absicherung gegen Ermüdung erfolgt durch Begrenzen der durch einen Volllastwechsel hervorgerufenen Spannungen. Aus der statischen Berechnung wird die aus einem Volllastwechsel resultierende Spannung an versagenskritischen Orten der Leitung ermittelt und mit der maximalen Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{max}$ aus Formel 2.7 verglichen. Bei Anwendung von Formel 2.7 können für geschweißte und ungeschweißte Bauteilbereiche unterschiedliche Werte für m und k angewendet werden. Um die Sicherheit einer Auslegung zu gewährleisten, werden zur Ermittlung der maximalen Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{max}$ die Vorgaben in Tabelle 2.2 mit einem Sicherheitsfaktor γ_{fat} multipliziert. Der Faktor γ_{fat} wird je nach der Projektklasse, welche der Leitung zugeordnet wurde, ausgewählt (Tabelle 2.3). Die Auswahl der Projektklasse richtet sich nach dem Risiko der Leitung für Schäden und Verluste sowie den auftretenden Spannungen [6].

$$\Delta\sigma_{max} = k N_{Anriss}^{-1/m} \quad (2.7)$$

mit

$$N_{Anriss} = N \cdot \gamma_{fat} \quad (2.8)$$

Je nachdem, ob das Netzverhalten bekannt ist, wird das gegebene Lastkollektiv zur Ermittlung der maximalen Spannungsschwingbreite oder die Vorgabe aus DIN EN 13941 an

Tabelle 2.3: Sicherheitsfaktoren nach Projektklasse aus DIN EN 13941 [6]

Projektklasse	γ_{fat}
A	5
B	6,67
C	10

Tabelle 2.4: Auswirkungen unterschiedlicher Exponenten auf die Ermittlung gleichwertiger Volllastwechsel nach [16]

	ΔT	Anzahl pro Einheit	n (30 Jahre)	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
Jahr	110	1	30	30	30	30
Monat	55	2	720	90	45	22,5
Woche	27,5	4	6240	97,5	24,4	6,1
Tag	13,75	8	87600	171,1	21,4	2,7
			$N_0 =$	388,6	120,8	61,3

die mindestens ertragbare Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel in Tabelle 2.2 verwendet. Die Anforderungen aus [6] dürfen dabei nicht unterschritten werden. Die Umrechnung eines Betriebslastkollektivs auf ein schadensäquivalentes, aus Volllastwechseln bestehendes Kollektiv erfolgt auf Basis der Palmgren-Miner Regel, unter der Annahme, dass die Verschiebung, und damit die resultierende Spannung, der Temperaturänderung linear folgt. Die Spannung lässt sich somit durch $\Delta\sigma = c \cdot \Delta T$ beschreiben. Damit ergibt sich die Schadenssumme D_i der Kollektivstufe i zu:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i}{N_0} \cdot \left(\frac{c\Delta T_i}{c\Delta T_{ref}} \right)^m \quad (2.9)$$

Mit Formel 2.9 kann die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel N_0 ausgedrückt werden durch:

$$N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^m} \sum n_i \cdot (\Delta T_i)^m \quad (2.10)$$

Diese Betrachtungsweise führt zu sehr einfachen Berechnungen der Gebrauchsdauer von Fernwärmeleitungen, da die Anzahl der Volllastwechsel nur noch von der Neigung der angewendeten Wöhlerkurve und dem Temperaturkollektiv abhängig ist. Untersuchungen der Internationalen Energieagentur (IEA) [16, 17] zeigen, dass durch die Neigung der Wöhlerkurve die Gewichtung der Teillastwechsel stark beeinflusst wird. (siehe Tabelle 2.4).

Einfluss der Messfrequenz

In den Untersuchungen der IEA zu Temperaturschwankungen in Fernwärmeleitungen [16] wird der Einfluss der Messfrequenz auf das Ergebnis einer Volllastwechselberech-

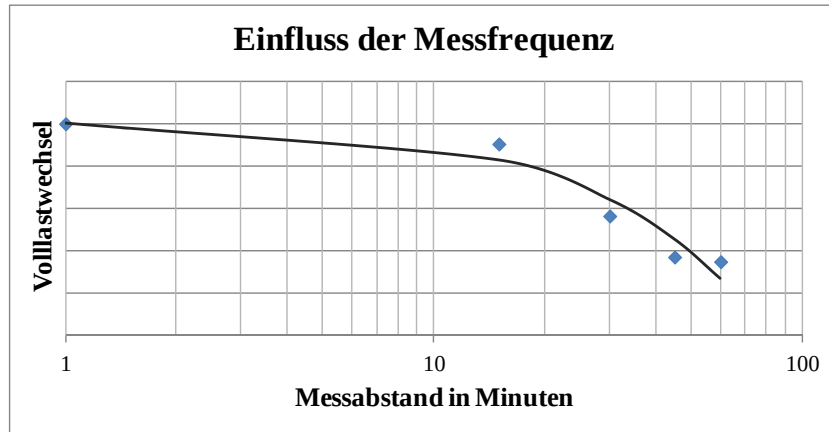


Abbildung 2.8: Einfluss der Messfrequenz auf die Anzahl der Volllastwechsel

nung untersucht. Ausgehend von Messwerten, welche mit einer Frequenz von 1 min^{-1} aufgezeichnet wurden, wurde die Zahl gleichwertiger Volllastwechsel bei verschiedenen Frequenzen berechnet. Ergebnis der Untersuchung ist, dass mit sinkender Messfrequenz die Anzahl an gleichwertigen Volllastwechseln aus der Berechnung sinkt. Betrachtet man den Abfall der Volllastwechsel bei logarithmischer Skalierung der Zeitachse, ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 2.8.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

Um die Anforderungen aus DIN EN 13941 [6] an die Anzahl ertragbarer Vollastwechsel einer Leitung bewerten zu können, wurden Lastganglinien aus dem Fernwärmenetz der Netzdienste-Rhein-Main (NRM) und eines Verbraucheranschlusses aus dem Netz der Stadtwerke München (SWM) untersucht.

Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Vollastwechselzahlen werden innerhalb von 30 Jahren erreicht?
- Wie hoch sind die erreichten Vollastwechselzahlen im Vergleich mit den Anforderungen aus DIN EN 13941?
- Kann aus den Messwerten ein Trend für die Auslegung zukünftiger Leitungen bestimmt werden?

3.1 Messwerte NRM

Die NRM stellten 5800 Wochen Messdaten von über 130 Messpunkten zur Verfügung. Viele der Messpunkte konnten wegen der kurzen Messdauer oder aufgrund von Messfehlern nicht für die weitere Untersuchung verwendet werden. Anschlüsse mit einem Messintervall von weniger als 30 Wochen wurden als zu kurz angesehen. Weiterhin gab es einige Messpunkte, bei denen die Messung komplett ausgefallen oder die Messfrequenz zu niedrig war, um brauchbare Resultate zu erzielen. Nach der Überprüfung der Daten zeigten sich 99 Messpunkte für eine weitere Bearbeitung geeignet.

Die übrigen Messwerte stammen aus 17 Erzeugungsanlagen und Pumpstationen sowie 82 Verbrauchern unterschiedlicher Größe. Die durchschnittliche Messdauer betrug 295 Tage bei einem Messabstand von 15 Minuten. Die Messpunkte wurden getrennt nach Erzeugern, Verbrauchern und Netzabschnitt gruppiert. Mangels eines Netzplanes wurde der Zusammenhang zwischen einzelnen Messpunkten nicht weiter untersucht. Die Messpunkte sind mit einer vierstelligen Nummer gekennzeichnet. Eine Sieben am Anfang bezeichnet eine Erzeugungsanlage oder Pumpstation, eine Acht steht für Verbraucheranlagen. Die zweite Ziffer steht für den Netzabschnitt. Die letzten beiden Ziffern sind die fortlaufende Nummerierung der Messpunkte im jeweiligen Netzabschnitt. Ein generelles Problem der gelieferten Messwerte waren Ausfälle oder Fehler bei der Übertragung. Einzelne Messwerte oder auch Tage fehlen. Der Anteil an fehlenden Messwerten schwankt zwischen 0% und 14%, wobei im Durchschnitt 6% der Messwerte nicht zur Verfügung standen.

Tabelle 3.2: Volllastwechsel von Messpunkt 8720

Zeitraum	Vorlauf	Rücklauf
05.12.2011 - 08.04.2013	0,18	0,08
01.04.2012 - 01.05.2012	0,0035	0,0012
Anteil am Gesamtschaden	1,9%	1,5%

3.1.1 Untersuchung der Messwerte

Für jeden Messpunkt wurde eine Rainflow-Zählung durchgeführt und die äquivalenten Volllastwechsel nach FW 401 [1] mit Formel 2.10 bestimmt. Dabei wurde für ΔT_{ref} eine Temperaturdifferenz von 120 K mit dem Exponenten $m = 3,2$, für ungeschweißte Bauteilbereiche angesetzt. Im Anschluss wurde die Anzahl äquivalenter Volllastwechsel auf einen Zeitraum von einem Jahr und 30 Jahren extrapoliert.

Die maximale, minimale sowie die gemittelte Anzahl an gleichwertigen Volllastwechseln aus den Berechnungen kann Tabelle 3.1 entnommen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der Berechnung aus unterschiedlich langen Messintervallen bei ungleichmäßiger Verteilung der Messausfälle stammen, sind diese nicht direkt miteinander vergleichbar.

Tabelle 3.1: Übersicht der Volllastwechselberechnung

	N_I Erzeuger				N_I Verbraucher		
	min	mittel	max		min	mittel	max
Vorlauf	0,07	0,64	2,55	Vorlauf	0,03	1,88	9,92
Rücklauf	0,01	0,30	1,87	Rücklauf	0,03	3,68	21,81

Die Messwerte für die Monate April und Mai stehen nur von den Messpunkten 8801 und 8720 zur Verfügung. Um für die anderen Messpunkte einen Trend der Volllastwechselzahlen dieser Monate zu ermitteln, wurden die Anzahl der auf diesen Zeitraum entfallenen Volllastwechsel bestimmt.

In den Abbildungen 3.1 und 3.2 ist der Lastgang von Vor- und Rücklaufleitung des Verbrauchers 8720 aufgetragen. Die Ergebnisse der Berechnungen können Tabelle 3.2 entnommen werden. Da die Anzahl der Volllastwechsel aus den Monaten April und Mai für den Messpunkt 8720 nur einen Anteil von unter einem Prozent an der Gesamtzahl haben, stellt sich die Frage, ob dieses Ergebnis für die anderen Messpunkte repräsentativ ist.

Bei Messpunkt 8801 fallen die Temperaturen von Vor- und Rücklauf für 22 Tage auf ca. 20° C ab (siehe Abbildung 3.3). Eine Aussage über den Beitrag zur Summe äquivalenter Volllastwechsel der Monate April und Mai kann aus diesem Grund nicht sinnvoll getroffen werden. Bei den weiteren Berechnungen wurde, in der Erwartung konservative Ergebnisse zu erhalten, für alle fehlenden Stellen eine gleichmäßige Verteilung der Volllastwechsel nach Formel 3.1 angenommen.

$$N_1 = N_I \cdot f_d \quad (3.1)$$

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

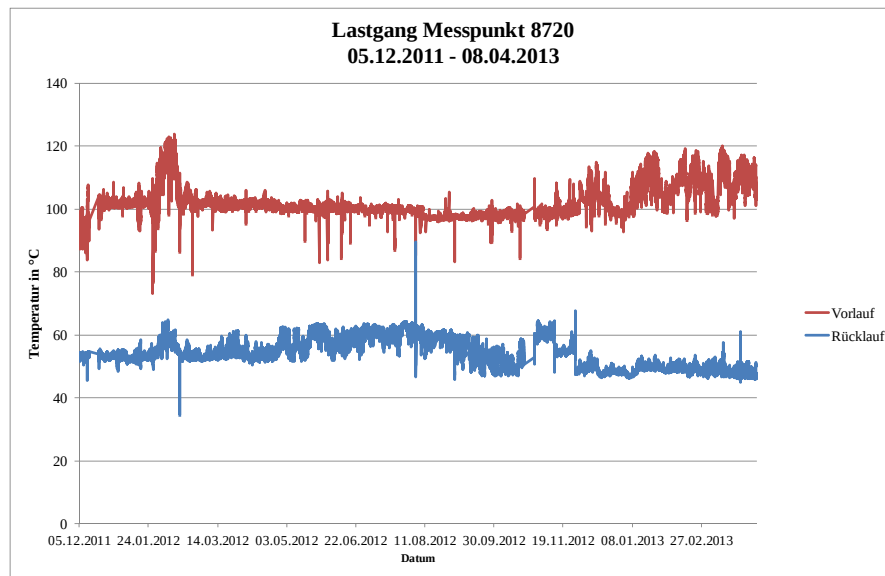


Abbildung 3.1: Lastgang Messpunkt 8720 von Dezember 2011 bis April 2013

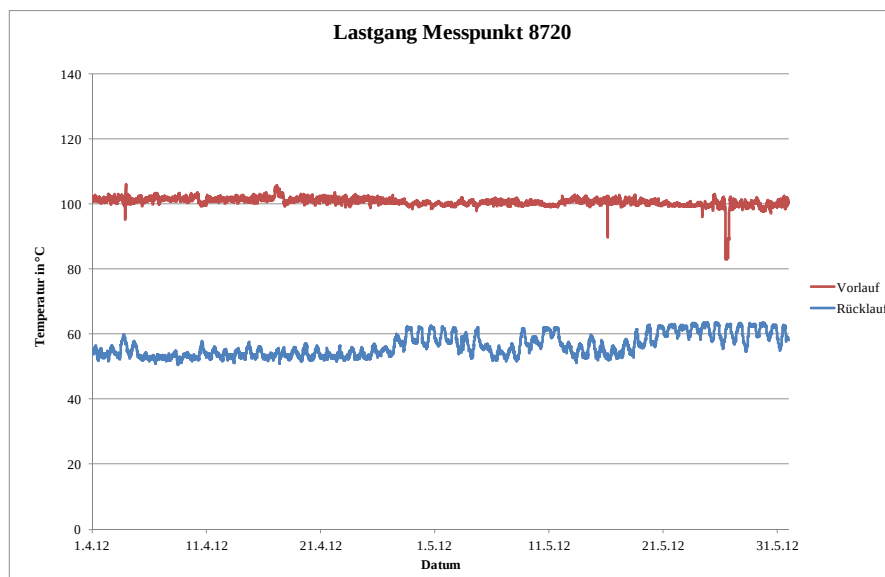


Abbildung 3.2: Lastgang Messpunkt 8720 von April bis Mai 2012

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

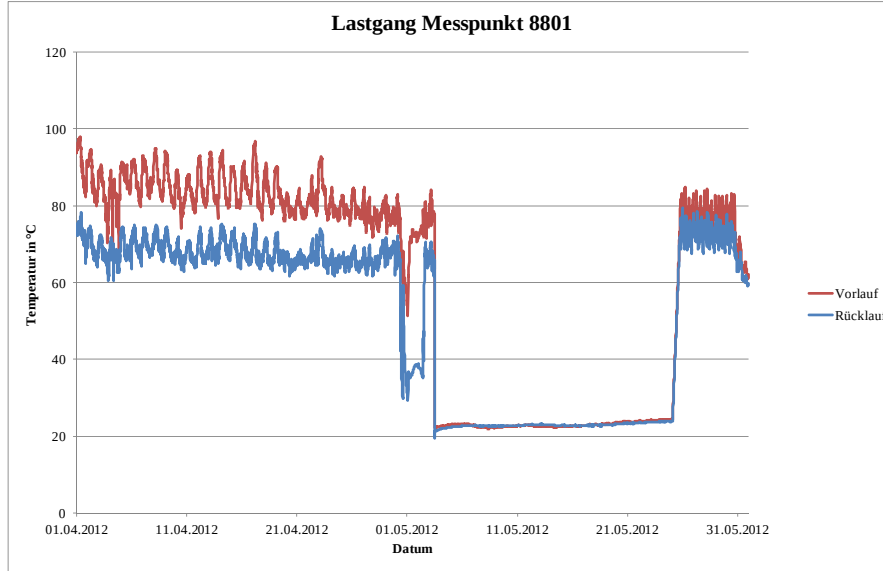


Abbildung 3.3: Lastgang Messpunkt 8801 von April bis Mai 2012

$$f_d = \frac{1}{n_M} \cdot 365 d \cdot 24 \frac{h}{d} \cdot f \frac{1}{h} \quad (3.2)$$

f_d = Ausgleichsfaktor für fehlende Messwerte

N_1 = Anzahl äquivalenter Volllastwechsel in einem Jahr

N_I = Anzahl äquivalenter Volllastwechsel aus dem Messintervall

n_M = Anzahl der Messwerte für das Messintervall

f = Anzahl der Messungen pro Stunde

3.1.2 Messfrequenz

Aus den Untersuchungen der IEA [16] ist bekannt, dass bei einem Abstand von 15 Minuten zwischen zwei Messungen das Ergebnis einer Volllastwechselberechnung um bis zu 70 % niedriger ausfallen kann wie bei Berechnungen, welche auf Minutenwerten basieren. Um dies auszugleichen wurde aus den gegebenen Messwerten die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel bei Abständen von 30, 45 und 60 Minuten ermittelt und mit den Ergebnissen eine lineare Regression durchgeführt. Mit den Parametern der Ausgleichsgeraden konnten die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel für einen Messabstand von einer Minute ermittelt werden. In Abbildung 3.4 sind die normierten Ergebnisse einer Volllastwechselberechnung und die Regressionsgerade bei logarithmischer Skalierung der Zeitachse dargestellt.

Die Abweichung zum ursprünglichen Ergebnis der Volllastwechselberechnung N_I wird mit dem Faktor f_f angegeben. Die Schadenssumme ergibt sich dann gemäß Formel 3.3 durch:

$$N_{I*} = N_I \cdot f_f \quad (3.3)$$

f_f = Korrekturfaktor der Messfrequenz

N_I = Anzahl an Volllastwechseln aus dem Messintervall

Im Durchschnitt wurde eine Erhöhung der Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel von 8 % ermittelt. Die geringste Veränderung betrug 1 %, die höchste 47 %. In den Untersuchungen der IEA sind Abweichungen zwischen 2 % und 70 % ermittelt worden. Ob die im Vergleich dazu geringe Streuung der Werte aus einem anderen Netzbetrieb, der niedrigen Messfrequenz oder einer fehlerhaften Extrapolation resultiert, konnte nicht geklärt werden.

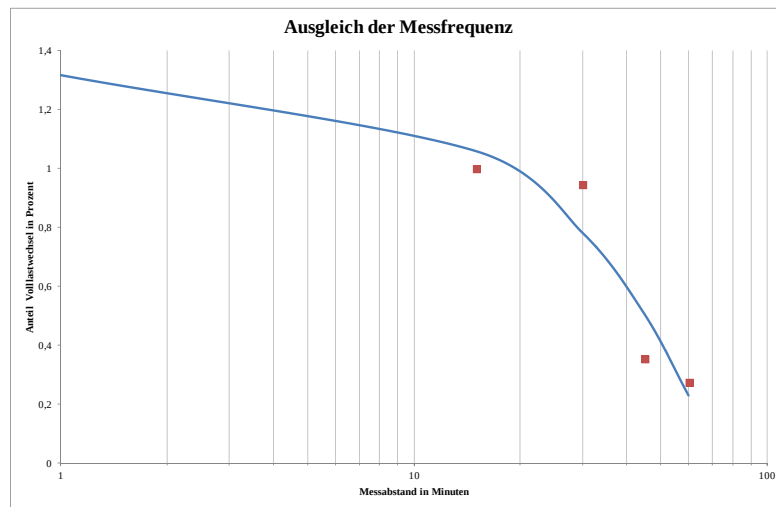


Abbildung 3.4: Ausgleich der Messfrequenz durch lineare Regression

3.1.3 Volllastwechsel

Mit den Ergebnissen der Volllastwechselberechnung und den Korrekturfaktoren f_f und f_d wurde für jeden Messpunkt die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel auf einen Zeitraum von 30 Jahren extrapoliert. Die Extrapolation der Volllastwechselberechnung ist in den Abbildungen 3.5, 3.6 und 3.7 dargestellt.

Die Ergebnisse der Extrapolation sind besonders am Rücklauf der Verbraucher 8710 und 8107 interessant. Verbraucher 8710 erreichte in der Berechnung insgesamt 1147 Volllastwechsel und Verbraucher 8107 insgesamt 955 Volllastwechsel. Beide liegen damit in guter Übereinstimmung an die in DIN EN 13941 [6] geforderte Tragfähigkeit gegen mindestens 1000 Volllastwechsel.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

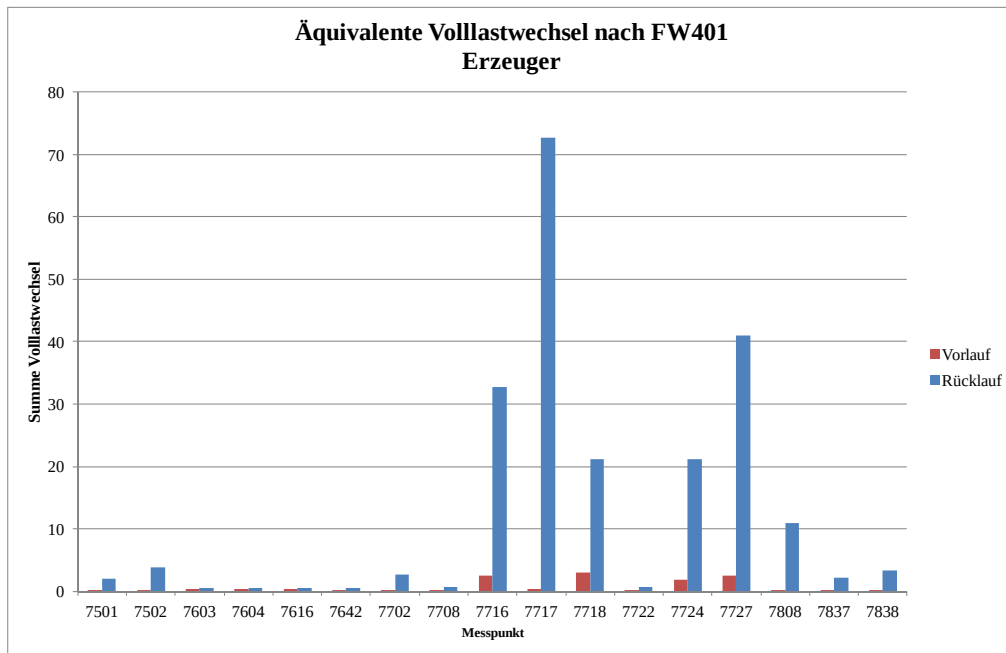


Abbildung 3.5: Äquivalente Vollastwechsel - Erzeuger

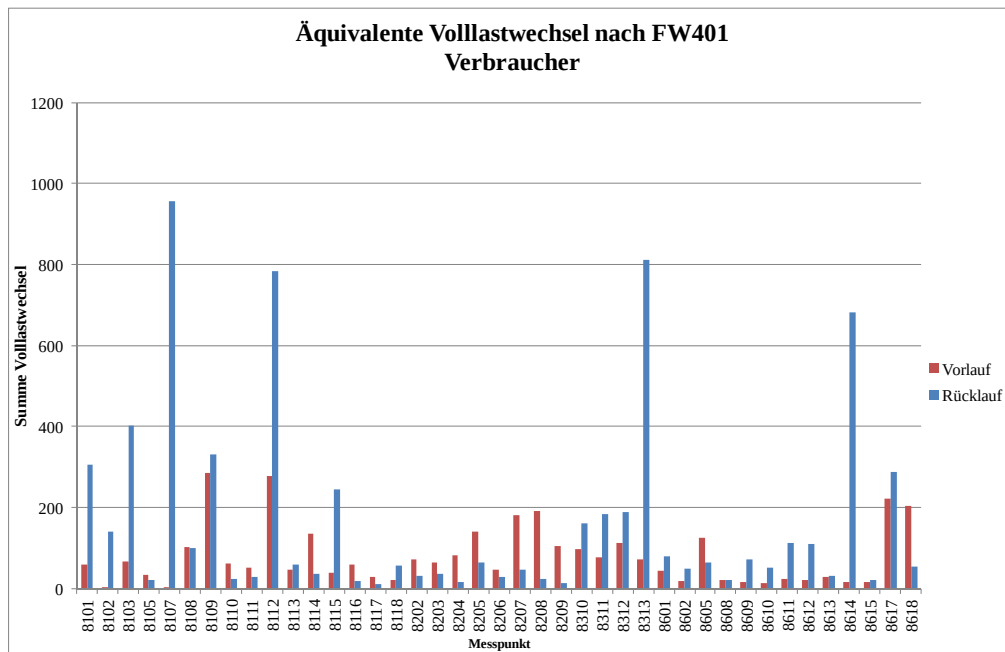


Abbildung 3.6: Äquivalente Vollastwechsel - Verbraucher Teil 1

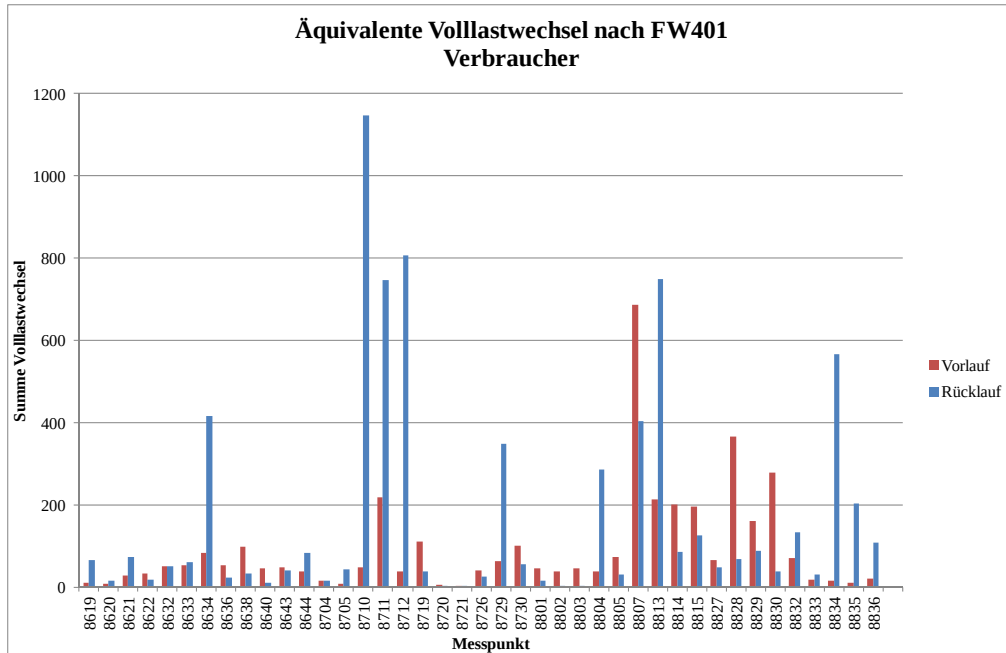


Abbildung 3.7: Äquivalente Volllastwechsel - Verbraucher - Teil 2

3.2 Messwerte München

Im Rahmen der Diplomarbeit konnte ein Feldtest der Stadtwerke München (SWM) begleitet werden. Dieser diente im AGFW Forschungsvorhabens “Entwicklung eines wirtschaftlichen Hauswärmeanschlusses für kleine Wärmeleistungen” als Teil des Gemeinschaftsforschungsprojekts “Energie und kosteneffiziente Wärmeversorgung” der Validierung von Projektergebnissen, Erweiterung des Wissensstands und dem Sammeln von Erfahrung in der baupraktischen Durchführung. Hierbei wurde durch die SWM ein Hausanschluss in einer Wohneinheit eines Freibades installiert. Bei der Hausanschlussleitung handelt es sich um ein flexibles Verbundrohr vom Typ ISOFLEX-28 mit einem Außendurchmesser von 75mm. Für die Erarbeitung und Realisierung des Messkonzepts zogen die SWM den AGFW “Forschung und Entwicklung” hinzu. Die in Abbildung 3.8 dargestellten Wendepunkte WP02 und WP03 liegen am Übergang vom starren Kunststoffmantelrohr (KMR) zum flexiblen Verbundrohr. Die Wendepunkte WP02 bis WP05 beschreiben eine Ausbuchtung der Trasse, um ein spannungsarmes Ausdehnen der Leitung zu ermöglichen.

Aufgrund der Tatsache, dass Verschiebungsmessungen in einem Schacht mit hohem Aufwand verbunden sind und die Installation eines Schachtes oder Beobachtungspunktes zusätzliche Bauzeit sowie Kosten verursacht, wurde eine Verschiebungsmessung mittels Glasfaserstangenextensometer und elektronischem Wegaufnehmer ausgewählt. Als Messpunkte für eine Verschiebungsmessung wurden die Wendepunkte WP02, WP03 und WP04 ausgewählt. Zusätzlich wurde eine Temperaturmessung an der Vorlaufleitung vor-

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

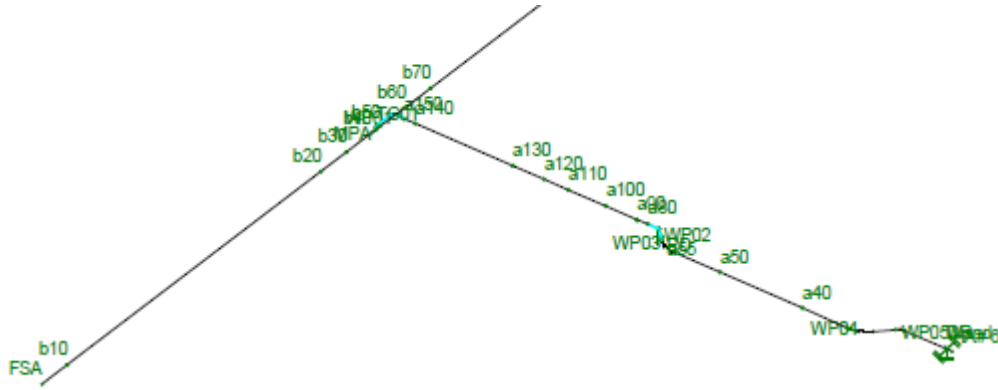


Abbildung 3.8: Ausschnitt, Rohrstatik

Tabelle 3.3: Verschiebungen gemäß Rohrstatik

Wendepunkt	WP02	WP03	WP04	WP05
Maximale Verschiebung	11 mm	4 mm	8 mm	11 mm

gesehen.

Die Temperatur am Mediumrohr wird durch einen Temperaturfühler vom Typ PT100 erfasst. Die Extensometer und der Temperaturfühler werden als verlorene Messtechnik im Untergrund verbleiben. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt mittels Datenlogger, welcher die Werte via GPRS überträgt.

Die in der Rohrstatik ermittelten Verschiebungen an den Wendepunkten sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Die Messtechnik wurde am 06.12.2012 getestet und in Betrieb genommen, während die Inbetriebnahme der Leitung am 07.02.13 erfolgte. Zur Bewertung der Verschiebungen wurde vom AGFW eine Beprobung des Bettungsmaterials beim Institut für Geotechnik (IGth) der Leibniz Universität Hannover in Auftrag gegeben. An den eingereichten Bodenproben bestimmte das IGth zwei Korngrößenverteilungen, einmal am Material der Leitungszone und einmal an der Verfüllzone. Weiterhin wurden ein Scherversuch nach DIN 18137 und ein Verbundscherversuch Polyethylen-Sand im großen Rahmenversuch durchgeführt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

Tabelle 3.4: Ergebnisse der Bodenuntersuchung

Versuch	Ergebniss
Innerer Reibungswinkel Leitungszone	$\varphi' = 36^\circ$
Verbundreibungswinkel Leitungszone	$\delta = 27^\circ$

Bis zur Inbetriebnahme der Leitung erfolgte die Aufzeichnung der Messwerte stündlich. Seitdem erfolgt alle 10 Minuten eine Messung. Die Verschiebung der Messpunkte ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die ersten größeren Verschiebungen traten am 12.12.2012 auf. Da die Temperatur der Leitung zu diesem Zeitpunkt nur $3,5^\circ\text{C}$ betrug, sind äußere Einflüsse wie Erschütterungen oder Setzungen als Ursache anzunehmen, insbesondere da die gesamte Leitung betroffen war. Als Bezugspunkt zukünftiger Verschiebungen werden die Messwerte vom 12.12.2012 als Nullpunkt angesetzt.

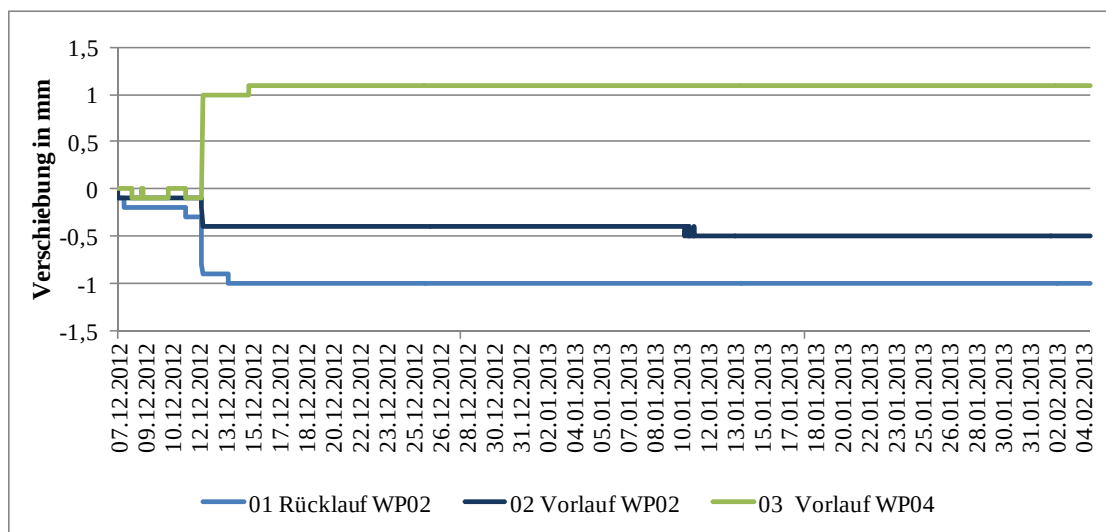


Abbildung 3.9: Verschiebung der Hausanschlussleitung

In den Abbildungen 3.9 und 3.10 ist die Inbetriebnahme der Leitung gut zu erkennen. Die Verschiebungen der Messpunkte am Vorlauf erreichten etwa 1,5 mm. Ein Temperaturabfall am 12.02.2013 auf ca. 30°C schien die Verschiebung der Leitung begünstigt zu haben. Die Verschiebungen am Vorlauf erhöhten sich an beiden Messpunkten auf ca. 2 mm. Vom 04.03.2013 bis zum 11.03.2013 fiel die Messung aus unbekannten Gründen aus. Die Verschiebung der Vorlaufleitung am Wendepunkt WP04 nahm während diesem Zeitraum auf ca. 2,7 mm zu, während die Verschiebungen an der Vor- und der Rücklaufleitung des Wendepunktes WP02 abfiel. Vom 25.03.2013 bis zum 25.04.2013 kam es erneut zu einem Ausfall der Messtechnik. Ein ausgefallenes Bauteil am Datenlogger war die Ursache hierfür. Die Verschiebung von WP04 blieb nahezu konstant, während an den Messpunkten bei Wendepunkt WP02 die Verschiebung ihre Richtung umkehrte. In Abbildung 3.10 sind die Messwerte für den gesamten Zeitraum dargestellt.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

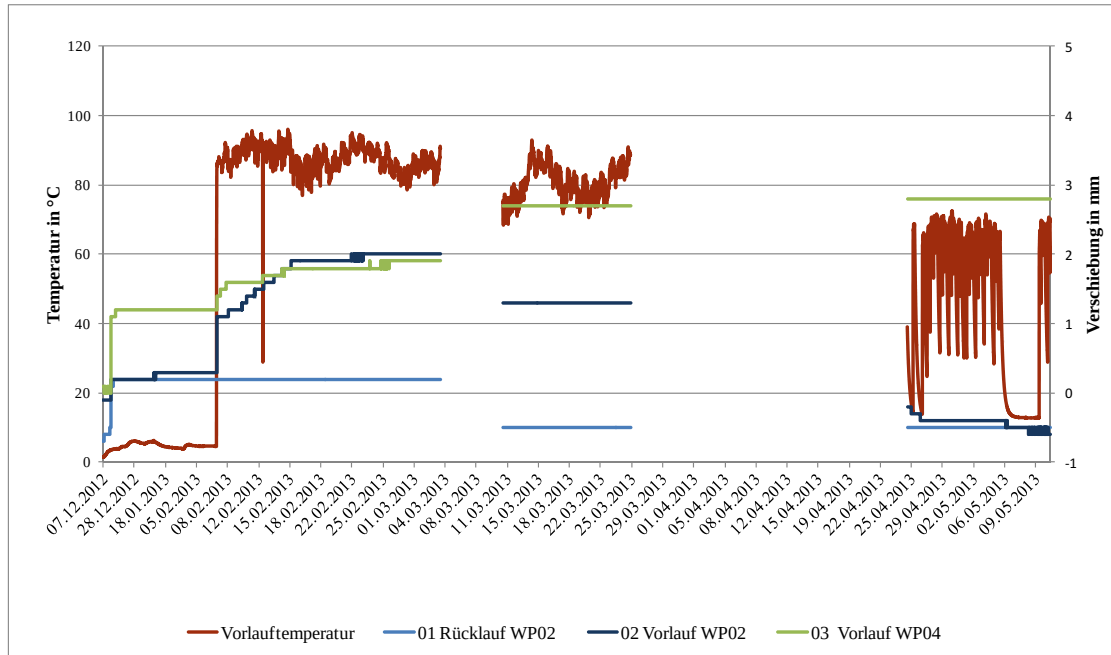


Abbildung 3.10: Verschiebung der Leitung

Tabelle 3.5: Gegenüberstellung der Verschiebungswerte

Wendepunkt	WP02	WP04
Maximale Verschiebung aus Rohrstatik	11	8
gemessene Verschiebung	~2 mm	~2,8 mm

3.2.1 Untersuchung der Messwerte

Die gemessenen Verschiebungen fallen deutlich geringer aus, als nach Rohrstatik berechnet. Eine Gegenüberstellung der Werte ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Aus den Untersuchungen des IGth wird ersichtlich, dass zwischen dem angenommenen inneren Reibungswinkel für die Statik von $\varphi' = 32,5^\circ$ und dem im Labor ermittelten inneren Reibungswinkel des Bettungsmaterials von $\varphi' = 36^\circ$ eine deutliche Abweichung besteht. Nach FW 401 Teil 10 [1] ergibt sich der Wandreibungswinkel zu $\delta = \frac{2}{3} \cdot \varphi' = 21,67^\circ$, während 27° gemessen wurden. Für die im Vergleich zur Berechnung kleinen Verschiebungen können verschiedene Faktoren eine Rolle spielen. Die Temperaturspreizung der Auslegungsrechnung von $\Delta T = 100$ K wurde nicht erreicht und der in der statischen Berechnung verwendete Reibbeiwert ist niedriger als der reale. Der reale Reibbeiwert ergibt sich zu $\mu_{IGth} = \tan(27^\circ) = 0,51$. Im Vergleich zu dem verwendeten Beiwert von 0,4 bedeutet dies eine Steigerung um 27,5 %. Weiterhin verläuft die Trasse durch Verwendung des Flexrohres leicht geschwungen, eine Verschiebung der Leitung in eine durch die Messtechnik nicht erfassbare Richtung wäre denkbar.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

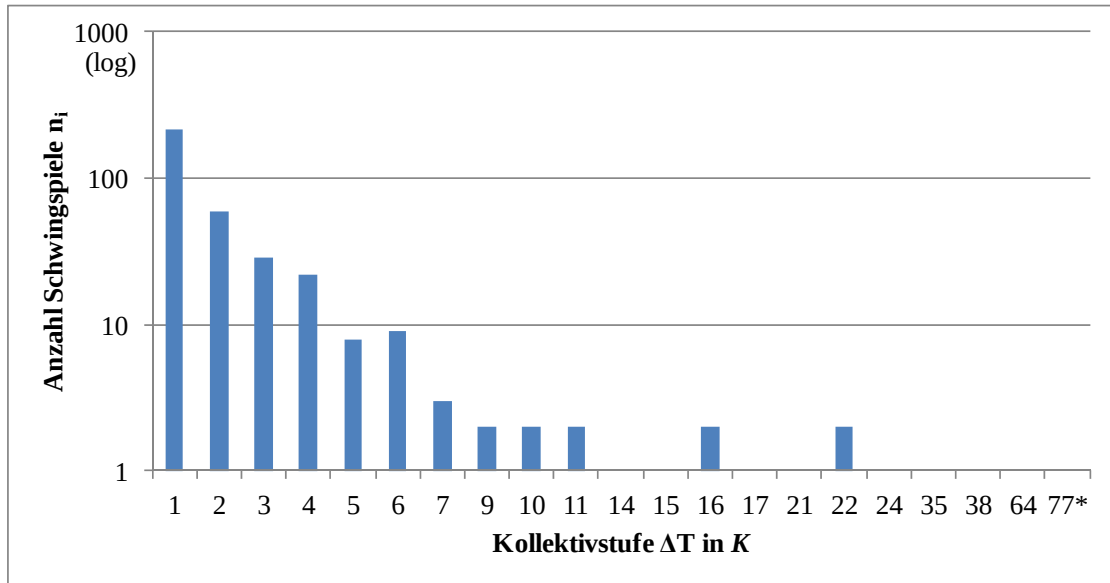


Abbildung 3.11: Histogramm der Temperaturschwingspiele

Zur Bewertung der Messwerte wurde sowohl auf die Temperatur als auch auf die Verschiebungsmessung eine Rainflow-Zählung durchgeführt. Die Anzahl der Temperaturschwingspiele kann Abbildung 3.11 entnommen werden. Aus den Verschiebungsmessungen der Vorlaufleitungen wurden die in Tabelle 3.6 einsehbaren Schwingspiele ermittelt.

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Rainflow-Zählung, Verschiebungsschwingspiele

	01 WP02 VL	02 WP02 RL	03 WP04 VL
Δu in mm	Anzahl	Anzahl	Anzahl
0,1	8	0	1
4,6	0	0	1
4,9	0	1	0
9,6	1	0	0

Es treten wesentlich mehr Temperaturschwingspiele als Verschiebungsschwingspiele auf. Für die Unterschiede zwischen den Verschiebungsmessungen und den Temperaturmessungen können verschiedene Gründe verantwortlich sein:

- Es ist möglich, dass ein Großteil der Temperaturvariationen so gering ist, dass die aus der Dehnung resultierende Kraft zu niedrig ist um die Haftreibung des Bodens zu überwinden und die Leitung zu verschieben.
- Die Verschiebungen fallen zu gering aus, um durch die Messtechnik erfasst zu werden.
- Die Annahme aus FW401 Teil 10 [1], dass die Verschiebungen des Stahlrohres

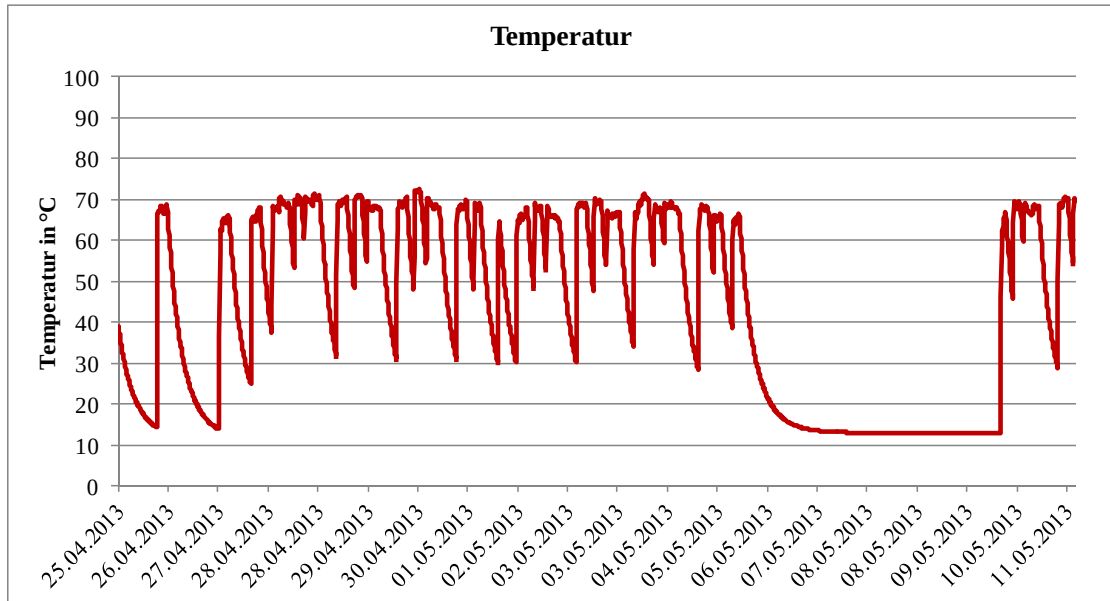


Abbildung 3.12: Temperaturlastgang Messpunkt München

komplett durch den Außenmantel abgebildet wird, trifft nicht zu.

Welcher dieser Gründe zutreffend ist, oder ob eine Kombination der Vermutungen zutrifft konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erläutert werden.

In Abbildung 3.12 ist der Temperaturlastgang vom 25.04.2013 bis zum 13.05.2013 abgebildet. Gut erkennbar ist hier das Auskühlen der Leitung, wenn kein Wärmebedarf anfällt.

3.2.2 Vollastwechsel

Um den Einfluss dieses Temperaturabfalls zu bewerten, wurde eine Rainflow-Zählung für diesen Zeitraum durchgeführt und die Anzahl gleichwertiger Vollastwechsel nach FW401 bestimmt. Als Berechnungsparameter wurde $\Delta T = 100 \text{ K}$ und $m = 3,2$ ausgewählt.

Auf den Zeitraum vom 25.04.2013 bis zum 11.05.2013 entfallen 0,11 Vollastwechsel, was einem Anteil von 19 % an der gesamten Anzahl gleichwertiger Vollastwechsel von 0,59 entspricht. Rechnet man die auf das Anfahren der Leitung anfallenden Vollastwechsel von 0,23 heraus, erhöht sich der Anteil auf 30 %. Um die Messwerte aus dem kurzen Messintervall mit anderen Messungen vergleichen zu können, wurden die Messwerte aus München auf einen längeren Zeitraum erweitert. Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass die Nachtabenkung in den Monaten von April bis September stattfindet und die Temperaturschwankungen im restlichen Jahr gleichwertig zu dem Zeitraum vom 07. Februar 2013 bis zum 25. März 2013 erfolgen. Zum Ausgleich der Messfrequenz wurden die mittleren Regressionskoeffizienten, welche aus den Messwerten der NRM ermittelt wurden, verwendet. Die Koeffizienten der linearen Regression können Tabelle 3.7

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

Tabelle 3.7: Mittlere Regressionskoeffizienten aus den Messwerten der NRM

m	b
-0,01	1,092

Tabelle 3.8: Korrekturfaktoren - Messpunkt München

Korrekturfaktor		
f_f	f_{d/I_1}	f_{d/I_2}
1,082	4,66	11,4

entnommen werden. Die Anzahl gleichwertiger Vollastwechsel für den Hausanschluss in München setzt sich dann nach folgender Formel zusammen:

$$N_0 = (N_{I_1} \cdot f_{d,I_1} + N_{I_2} \cdot f_{d,I_2}) \cdot f_f \quad (3.4)$$

$f_{d,I}$ = Korrekturfaktor für fehlende Messwerte im Intervall I

N_I = Vollastwechsel im Intervall I

Mit den in Tabelle 3.8 dargestellten Korrekturfaktoren und unter Verwendung von Formel 3.4 ist die Vorlaufleitung am Messpunkt in München 114 gleichwertigen Vollastwechseln ausgesetzt.

3.3 Temperaturkollektive

Für weitere Untersuchungen der Gebrauchsdauer von Fernwärmenetzen, insbesondere für Materialversuche, werden repräsentative Belastungskollektive benötigt. Bisher können dazu nur die Best-Fit Kurven aus den Untersuchungen der IEA [17] herangezogen werden. Die Kurven der IEA ergeben sich aus den Formeln 3.5 und 3.6. Formel 3.5 wird hierbei für den Vorlauf von Erzeugungsanlagen und Hausanschlussleitungen sowie die Rücklaufleitung der Erzeuger, Formel 3.6 für die Rücklaufleitungen der Hausanschlüsse empfohlen.

$$n_{\Delta T} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{2,6} \quad (3.5)$$

$$n_{\Delta T} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{2,2} \quad (3.6)$$

Aufgrund der großen Zahl an Messpunkten konnten mit den vorliegenden Messwerten Näherungskollektive berechnet werden. Aus den Messwerten der Netzdienste-Rhein-Main wurden mit den Korrekturfaktoren f_f (Formel 3.2) und f_d die Temperaturkollektive unter Anwendung von Formel 3.7 auf eine Betriebszeit von 30 Jahren extrapoliert.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

$$n_{\Delta T,30} = n_{\Delta T} \cdot f_f \cdot f_d \cdot 30 \quad (3.7)$$

$n_{\Delta T,30}$ = Anzahl Temperaturschwingspiele in 30 Jahren

$n_{\Delta T}$ = Anzahl Temperaturschwingspiele aus Messungen

Aus den ermittelten Langzeitkollektiven wurde mittels linearer Regression eine Näherungsgleichung, getrennt nach Erzeugern und Verbrauchern für Vor- und Rücklauf, erstellt. Die resultierenden vier Näherungskurven wurden aufgrund von ähnlichen Parametern auf zwei Kurven reduziert. Die Formeln 3.8 und 3.9, welche nachfolgend als Trend-NRM bezeichnet werden, beschreiben die ermittelten Näherungskurven. Formel 3.8 beschreibt das Temperaturkollektiv am Vorlauf von Erzeugern und Verbrauchern sowie am Rücklauf der Erzeuger. Formel 3.9 beschreibt das Temperaturkollektiv am Rücklauf der Verbraucher.

$$n_{\Delta T} = 5 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{1,9} \quad (3.8)$$

$$n_{\Delta T} = 1,2 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{1,8} \quad (3.9)$$

In den Abbildungen 3.13, 3.14, 3.15 und 3.16 sind die Punktwolken der Lastkollektive, die angepassten Näherungskurven sowie die Best-Fit Kurven aus den Untersuchungen der IEA mit den zugehörigen Formeln abgebildet.

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

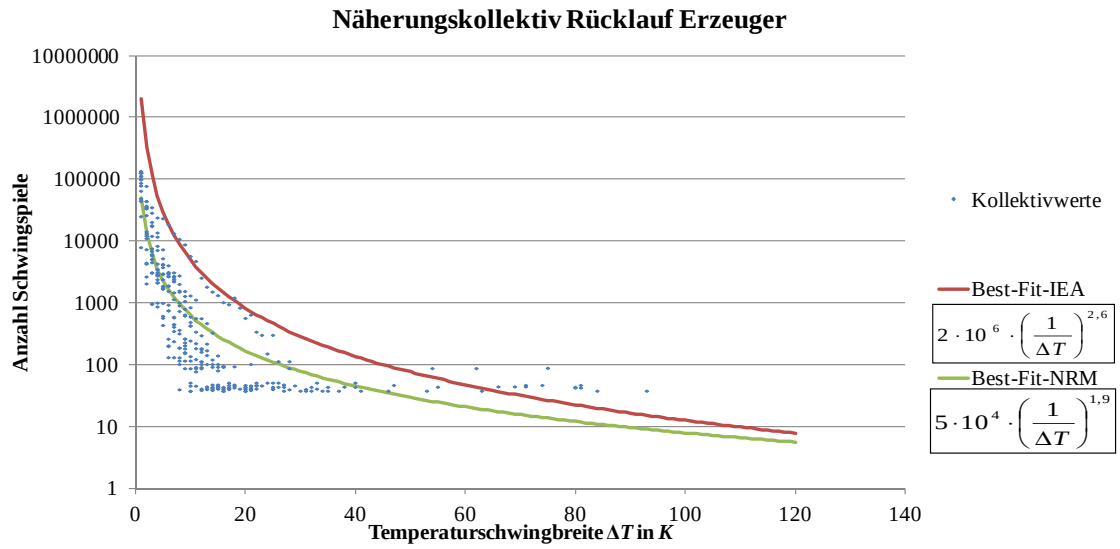


Abbildung 3.13: Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Rücklaufleitungen der Erzeuger

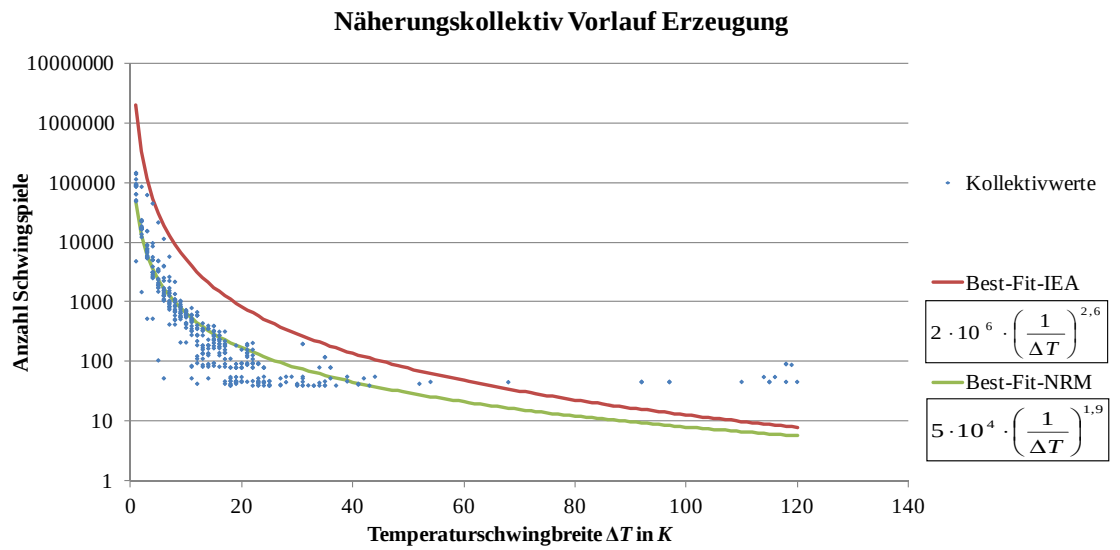


Abbildung 3.14: Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Vorlaufleitungen der Erzeugung

3 Untersuchung von Betriebskollektiven

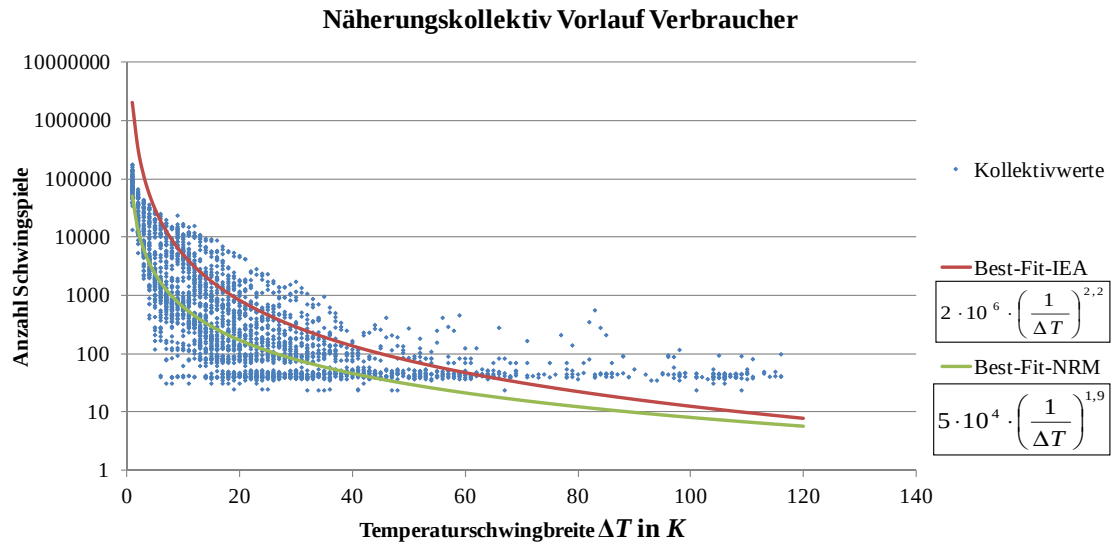


Abbildung 3.15: Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Vorlaufleitungen der Verbraucher

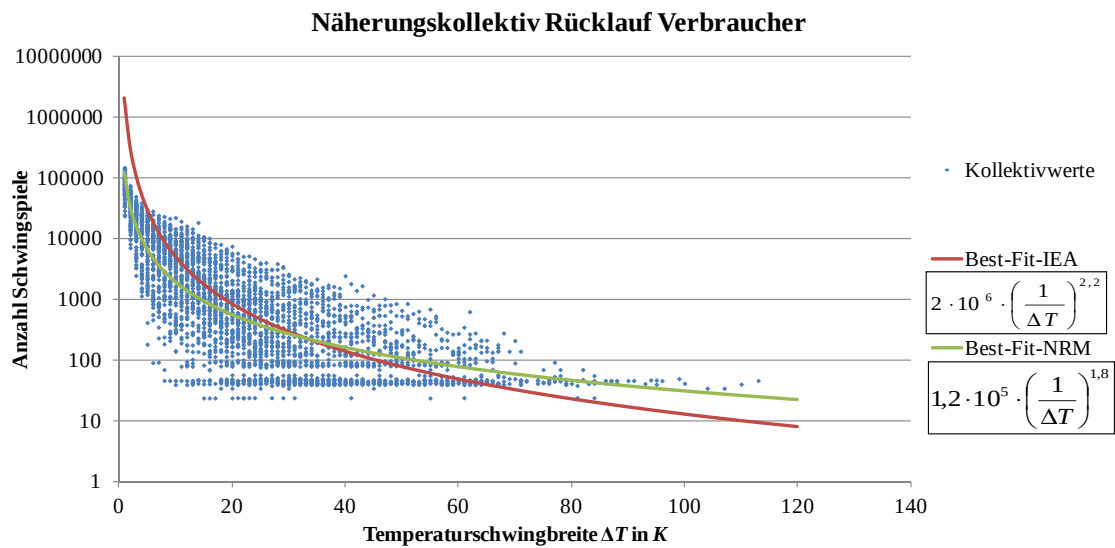


Abbildung 3.16: Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Rücklaufleitungen der Verbraucher

4 Auslegung nach Volllastwechseln

Das Ziel der Anforderung aus DIN EN 13941 an eine Tragfähigkeit gegen 1000 gleichwertige Volllastwechsel ist es, eine sichere Auslegung einer Trasse bei einer Gebrauchsdauer von 30 Jahren zu gewährleisten. Da durch die geplanten Veränderungen in der Energieversorgung auch mit Veränderungen bei den auftretenden Temperaturwechseln zu rechnen ist, soll die Auslegung nach Volllastwechseln überprüft werden. Untersucht werden soll hier insbesondere, wie die Anforderungen gezielt angepasst werden können, um den wechselnden Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

4.1 Parameter der Volllastwechselberechnung

Die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel als Kriterium zur Berechnung der Gebrauchsdauer muss kritisch betrachtet werden, da das Ergebnis einer Volllastwechselberechnung in Abhängigkeit zur verwendeten Temperaturhistorie, der angewendeten σ N-Kurve und den Auslegungsparametern der Rohrstatik [16, 17] steht. Welche Abweichungen bei Verwendung unterschiedlicher Wöhlerkurven und Betriebsparameter auftreten, soll nachfolgend ermittelt werden.

Die folgenden Fragen sind hierbei von Bedeutung:

- Welcher Versagenszustand ist der Maßgebende? Ist es die Ermüdung von Abzweigen und Rohrbögen oder das Versagen des PUR-Schaums?
- Welche Temperaturdifferenz ΔT_{ref} wurde bei der Auslegung verwendet?
- Welches Temperaturkollektiv wird angenommen? Ein Einheitskollektiv, also die Anforderungen aus DIN EN 13941, oder ein Näherungskollektiv aus Messungen oder Schätzungen?
- Welche Wöhlerkurve wurde verwendet?

Die oben gestellten Fragen sollen, unter Betrachtung einiger bei der Auslegung einer Fernwärmetrasse relevanten Parameter, untersucht werden.

Grenzkriterium der Auslegung

Bei der Auslegung einer Fernwärmetrasse gegen Ermüdung stellt ab einer Nennweite von DN100 der PUR-Schaum die maßgebende Größe für den Ermüdungsnachweis [1] dar. Die Ermüdung des Stahlrohrs ist somit nur bei kleineren Nennweiten das Grenzkriterium einer Auslegung. Da Hausanschlussleitungen besonders hohen Belastungen ausgesetzt sind und diese eher mit Nennweiten unter DN100 ausgeführt werden, bleibt die Stahlermüdung in den folgenden Betrachtungen maßgebend.

Temperatur

Die an einem Bogen auftretende Spannungsschwingbreite ist bei gleichbleibenden statischen Parametern nur von der Verschiebung der Leitung abhängig. Diese wird von der Schenkellänge, der wirksamen Temperaturdifferenz, dem Bettungsmaterial und der Überdeckungshöhe bestimmt. Als maximale Verlegelänge wird die Leitungslänge zwischen zwei Dehnungsschenkeln bezeichnet, bei denen die Leitung nicht durch Primär- oder Sekundäreinwirkung versagt.

Betrachtet man die Ermüdung des Stahlrohres als Grenzzustand der Auslegung, so hängt die maximale Verlegelänge bei ansonsten identischen statischen Parametern nur von der verwendeten Wöhlerkurve ab. Durch Verringerung von ΔT_{ref} verändert sich die maximale Verschiebung und damit auch die resultierenden Spannungen an Bögen und Abzweigen. Wird bei veränderlicher Temperatur mit maximaler Verlegelänge gerechnet, so bleibt die Gesamtverschiebung und damit die auftretenden Spannungen gleich. Ob der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften des Verbundrohres und des Bettungsmaterials auf diese Art und Weise ignoriert werden kann, bleibt zu untersuchen.

4.2 Wöhlerkurven

Es stehen verschiedene Wöhlerkurven zur Verfügung. Dabei wird zwischen geschweißten und ungeschweißten Bauteilbereichen unterschieden. Die Formeln der σN -Kurven für ungeschweißte Bereiche aus den Regelwerken der AD [4], des AGFW [1] und der CEN-TC 107 [6] sind nachfolgend aufgeführt:

FW401

$$\Delta\sigma = 15600 \cdot N^{-\frac{1}{3,2}} \quad (4.1)$$

DIN EN 13941

$$\Delta\sigma = 5000 \cdot N^{-\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

AD2000S2:2012

$$\Delta\sigma = 40000 \cdot N^{-\frac{1}{2}} + 0,55 \cdot R_m - 10 \quad (4.3)$$

N = Schwingspielzahl

R_M = Zugfestigkeit in N/mm²

Die Neigung der Wöhlerkurve verändert die Gewichtung der Amplituden an der Summe gleichwertiger Vollastwechsel. Wie in Abbildung 4.1 gut zu erkennen ist, senkt ein hoher Exponent den Anteil kleiner und mittlerer Schwingbreiten an der Schadenssumme. Markl kam in seinen Bauteilversuchen [12, 13] zu dem Schluss, dass Schwingungen mit großer Amplitude die Lebensdauer von Bögen stärker beeinflussen als solche mit kleiner, daher

4 Auslegung nach Vollastwechseln

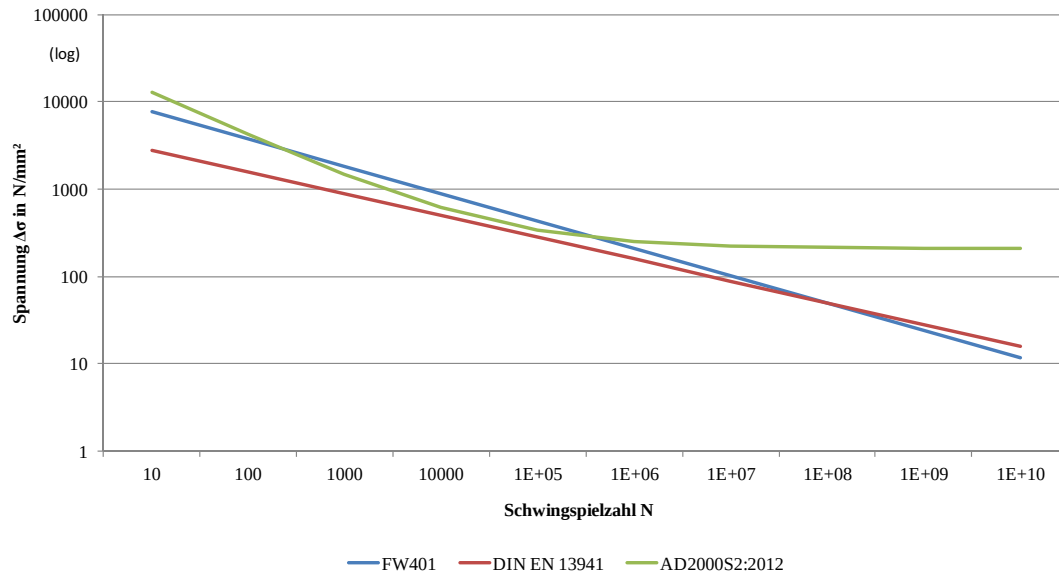


Abbildung 4.1: Vergleich der Wöhlerkurven

Tabelle 4.1: Maximale Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bauteilbereiche unterschiedlicher Leitungstypen.

Leitungstyp	γ_{fat}	N_{Anriss}	AD2000	EN13941	FW401
			$\Delta\sigma$ in N/mm^2		
Haupttransportleitung	10	1000	1510	889	1825
Verteilleitung	6,67	1670	1238	782	1555
Hausanschlussleitung	5	5000	843	595	1103

legte Markl $m = 5$ fest. In [17] wurde sich dieser Meinung angeschlossen, jedoch mit einem etwas höherem Anteil kleiner Schwingbreiten.

Eine Berechnung der maximalen Vergleichsspannungsschwingbreite mit den Anforderungen aus [6] bei verschiedenen Schwingspielzahlen für ungeschweißte Bauteilbereiche ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Dabei wurde jedem Leitungstyp der Sicherheitsfaktor γ_{fat} entsprechend FW401 Teil 10 [1] zugeordnet. Die Berechnung erfolgte dann mit den Formeln 2.7 und 2.8.

Die so ermittelten maximalen Spannungsschwingbreiten können nicht direkt miteinander verglichen werden, da bei der Berechnung nach AD2000 Richtlinie noch Korrekturfaktoren ermittelt werden müssen, welche von dem verwendeten Kollektiv abhängig sind. Die maximale Spannungsschwingbreite ist ein Maß für die zulässige Verlegelänge einer Leitung. Dabei sollte beachtet werden, dass in Tabelle 4.1 ungeschweißte Bauteilbereiche betrachtet werden und durch die Betrachtung von Schweißnähten die Verlegelänge noch

verkürzt werden könnte. In [6] wird, um den Ermüdungsnachweis einfacher zu gestalten, für geschweißte und ungeschweißte Bereiche die gleiche Kurve angewendet.

AD2000S2:2012

Um die Kurve aus dem aktuellen Merkblatt AD2000S2:2012 [4] der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter mit den Kurven der anderen Regelwerke vergleichen zu können, müssen verschiedene Korrekturfaktoren berechnet werden. Diese sind:

- f_m zur Berücksichtigung der Mittellastempfindlichkeit
- f_t für den Temperatureinfluss
- f_0 für Einfluss der Oberflächenrauigkeit
- f_d für die Wanddicke.

Bei den Kurven aus DIN EN 13941 und FW401 Teil 10 sind diese Werte bereits in den Kurven berücksichtigt. Die in Kapitel 3 dargestellten Messwerte der NRM dienen zusammen mit den Anforderungen aus DIN EN 13941 an die Schwingspielzahl als Grundlage der eigenen Berechnungen. Nachfolgend sollen die verwendeten Formeln dargestellt werden. Die Ergebnisse der Berechnung können Tabelle 4.2 entnommen werden.

Die maximale Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma^*$ ergibt sich zu:

$$2\sigma_a = \Delta\sigma^* = 40000 \cdot N^{-\frac{1}{2}} + 0,55 \cdot R_m - 10 \quad (4.4)$$

Die Korrekturfaktoren werden dann gemäß Formel 4.5 angewendet.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma^*}{f_0 \cdot f_d \cdot f_M \cdot f_{T^*}} \quad (4.5)$$

Die wirksame Temperatur ΔT^* eines Lastzyklus setzt sich dabei aus der höchsten Temperatur $\hat{T}$ und der tiefsten Temperatur $\check{T}$ eines Schwingspiels gemäß Formel 4.6 zusammen.

$$T^* = 0,75 \cdot \hat{T} + 0,25 \cdot \check{T} \quad (4.6)$$

Für $100 \text{ K} \leq T^* \leq 600 \text{ K}$ wird der Korrekturfaktor f_{T^*} durch die Formel 4.7 bestimmt.

$$f_{T^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^* - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{*2} \quad (4.7)$$

Bei einer Temperaturschwingbreite von $\Delta T = 110 \text{ K}$ ergibt sich mit $T_B = 130 \text{ K}$ und $T_M = 10 \text{ K}$ ein Wert für T^* von 100 K was in $f_{T^*} = 1$ resultiert.

Der Oberflächeneinfluss wird in Abhängigkeit von der Rautiefe R_Z , der Lastspielzahl N und der Zugfestigkeit R_M nach Formel 4.8 ermittelt.

$$f_0 = F_0^{\frac{0,343 \cdot \ln N - 2}{4,301}} \quad (4.8)$$

4 Auslegung nach Vollastwechseln

$$F_0 = 1 - 0,056 \cdot (\ln R_Z)^{0,64} \cdot \ln R_m + 0,289 \cdot (\ln R_Z)^{0,53} \quad (4.9)$$

Für die Rohre wurde eine Rautiefe von $R_Z = 200 \mu\text{m}$ angesetzt mit $R_m = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Für die Ermittlung des Korrekturfaktors f_M wird die Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ benötigt. Diese ergibt sich nach der Tresca-Hypothese bei einachsiger Belastung zu:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{1}{2}(\sigma_d + \sigma_z) \quad (4.10)$$

Die Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ wurde an einem geraden Rohr mit voller Einspannung in axialer Richtung bestimmt. Als Kollektivwerte dienten die Messwerte der NRM (siehe Kapitel 3). Dabei wurde f_M für jedes Schwingspiel ermittelt und der Mittelwert über alle Werte gebildet. Die Druckspannung am warmen Rohr ergibt sich zu:

$$\sigma_d = \begin{cases} -R_e(T^*) & \text{für } R_e(T^*) < \Delta\sigma \\ -\Delta\sigma & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

Die Zugspannung beim Abkühlen folgt aus:

$$\sigma_z = \Delta\sigma - R_e(T^*) \quad (4.12)$$

mit

$$\Delta\sigma = \alpha(T^*) \cdot \Delta T \cdot E(T^*) \quad (4.13)$$

Der Korrekturfaktor f_M wird im Bereich $-R_{p0,2/T^*} \leq \bar{\sigma}_v \leq \frac{\sigma_a}{1+M}$ mit der folgenden Formel ermittelt:

$$f_M = \frac{1+M/3}{1+M} - \frac{M}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_a} \quad (4.14)$$

und im Bereich $\frac{\sigma_a}{1+M} \leq \bar{\sigma}_v \leq R_{p0,2/T^*}$ zu

$$f_m = \frac{1+M/3}{1+M} - \frac{M}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_a} \quad (4.15)$$

Der Faktor M, wird in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit R_M , nach folgender Formel berechnet:

$$M = 0,00035 \cdot R_m - 0,1 \quad (4.16)$$

Die Bestimmung der Korrekturfaktoren erfolgte mit den temperaturabhängigen Materialkennwerten aus [1]. Die verwendeten Werte und Formeln sind:

4 Auslegung nach Vollastwechseln

Tabelle 4.2: Korrekturfaktoren AD2000S2:2012

Faktor	Vorlauf Verbraucher	Rücklauf Verbraucher
f_M	1,053	1,045
f_{T^*}	1	1,0002
f_0	0,802	0,724

Wärmeausdehnungskoeffizient α_T in [1/K] mit T in °C

$$\alpha_T = 11,4 + \frac{T[^\circ\text{C}]}{129} \cdot 10^6$$

Streckgrenze R_e in [N/mm²]

Bereich $20^\circ\text{C} \leq T \leq 50^\circ\text{C}$

$$R_e = 235$$

Bereich $50^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$

$$R_e = 235 - 0,046(T[^\circ\text{C}] - 50)$$

Bereich $100^\circ\text{C} \leq T \leq 140^\circ\text{C}$

$$R_e = 212 - 0,27(T[^\circ\text{C}] - 100)$$

Elastizitätsmodul

$$E_T = \left(21,4 - \frac{T[^\circ\text{C}]}{175} \right) \cdot 10^4$$

Durch den konstanten Faktor $-0,55R_m + 10$ weicht die Kurve aus [4] von anderen Kurven ab. Damit eine ähnlich einfache Anwendung wie mit den Standardkurven möglich ist, muss diese angepasst werden. Die Formel nach dem AD Merkblatt [4] lautet:

$$N = \left(\frac{4 \cdot 10^4}{\Delta\sigma^* - 0,55R_m + 10} \right)^2 \quad (4.17)$$

Durch Zusammenfassen und Umstellen ergibt sich mit $0,55R_m + 10 = \beta$ und mit

$$\frac{\Delta\sigma^*}{f_0 \cdot f_d \cdot f_M \cdot f_{T^*}} = \Delta\sigma^* \cdot \gamma \quad (4.18)$$

die mit der Temperaturschwingbreite ΔT ertragbare Schwingspielzahl N gemäß Formel 4.17. Dabei wird ein linearer Zusammenhang zwischen der auftretenden Temperatur und der Spannung angenommen.

$$N = \frac{k}{c\gamma(\Delta T - \beta/c\gamma)} \quad (4.19)$$

Mit den Ergebnissen aus [16] kann die Anzahl gleichwertiger Vollastwechsel dann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^2} \cdot \sum n_i \cdot (\Delta T - \beta/c\gamma)^2 \quad (4.20)$$

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Volllastwechselberechnung mit den Kollektiven *Trend NRM*

$\Delta T_{\text{ref}} = 120 \text{ K}$	AD2000	FW401	EN13941
Exponent m	2	3,2	4
Rücklauf Verbraucher	698	1096	825
Vorlauf Verbraucher	266	295	220

Dabei müssen Schwingspiele im dauerfesten Bereich entsprechend dem Regelwerk der AD [4] ignoriert werden. Der Faktor c ergibt sich aus der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{max}}$ bei maximaler Verschiebung durch:

$$c = \frac{\Delta\sigma_{\text{max}}}{\Delta T_{\text{ref}}} \quad (4.21)$$

In den Berechnungen wurde $\Delta\sigma_{\text{max}}$ mit den Anforderungen an die zulässigen Volllastwechsel aus DIN EN 13941 ermittelt (siehe Tabelle 4.1)

4.3 Vergleich der Kurven

Berechnet man die Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel mit den Näherungskollektiven *Trend NRM* und $\Delta T = 120 \text{ K}$, so ergeben sich die in Tabelle 4.3 dargestellten Volllastwechselzahlen. Dabei bleibt die Frage offen, wie die Anforderungen an die ertragbaren Volllastwechsel bei Anwendung unterschiedlicher Wöhlerkurven und Betriebstemperaturen modifiziert werden sollten. Um zu untersuchen, wie sich die Ergebnisse verschiedener Wöhlerkurven unter Anwendung von Betriebskollektiven darstellen, wurde mit den Messwerten der NRM aus Kapitel 3 die gleichwertigen Volllastwechsel mit abweichenden Parametern erneut berechnet und mit den vorherigen Ergebnissen verglichen. In Tabelle 4.4 ist ein Auszug der Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 4.4: Vergleich der Volllastwechsel bei Anwendung unterschiedlicher Parameter

$\Delta T =$	110 K	120 K	Abweichung	
Messpunkt	m = 4	m = 3	Absolut	relativ
8313 VL	1,8255	1,8554	0,03	0,016
8807 VL	9,9846	9,9188	-0,07	-0,01
8833 RL	0,6738	0,6673	-0,01	-0,01
7604 RL	0,0022	0,0130	0,011	4,907
7642 RL	0,0022	0,0136	0,011	5,123
8802 RL	0,0111	0,0804	0,069	6,258
8730 VL	2,6146	2,0485	-0,566	-0,216

5 Analyse der Ergebnisse

In Kapitel 3 wurde die Möglichkeit aufgezeigt, aus Messwerten mit einer niedrigen Messfrequenz die Gebrauchsdauer von Fernwärmeleitungen zu ermitteln. Dabei konnte für einzelne Messpunkte die Anforderungen aus DIN EN 13941 an eine Auslegung gegen 1000 gleichwertige Volllastwechsel bestätigt werden. Allerdings ist zu beachten, dass es zwischen den Messpunkten erhebliche Unterschiede gibt. Die zehn höchstbelasteten Rückläufe der Verbraucher erreichen in Summe 7520 Volllastwechsel, während die anderen 72 Messpunkte in Summe 6000 Volllastwechsel durchlaufen. Von diesen 72 Messpunkten ist keiner mehr als 400 Volllastwechseln ausgesetzt. Bei den aktuellen Netzbedingungen bedeutet dies, für über 85 % der Messpunkte, eine erhebliche Sicherheit gegen Ermüdung.

Verschiedene Faktoren führen zu Ungenauigkeiten bei den Berechnungen. So ist unklar, ob eine lineare Regression der Messfrequenz dem Abfall gleichwertiger Volllastwechsel gerecht wird und wie stark der Ausfall der Monate März und April das Ergebnis der Berechnung beeinflusst. Weiterhin stellt sich die Frage, wie sehr die allgemeine Annahme von $\Delta T_{ref} = 120 \text{ K}$ das Ergebnis der Volllastwechselberechnung verändert. Wird die Auslegungstemperatur zu hoch angenommen, kommt es zu einer Verringerung der Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel in den Berechnungen, da sich die Gewichtung der Temperaturschwankungen verändert. Abbildung 5.1 zeigt die Ergebnisse einer Volllastwechselberechnung unter Anwendung eines Kollektivs nach Formel 3.9 mit variierenden Auslegungstemperaturen ΔT_{ref} und einer maximalen Temperaturschwingbreite $\Delta T_{max} = 90 \text{ K}$. Aus dem Verlauf der Volllastwechselzahlen in Abbildung 5.1 zeigt sich der starke Einfluss der Neigung der Wöhlerkurve. Da ein Großteil der Messpunkte, im Vergleich zu den Anforderungen aus DIN EN 13941, eher niedrige Volllastwechselzahlen aufweist, ist durch eine Veränderung von ΔT_{ref} nicht mit einer relevanten Veränderung der Ergebnisse zu rechnen.

Die Messwerte aus München zeigen geringere Verschiebungen als nach der Auslegungsrechnung zu erwarten war. Höhere Reibwerte des Bettungsmaterials und geringere Betriebstemperaturen im Vergleich zur Rohrstatik sowie ein gekrümmter Trassenverlauf könnten die Ursache sein. Ein Vergleich zwischen den durch eine Rainflow-Zählung ermittelten Temperaturschwingspielen und den Verschiebungsschwingspielen zeigt einen auffälligen Unterschied zwischen diesen Messwerten. Ob die Verschiebungsmessung mittels Extensometer geeignet ist, um Aussagen über das Ermüdungsverhalten von Fernwärmeleitungen zu treffen, wird durch weitere Untersuchungen gezeigt werden müssen.

Das Auskühlen einer Leitung bei ausbleibendem Wärmebedarf konnte gemessen werden. Die Ermittlung gleichwertiger Volllastwechsel zeigt, dass eine Fernwärmeleitung durch diesen Vorgang einer erheblichen Zusatzbelastung ausgesetzt ist. Allerdings ist mit großen Ungenauigkeiten aufgrund der Kürze der Messungen zu rechnen. Der HAL in München liegt mit 114 Volllastwechseln an der Vorlaufleitung zwar leicht über dem aus

5 Analyse der Ergebnisse

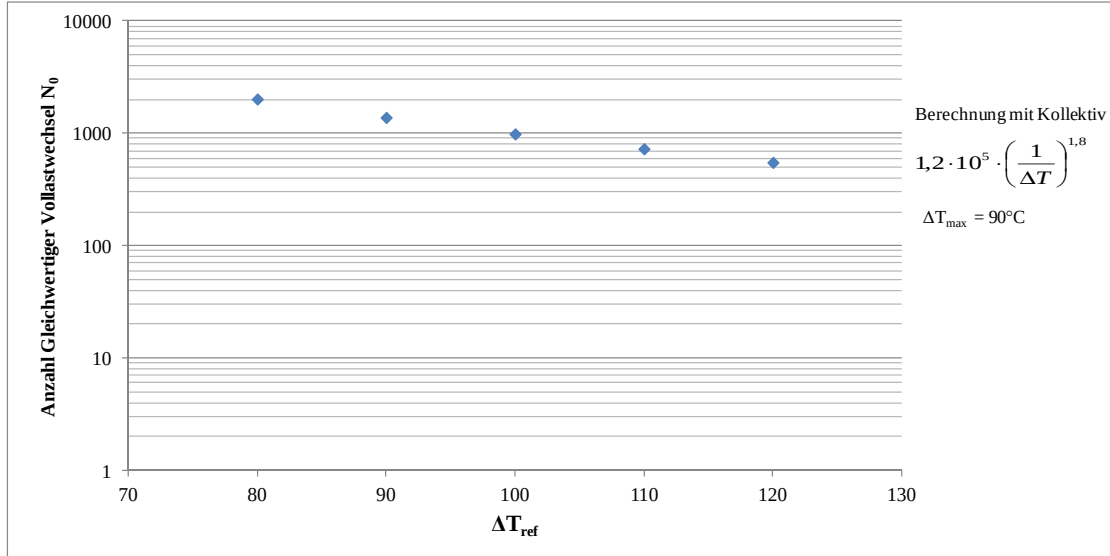


Abbildung 5.1: Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel bei Verwendung der Näherungskurve Trend-NRM RL und variierendem ΔT_{ref}

Tabelle 5.1: Darstellung der Volllastwechselberechnung mit $m = 3, 2$ und $\Delta T_{ref} = 120$ K, aus den Näherungskurven und die Anforderungen aus DIN EN 13941.

Verbraucher Rücklauf	N_0	Erzeugung/Versorgung	N_0
Trend-NRM	1096	Trend-NRM	295
IEA	3225	IEA	593
DIN EN 13941	1000	DIN EN 13941	250

den Messwerten der NRM ermittelten durchschnittlichen Wert von 85, liegt allerdings immer noch weit unter den Anforderungen an 250 ertragbare Volllastwechsel aus [6]. Die regelmäßige Auswertung der Messwerte zur Erweiterung des Wissens um das Langzeittragverhalten von Fernwärmeleitungen ist geplant, insbesondere da keine kontinuierlichen Messungen an flexiblen Rohrleitungen zur Verfügung stehen. Der Messpunkt in München bietet die Chance, das Wissen um die Gebrauchsdauer von Hausanschlussleitungen zu erweitern und somit die kosteneffiziente Auslegung neuer Leitungen zu verbessern.

5.1 Näherungskollektive

Aufgrund der Vielzahl der Messwerte wurden aus den ermittelten Temperaturkollektiven Näherungskurven zur Beschreibung der im Mittel auftretenden Temperaturschwankungen bestimmt. Eine Berechnung der äquivalenten Volllastwechsel nach FW401 mit den Schwingspielen aus den Kurven *Trend-NRM* und *Best-Fit IEA* im Vergleich zu den Anforderungen aus [6] ist in Tabelle 5.1 einsehbar. Aus den Ergebnissen der Berech-

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Volllastwechselberechnung mit den Kollektiven *Trend NRM* bei Anwendung von $\Delta T_{max} = 80$ K

$\Delta T_{ref} = 80$ K	AD2000	FW401	EN13941
Exponent m	2	3,2	4
Rücklauf Verbraucher	431	1524	1149
Vorlauf Verbraucher	385	427	319

nung ist die gute Übereinstimmung der Kurve *Trend-NRM* mit den Anforderungen aus DIN EN 13941 an die ertragbare Volllastwechselzahl erkennbar.

Bei der Verwendung von Näherungskollektiven muss überlegt werden, ob für jede Auslegungstemperatur eine eigenes Kollektiv erstellt werden muss, oder ob ein Kollektiv auch für andere Temperaturen geeignet ist. Eine Berechnung der Volllastwechselzahlen bei abweichenden Auslegungstemperaturen zeigt: Auch bei Begrenzung der maximalen Amplitude auf $\Delta T_{max} = \Delta T_{ref}$ ist das Ergebnis der Volllastwechselberechnung höher als bei Verwendung von $\Delta T_{ref} = 120$ K (siehe Tabelle 5.2). Dabei ist fraglich, ob bei Betriebstemperaturen von 90°C Schwingspiele mit $\Delta T = 80$ K, mit einer größeren relativen Häufigkeit auftreten als bei Betriebstemperaturen höher als 90 °C .

Um die Näherungskollektive *Best Fit IEA* und *Trend NRM* auch bei anderen Auslegungstemperaturen anwenden zu können, wird eine Anpassung der Volllastwechselberechnung bei Verwendung eines allgemeinen Näherungskollektivs vorgenommen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass Schwingspiele mit der Schwingbreite ΔT_{ref} bei allen Auslegungstemperaturen mit gleicher Wahrscheinlichkeit und damit mit gleicher Häufigkeit auftreten. Aus den Näherungskurven werden dann keine Schwingspielzahlen mit bestimmter Temperaturschwingbreite ermittelt, sondern mit dem Anteil zur maximalen Temperaturschwingbreite.

Die Berechnung der Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel bei Verwendung eines Näherungskollektivs und Variation von ΔT in Schritten von ein Kelvin erfolgt dann mit Formel 5.1.

$$N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^m} \cdot \sum n_i \cdot \left(\frac{\Delta T_{ref}}{120K} \Delta T \right)^m \quad (5.1)$$

Dies führt zu gleichen Volllastwechselzahlen bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen ΔT_{ref} und ermöglicht die Verwendung des Näherungskollektivs bei anderen Auslegungstemperaturen. Die aus den Messwerten gewonnenen Näherungskurven Trend-NRM bieten somit die Chance die Ermüdungsfestigkeit von Fernwärmeleitungen genauer zu untersuchen, insbesondere als Grundlage zur Erstellung von Standardkollektiven für Auslegungsrechnungen und Bauteilversuche.

5.2 Volllastwechsel

Eine Auslegung nach der Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel ermöglicht eine schnelle und einfache Auslegung einer Trasse. Allerdings sollte beachtet werden, dass die An-

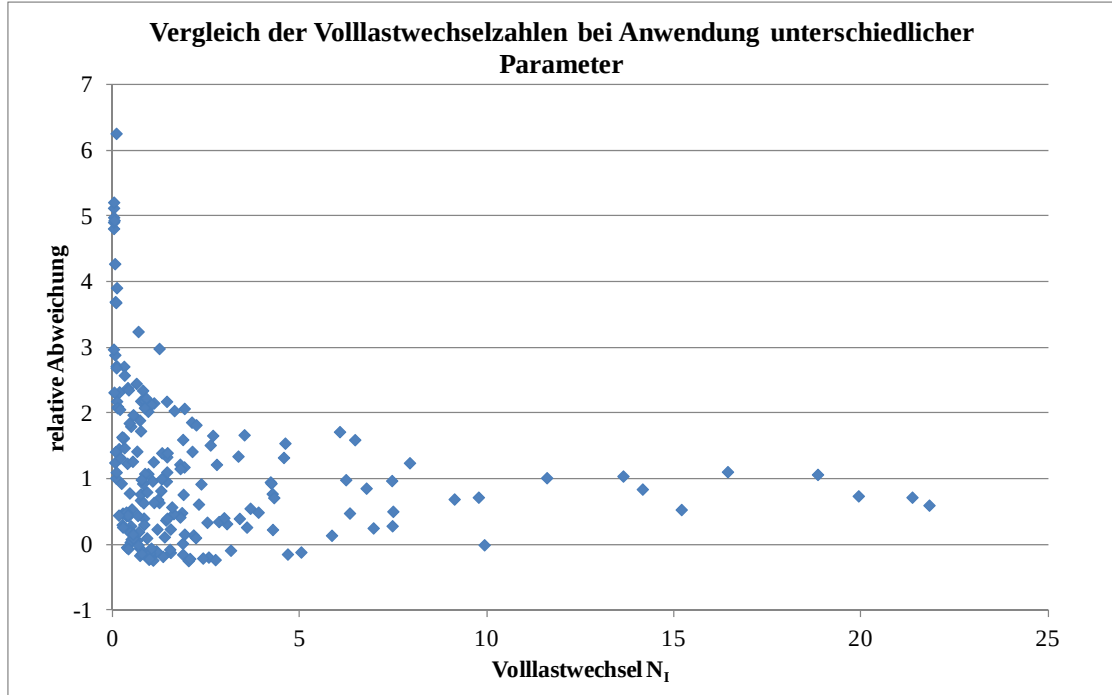


Abbildung 5.2: Vergleich der Volllastwechselzahlen FW401 Teil 10 - DIN EN 13941 für ungeschweißte Bauteilbereiche aus den Messwerten der NRM

zahl gleichwertiger, aus Temperaturschwankungen resultierender Volllastwechsel immer von den verwendeten Randbedingungen abhängig ist. Bei Verwendung unterschiedlicher Wöhlerkurven oder Betriebstemperaturen kann es zu erheblichen Abweichungen bei der Auslegung einer Trasse kommen. Betrachtet man die Ergebnisse der Volllastwechselberechnung in Tabelle 5.2, so würde aus der Forderung an 1000 ertragbare Volllastwechsel und unter Verwendung der Kurve aus AD2000S2 [4] die doppelte Gebrauchsdauer der Leitung resultieren. Eine Anpassung der Anforderungen ist möglich, allerdings liefern die Regelwerke [1, 6, 4] keine Hinweise wie diese erfolgen muss, um bei abweichenden Wöhlerkurven oder Betriebstemperaturen brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Ein Vergleich zwischen den ermittelten Volllastwechselzahlen bei Anwendung der in [6] geforderten Parameter und den Ergebnisse aus Kapitel 3 ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Schwierigkeit bei der Bewertung unterschiedlicher Berechnungen ist gut zu erkennen. Eine gezielte Anpassung der Anforderung an die Tragfähigkeit der Leitungen, um geänderten Netzbedingungen wie beispielsweise einem sinkenden Wärmebedarf und vermehrten Temperaturschwankungen gerecht zu werden, ist Anhand gleichwertiger Volllastwechsel nur schwer möglich.

Um einheitliche Gebrauchsdauern auch bei unterschiedlichen Berechnungsparametern zu erreichen, können Näherungskollektive verwendet werden. Diese bieten eine Möglichkeit zur gezielten Anpassung der Gebrauchsdauer. Somit können weitere Einflüsse, wie zusätzliche Temperaturschwankungen aufgrund von solarer Einspeisung, Nachtab-

5 Analyse der Ergebnisse

Tabelle 5.3: Bewertung der Auslegung nach gleichwertigen Volllastwechseln und Näherungskollektiven

Kriterium	gleichwertige Volllastwechsel	Näherungskollektiv
Anpassbarkeit	+	++
Aussagekraft	--	++
einfache Anwendbarkeit	++	+
Sicherheit	o	o

senkung und andere Faktoren berücksichtigt werden. Mit weiteren Untersuchungen an entsprechenden Rohrabschnitten kann durch das Erstellen von Standardkollektiven die Verwendung anderer Auslegungstemperaturen und Wöhlerkurven vereinfacht und eine genauere Auslegung von Fernwärmeleitungen ermöglicht werden. Ein Vergleich der Berechnungsansätze ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Dabei wurden verschiedene Kriterien gegenübergestellt.

Da die Sicherheit einer Auslegung von der Kenntnis der auftretenden Temperaturschwankungen, der daraus resultierenden Belastungen und der Genauigkeit des Ermüdungsnachweises abhängig ist, kann in dieser Hinsicht keines der beiden Verfahren dem anderen vorgezogen werden. Betrachtet man die Auslegung mit Standardkollektiven, so bedeutet dies einen höheren Aufwand, da erst eine Vielzahl von Messungen erfolgen muss, um Kollektive zu bilden und die erforderlichen Berechnungen umfangreicher werden. Allerdings steigt die Aussagekraft der Auslegung, denn diese erfolgt gegen eine vorgegebene betriebsnahe Belastung und nicht gegen ein Einheitskollektiv, welches von den verwendeten Berechnungsparametern abhängig ist. Gleichwertige Volllastwechsel, als Grenzkriterium einer Auslegung, sind zwar grundsätzlich leichter zu modifizieren, allerdings existieren keine Regeln, um bei der Verwendung anderer Wöhlerkurven gleichwertige Ergebnisse zu erhalten und somit eine gezielte Anpassung der Tragfähigkeit vorzunehmen.

6 Rainflow-Algorithmus

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde der Rainflow-Algorithmus nach [3] in Form einer PHP-basierten Anwendung programmiert. Diese soll den Mitgliedern des AGFW online zur Verfügung gestellt werden.

Es können Messreihen hochgeladen werden, um die Rainflow-Zählmethode auf diese anzuwenden. Nach dem Hochladen einer Datei erfolgt die Darstellung der Eingabewerte in einem Diagramm, die Ausgabe der Anzahl gleichwertiger Volllastwechsel nach FW401 Teil 10 sowie eine Übersicht der Ergebnisse der RF-Zählung in Form einer Mittelwert-Amplituden-Matrix. Ein Beispiel der Ausgabe ist in den Abbildungen 6.1 und 6.2 dargestellt. Die Schwingungspaare der Rainflow-Zählung werden als CSV-Datei (comma-separated values) bereitgestellt. Für die Berechnung der gleichwertigen Volllastwechsel werden folgende Werte angesetzt: $\Delta T_{ref} = 120 \text{ K}$ und $m = 3,2$. Der Kern des PHP-Codes ist im Anhang einsehbar.

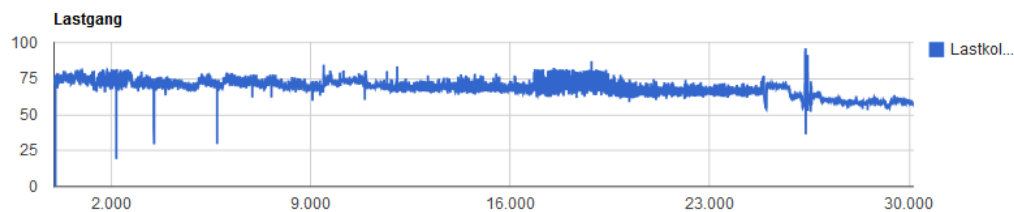


Abbildung 6.1: Darstellung der Messwerte

Dateiformat

Übergeben werden muss eine Tabstob-separierte Textdatei (.txt) mit zwei Spalten ohne Überschrift. Der Eintrag aus Spalte eins wird bei der Rainflow-Zählung als Ausgabewert mitgeführt. Dadurch bleiben Zeit und Reihenfolgeinformationen der Schwingspiele erhalten. In den Abbildungen 6.3 und 6.4 sind Beispiele für mögliche Einträge der Spalten gegeben.

10.12.2013 10:24:06	80,4
10.12.2013 10:25:06	75,6
10.12.2013 10:26:06	87,3

Abbildung 6.3: Beispiel 1: Dateiformat

6 Rainflow-Algorithmus

Amplitude/Mittelwert	10	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
0	0	1	22	28	84	197	228	178	54	59	36	55	78	204	259	306	386	385
1	0	0	7	1	25	26	36	34	10	13	18	38	96	262	271	265	353	270
2	0	0	0	1	0	5	5	4	2	1	5	12	41	174	123	114	190	93
3	0	0	0	1	0	0	2	0	2	0	1	1	16	98	73	33	74	47
4	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	29	46	13	33	33
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	28	12	9	24
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	11
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 6.2: Amplituden-Mittelwert-Matrix der RF-Zählung

```

123    96,7744
124    75,564876
125    84,47576

```

Abbildung 6.4: Beispiel 2: Dateiformat

CSV Datei

Die Ausgabe der Rainflow-Zählung erfolgt im CSV Format. Schwingspiele, welche aus dem Residuum gebildet wurden, werden mit dem Index R gekennzeichnet. Diese stellen offene Hystereseschleifen dar und werden bei einer Gebrauchsdauerberechnung nur zu 50% gewertet.

```

96,7769    96,74123    03.01.2006 11:45    03.01.2006 12:45
97,86797    100,31592    03.01.2006 15:15    03.01.2006 15:30
97,99957    99,63457    03.01.2006 16:15    03.01.2006 16:30
100,30334    100,10074    03.01.2006 17:45R    03.01.2006 18:00R

```

Abbildung 6.5: Beispiel: Ausgabeformat

Der Algorithmus wurde so erweitert, dass die Zeitpunkte der Schwingspiele und damit die Reihenfolge der Belastung erhalten bleibt.

7 Fazit und Ausblick

Im Hinblick auf die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung kommt hinsichtlich einer effiziente Wärmeversorgung, der Zustandsanalyse von Fernwärmeleitungen eine erhöhte Bedeutung zu. Durch den angestrebten höheren Anteil erneuerbarer Energieträger an der Wärme- und Stromversorgung ist mit vermehrten Temperaturwechseln in Fernwärmenetzen zu rechnen. Um die Methoden der Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen bewerten zu können wurden in dieser Arbeit Messwerte aus dem Netz der Netzdienste-Rhein-Main und eines Messpunktes in München untersucht. Die Auswertung der Ganglinien erfolgte mittels eines Vierpunkt-Rainflow Algorithmus welcher als PHP-basierte Anwendung nachgestellt wurde. Eine Übereinstimmung der Belastungen mit den Anforderungen aus DIN EN 13941 an die ertragbare Volllastwechselzahl konnte dabei festgestellt werden. Allerdings zeigten sich auch große Abweichungen zwischen den einzelnen Messpunkten. Ein Großteil der Messpunkte sind von der geforderten Belastungsgrenze weit entfernt. Dies bedeutet eine wesentliche Reserve der Tragfähigkeit und steht somit im Gegensatz zur Anforderung an eine wirtschaftliche Auslegung der Leitungen.

Von der Messstation an einer Hausanschlussleitung in München, deren Installation begleitet wurde, konnten Verschiebungs- und Temperaturmesswerte untersucht werden. Die Auswertung der Temperatur- und Verschiebungsschwingspiele zeigt eine große Abweichung zwischen der aus der statischen Berechnung erwarteten und der gemessenen Verschiebung. Es bleibt zu untersuchen, welche Zusammenhänge hierfür verantwortlich und wie diese hinsichtlich der Ermüdung zu bewerten sind.

Die Berechnungen zur Ermittlung der Volllastwechsel und der Korrekturfaktoren erfolgte in dieser Arbeit mit einheitlicher Temperaturschwingbreite von 120 K. Sollten die Trassen, denen die Messwerte entstammen mit abweichenden Temperaturen ausgelegt worden sein, könnten sich die Ergebnisse stark unterscheiden. Auch kann hinterfragt werden, ob die hier durchgeführte Extrapolation der Messwerte den wahren Sachverhalt ausreichend annähert. Allerdings liegen die hier berechneten Werte in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der IEA.

Die Auslegung und technische Bewertung von Fernwärmeleitungen anhand von Volllastwechseln sollte überdacht werden. Diese auf der Palmgren-Miner Regel basierte Forderung an ein schadensäquivalentes Einheitskollektiv ist mehrdeutig, da unterschiedliche Kollektivformen zur gleichen Schadenssumme führen können und Einflüsse von Reihenfolgeeffekten und Dauerfestigkeit ignoriert werden. Zusätzlich ist die Anforderung an eine Tragfähigkeit gegen eine bestimmte Anzahl von Volllastwechseln an die Verwendung bestimmter Parameter gebunden. Eine Auslegung mit neuen Werkstofferkennnissen oder abweichenden Betriebstemperaturen führt zu erheblichen Abweichungen der Gebrauchsdauer, welche schwer zu bewerten sind. Die bisherigen Regeln zur Auslegung von Fernwärmeleitungen zeigen nicht die notwendige Flexibilität und Genauigkeit, um

neue Situationen in einem Fernwärmenetz zutreffend in die Gebrauchsdauerermittlung einzubeziehen.

Ziel zukünftiger Untersuchungen sollte es sein, den Ermüdungsnachweis von Fernwärmeleitungen zu verbessern. Eine Möglichkeit hierzu liefert die Ermittlung von Standardtemperaturkollektiven. Zusätzliche Modelle zur Berücksichtigung von Einflüssen wie zum Beispiel Solarthermie und einer Nachtabenkung können die Präzision bei der Auslegung neuer Trassen erhöhen. Die aus den Messwerten ermittelten Näherungskollektive stellen einen ersten Ansatz für eine Berechnung mit Standardkollektiven dar. Eine weitere Möglichkeit ist durch die Auswahl eines anderen Ermüdungsnachweises gegeben. Besonders das bruchmechanische Konzept zeigt sich hierbei als vielversprechende Alternative. Beim bruchmechanischen Konzept wird versucht, die Kräfte und Spannungen die zur Vergrößerung eines Risses im Werkstoff führen zu bestimmen. Mittels der Kontinuumsmechanik elastisch-plastischer Festkörper kann die durch äußere Kräfte an der Rissfront wirkende Kraft ermittelt und mit einem Grenzwert welcher zum Rissfortschritt führt verglichen werden. Ein Ansatz ist die Verwendung des J-Integrals. Das J-Integral ist ein geschlossenes Linienintegral, welches die Energiefreisetzungsrate bei Rissfortschritt beschreibt. Da der Werkstoff mit Methoden der Kontinuumsmechanik beschrieben und weitere Einflüsse wie Reihenfolgeeffekte, Vorschädigung und elastisch-plastisches Materialverhalten treffsicher betrachtet werden können, könnte dies den Ermüdungsnachweis verbessern. Weitere Forschungen zur Verwendung der Bruchmechanik in der Fernwärme, speziell im Bereich des Kurzrischwachstums, sind hierbei erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] AGFW. AGFW Regelwerk, Arbeitsblatt FW 401 - Teil 10 Verlegung und Statik vom Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze.
- [2] AGFW. Arbeitsblatt AGFW FW 510 Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb.
- [3] C. AMZALLAG, J. GEREY, J. ROBERT, and J. BAHUAUD. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. *International Journal of Fatigue*, 16(4):287–293, 1994.
- [4] Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter. AD 2000-Merkblatt S 2, Berechnung auf Wechselbeanspruchung, 07.2012.
- [5] ASTM. ASTM E606 / E606M Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2012.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 13941 Auslegung und Installation von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme.
- [7] Dr.-Ing. Manfred Fishedick et al. Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz bis zum Jahr 2020. Technical report, Umweltbundesamt, 2007.
- [8] E. Haibach. *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer, Berlin, 3 edition, 2006.
- [9] Andreas Huber. *Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fährantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladars*. PhD thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [10] Kerntechnischer Ausschuss. KTA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, 1992.
- [11] Andreas Löschel, Georg Erdmann, Frithjof Staiß, and Hans Joachim Ziesing. Stellungnahme der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“: Stellungnahme zum ersten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2011, 2011.
- [12] A. R. C. Markl. Fatigue Tests of Piping Components. *Transactions of ASME*, April 1952.

- [13] A. R. C. Markl. Piping-Flexibility Analysis. *Transactions of ASME*, Februar 1955.
- [14] C.H McInnes and P.A Meehan. Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms. *International Journal of Fatigue*, 30(3):547–559, 2008.
- [15] Dieter Radaaj and Michael Vormwald. *Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure*. Springer, 2007.
- [16] Peter Randlov, Karl Erik Hansen, and Marie Penderos. *Temperature Variations in Preinsulated DH Pipes Low Cycle Fatigue*. Novem, Sittard, 1996.
- [17] Hansen Neergaard Randlov Olsson Rasmus. *Fatigue Analysis of District Heating Systems: Low Cycle Fatigue*. Novem, Sittard, 1999.
- [18] Axel Siemon. *Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchspaltung*. PhD thesis, Universität Kassel, Kassel, 2008.
- [19] Statistisches Bundesamt. Entwicklung der Privathaushalte bis 2030: Ende des ansteigenden Trends: Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung: Auszug aus Wirtschaft und Statistik, 2011.
- [20] Weber et al. Offene Fragen zur Transformation des Energiesystems: Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2011. In *Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem*. 2011.
- [21] Daniel Weidlich, Ingo und Trier. Pipe-soil interaction in large solar thermal heating and cooling plants. In *Veröffentlichungen der Forschungsstelle des AGFW*. AGFW e.V., 2011.
- [22] X. Zheng. On some basic problems of fatigue research in engineering. *International Journal of Fatigue*, 23(9):751–766, 2001.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kennwerte eines Schwingspiels [15]	4
2.2	Dauer- und Zeitfestigkeitsschaubild für Kerbstäbe aus der Aluminium-Knetlegierung 3.4364.7 [8]	5
2.3	Kennwerte einer Wöhlerlinie und Abgrenzung der Bereiche nach Haibach	6
2.4	Rainflow Zählmethode nach Steinhilber u. Schütz [8]. Darstellung der Belastungs-Zeit-Funktion, dem zyklischen Werkstoffverhalten und den gezählten Hystereseschleifen.	9
2.5	Darstellung der Rainflow-Zählung [8]	10
2.6	Modifikationen der Palmgren-Miner Hypothese [15]	12
2.7	Schematische Darstellung der linearen und nichtlinearen Schädigung am zweistufigen Beispiel	13
2.8	Einfluss der Messfrequenz auf die Anzahl der Volllastwechsel	17
3.1	Lastgang Messpunkt 8720 von Dezember 2011 bis April 2013	20
3.2	Lastgang Messpunkt 8720 von April bis Mai 2012	20
3.3	Lastgang Messpunkt 8801 von April bis Mai 2012	21
3.4	Ausgleich der Messfrequenz durch lineare Regression	22
3.5	Äquivalente Volllastwechsel - Erzeuger	23
3.6	Äquivalente Volllastwechsel - Verbraucher Teil 1	23
3.7	Äquivalente Volllastwechsel - Verbraucher - Teil 2	24
3.8	Ausschnitt, Rohrstatik	25
3.9	Verschiebung der Hausanschlussleitung	26
3.10	Verschiebung der Leitung	27
3.11	Histogramm der Temperaturschwingspiele	28
3.12	Temperaturlastgang Messpunkt München	29
3.13	Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Rücklaufleitungen der Erzeuger	32
3.14	Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Vorlaufleitungen der Erzeugung	32
3.15	Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Vorlaufleitungen der Verbraucher	33
3.16	Vergleich der Näherungskurven mit den Lastkollektiven der Rücklaufleitungen der Verbraucher	33
4.1	Vergleich der Wöhlerkurven	36

Abbildungsverzeichnis

5.1	Anzahl gleichwertiger Vollastwechsel bei Verwendung der Näherungskurve Trend-NRM RL und variierendem ΔT_{ref}	42
5.2	Vergleich der Vollastwechselzahlen FW401 Teil 10 - DIN EN 13941 für ungeschweißte Bauteilbereiche aus den Messwerten der NRM	44
6.1	Darstellung der Messwerte	46
6.3	Beispiel 1: Dateiformat	46
6.2	Amplituden-Mittelwert-Matrix der RF-Zählung	47
6.4	Beispiel 2: Dateiformat	47
6.5	Beispiel: Ausgabeformat	47

Tabellenverzeichnis

2.1	Beanspruchungsformen	11
2.2	Gleichwertige Vollastwechsel für $m = 4$ und $\Delta T_{ref} = 110$ K nach DIN EN 13941 [6]	15
2.3	Sicherheitsfaktoren nach Projektklasse aus DIN EN 13941 [6]	16
2.4	Auswirkungen unterschiedlicher Exponenten auf die Ermittlung gleichwertiger Vollastwechsel nach [16]	16
3.2	Vollastwechsel von Messpunkt 8720	19
3.1	Übersicht der Vollastwechselberechnung	19
3.3	Verschiebungen gemäß Rohrstatik	25
3.4	Ergebnisse der Bodenuntersuchung	26
3.5	Gegenüberstellung der Verschiebungswerte	27
3.6	Ergebnisse der Rainflow-Zählung, Verschiebungsschwingspiele	28
3.7	Mittlere Regressionskoeffizienten aus den Messwerten der NRM	30
3.8	Korrekturfaktoren - Messpunkt München	30
4.1	Maximale Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bauteilbereiche unterschiedlicher Leitungstypen.	36
4.2	Korrekturfaktoren AD2000S2:2012	39
4.3	Ergebnisse der Vollastwechselberechnung mit den Kollektiven <i>Trend NRM</i>	40
4.4	Vergleich der Vollastwechsel bei Anwendung unterschiedlicher Parameter	40
5.1	Darstellung der Vollastwechselberechnung mit $m = 3,2$ und $\Delta T_{ref} = 120$ K, aus den Näherungskurven und die Anforderungen aus DIN EN 13941.	42
5.2	Ergebnisse der Vollastwechselberechnung mit den Kollektiven <i>Trend NRM</i> bei Anwendung von $\Delta T_{max} = 80$ K	43
5.3	Bewertung der Auslegung nach gleichwertigen Vollastwechseln und Näherungskollektiven	45

Anhang

Übersicht Messpunkte NRM

ID	Begin	Ende	Tage	N_I VL	N_I RL	f_d	f_f VL	f_f RL	N_0 VI	N_0 RL
7718	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,55	0,47	1,44	1,04	1,05	114,22	21,24
7727	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,40	0,90	1,45	1,05	1,05	109,14	40,97
7716	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,01	0,68	1,43	1,05	1,12	90,99	32,78
7717	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,95	1,87	1,21	1,50	1,07	52,01	72,76
7724	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,06	0,48	1,45	1,01	1,01	46,47	21,10
7616	11.06.2012	08.04.2013	300,99	0,30	0,01	1,24	1,06	1,10	11,71	0,44
7642	11.06.2012	08.04.2013	300,99	0,27	0,01	1,24	1,06	1,07	10,66	0,54
7603	11.06.2012	08.04.2013	300,99	0,27	0,01	1,24	1,05	1,04	10,56	0,52
7604	11.06.2012	08.04.2013	300,99	0,27	0,01	1,24	1,05	1,04	10,54	0,50
7838	23.07.2012	01.04.2013	251,99	0,16	0,06	1,68	1,10	1,04	9,10	3,34
7501	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,15	0,05	1,27	1,10	1,10	6,35	1,97
7837	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,11	0,04	1,45	1,06	1,12	5,06	2,11
7502	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,12	0,09	1,27	1,07	1,08	4,78	3,86
7702	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,09	0,06	1,45	1,06	1,09	4,37	2,64
7708	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,09	0,02	1,45	1,07	1,08	4,06	0,75
7722	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,09	0,02	1,45	1,07	1,08	4,04	0,74
7808	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,07	0,24	1,45	1,20	1,03	3,63	10,85

ID	Begin	Ende	Tage	N_I VL	N_I RL	f_d	f_f VL	f_f RL	N_0 VI	N_0 RL
8710	16.07.2012	08.04.2013	265,99	0,93	21,81	1,58	1,09	1,11	48,16	1147,00
8107	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,03	21,36	1,34	1,04	1,12	1,06	955,95
8313	04.06.2012	08.04.2013	307,99	1,86	19,92	1,21	1,07	1,12	72,05	810,67
8712	16.07.2012	08.04.2013	265,99	0,73	15,19	1,58	1,07	1,12	37,35	805,80
8112	11.06.2012	08.04.2013	300,99	6,76	18,83	1,24	1,11	1,12	278,55	784,23
8813	25.06.2012	08.04.2013	286,99	3,66	13,63	1,66	1,17	1,11	212,32	749,72
8711	16.07.2012	08.04.2013	265,99	4,25	14,15	1,58	1,09	1,11	218,98	745,52
8614	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,35	16,42	1,28	1,17	1,08	15,50	681,00
8834	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,30	11,59	1,45	1,11	1,13	14,45	566,74
8634	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,86	9,12	1,41	1,04	1,08	81,97	416,01
8103	11.06.2012	08.04.2013	300,99	1,83	9,76	1,24	0,98	1,11	66,99	403,45
8807	18.06.2012	08.04.2013	293,99	9,92	5,84	2,23	1,03	1,03	686,80	403,36
8729	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,41	7,48	1,45	1,05	1,07	64,12	347,40

Tabellenverzeichnis

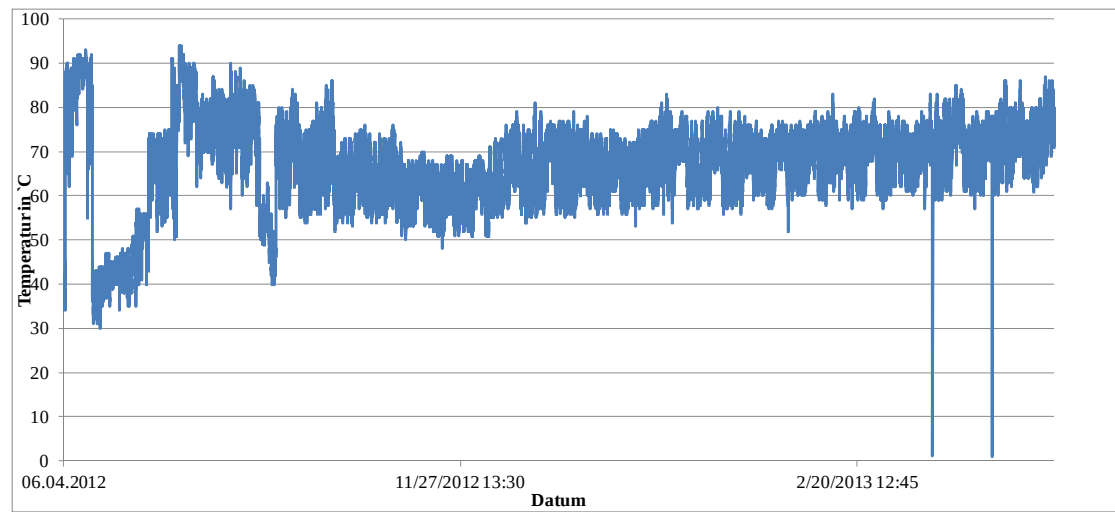
ID	Begin	Ende	Tage	N_I VL	N_I RL	f_d	f_f VL	f_f RL	N_0 VI	N_0 RL
8109	25.06.2012	08.04.2013	286,99	6,95	7,46	1,34	1,03	1,11	286,21	330,88
8101	11.06.2012	08.04.2013	300,99	1,53	7,45	1,25	1,05	1,09	59,98	304,80
8617	25.06.2012	08.04.2013	286,99	5,02	6,32	1,41	1,04	1,08	221,47	288,52
8804	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,88	6,46	1,34	1,10	1,10	38,62	285,83
8115	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,97	6,22	1,21	1,11	1,08	39,30	243,81
8835	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,24	4,22	1,45	1,05	1,11	10,82	204,14
8312	11.06.2012	08.04.2013	300,99	2,82	4,59	1,24	1,08	1,10	113,29	188,10
8311	04.06.2012	08.04.2013	307,99	2,14	4,56	1,21	1,00	1,12	78,06	184,85
8310	11.06.2012	08.04.2013	300,99	2,28	3,88	1,27	1,11	1,09	96,47	161,41
8102	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,05	3,50	1,21	1,09	1,10	1,86	140,35
8832	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,57	2,96	1,41	1,07	1,06	71,10	132,56
8815	25.06.2012	08.04.2013	286,99	4,20	2,60	1,45	1,07	1,10	196,20	124,59
8611	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,54	2,76	1,27	1,10	1,07	22,81	112,67
8612	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,54	2,66	1,27	1,06	1,10	21,62	111,44
8836	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,41	2,22	1,45	1,08	1,11	19,20	106,71
8108	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,51	2,35	1,34	1,03	1,07	103,60	100,39
8829	25.06.2012	08.04.2013	286,99	3,34	1,86	1,41	1,14	1,10	160,31	86,74
8814	25.06.2012	08.04.2013	286,99	4,30	1,79	1,45	1,07	1,09	199,73	84,83
8644	04.06.2012	08.04.2013	307,99	1,01	2,11	1,21	1,04	1,08	38,31	82,71
8601	04.06.2012	08.04.2013	307,99	1,09	1,90	1,24	1,09	1,12	43,98	79,63
8621	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,71	1,90	1,21	1,08	1,07	27,84	74,10
8609	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,40	1,79	1,27	1,01	1,05	15,49	71,33
8828	25.06.2012	08.04.2013	286,99	7,92	1,43	1,41	1,09	1,10	365,43	66,80
8619	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,22	1,45	1,45	1,04	1,06	9,87	66,45
8605	04.06.2012	08.04.2013	307,99	3,14	1,61	1,22	1,09	1,09	125,02	64,07
8205	23.07.2012	08.04.2013	258,99	3,04	1,30	1,50	1,03	1,09	140,71	63,72
8633	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,15	1,29	1,41	1,06	1,09	51,70	59,44
8113	04.06.2012	08.04.2013	307,99	1,37	1,44	1,24	0,93	1,10	47,52	58,97
8118	11.06.2012	08.04.2013	300,99	0,71	1,43	1,24	0,82	1,09	21,84	57,83
8730	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,05	1,19	1,45	1,12	1,07	99,93	55,51
8618	25.06.2012	08.04.2013	286,99	4,66	1,17	1,41	1,04	1,07	204,19	53,18
8610	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,35	1,23	1,27	1,02	1,09	13,77	51,01
8602	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,49	1,23	1,26	1,04	1,08	19,53	50,31
8632	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,14	1,07	1,41	1,06	1,11	51,26	50,24
8207	23.07.2012	08.04.2013	258,99	3,38	0,84	1,64	1,09	1,15	181,68	47,73
8827	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,44	1,09	1,37	1,09	1,05	64,39	47,08
8705	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,15	0,79	1,61	1,03	1,15	7,33	43,94
8643	30.07.2012	08.04.2013	251,99	0,98	0,82	1,58	1,03	1,03	47,44	40,30
8830	25.06.2012	08.04.2013	286,99	6,05	0,84	1,37	1,12	1,12	279,17	38,60
8719	04.06.2012	08.04.2013	307,99	2,73	0,90	1,29	1,04	1,08	109,71	37,56
8203	23.07.2012	08.04.2013	258,99	1,28	0,74	1,49	1,14	1,13	65,17	37,49
8114	04.06.2012	08.04.2013	307,99	3,57	0,93	1,24	1,02	1,05	136,16	36,56
8638	25.06.2012	08.04.2013	286,99	2,20	0,76	1,41	1,05	1,02	98,12	32,50

Tabellenverzeichnis

ID	Begin	Ende	Tage	N_I VL	N_I RL	f_d	f_f VL	f_f RL	N_0 V1	N_0 RL
8202	23.07.2012	08.04.2013	258,99	1,43	0,62	1,49	1,13	1,12	72,24	30,93
8833	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,40	0,67	1,50	1,02	1,02	18,33	30,41
8613	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,81	0,73	1,21	1,01	1,14	29,80	30,26
8805	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,63	0,67	1,34	1,10	1,12	72,23	30,15
8111	11.06.2012	08.04.2013	300,99	1,33	0,73	1,24	1,04	1,10	51,28	29,97
8206	04.06.2012	08.04.2013	307,99	1,05	0,64	1,35	1,09	1,10	46,30	28,24
8726	02.07.2012	08.04.2013	279,99	0,96	0,76	1,34	1,02	0,85	39,49	25,73
8110	11.06.2012	08.04.2013	300,99	1,53	0,63	1,29	1,04	1,02	61,51	25,00
8208	23.07.2012	08.04.2013	258,99	4,26	0,52	1,49	1,01	1,06	192,41	24,49
8636	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,15	0,52	1,41	1,06	1,08	51,89	23,98
8615	18.06.2012	08.04.2013	293,99	0,39	0,53	1,28	1,08	1,09	15,99	22,35
8105	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,82	0,47	1,31	1,06	1,12	34,03	20,70
8608	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,46	0,44	1,45	1,05	1,04	20,88	20,10
8116	11.06.2012	08.04.2013	300,99	1,51	0,45	1,27	1,04	1,03	59,93	17,50
8204	23.07.2012	08.04.2013	258,99	1,79	0,38	1,50	1,02	1,01	82,27	17,13
8622	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,79	0,43	1,21	1,11	1,07	31,78	16,83
8704	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,36	0,44	1,24	1,08	1,01	14,50	16,45
8620	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,19	0,38	1,27	1,04	1,10	7,55	16,21
8801	31.10.2011	08.04.2013	524,99	1,91	0,66	0,75	1,04	1,05	44,74	15,57
8209	23.07.2012	08.04.2013	258,99	2,10	0,29	1,49	1,11	1,08	104,00	13,92
8640	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,97	0,26	1,41	1,08	1,06	44,18	11,54
8117	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,71	0,25	1,31	1,00	1,04	27,90	10,34
8802	25.06.2012	08.04.2013	286,99	0,83	0,08	1,34	1,10	1,10	36,63	3,55
8803	25.06.2012	08.04.2013	286,99	1,02	0,08	1,34	1,10	1,09	45,06	3,29
8720	05.12.2011	08.04.2013	489,99	0,18	0,08	0,75	1,09	1,05	4,30	1,95
8721	04.06.2012	08.04.2013	307,99	0,08	0,03	1,24	1,08	1,08	3,34	1,13

Messpunkt 7717 Rücklaufleitung

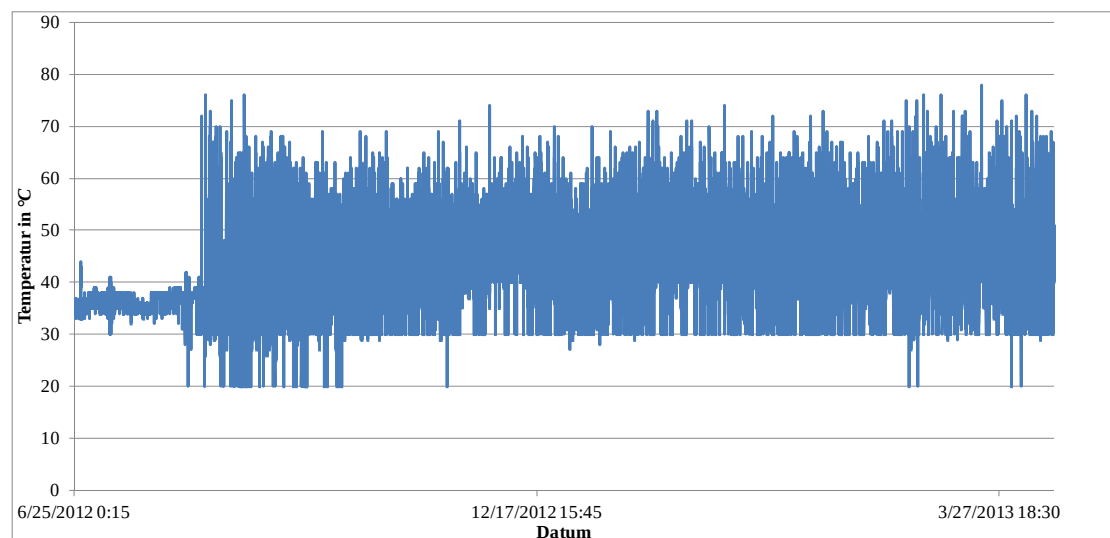
Lastgang



ΔT	Mittelwert													
0	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	Summe
5	17	158	106	50	236	517	1024	1014	655	255	108	89	4	4233
10	10	17	10	4	30	239	420	470	225	68	14	3	0	1510
15	1	8	1	4	2	51	94	111	36	7	0	0	0	315
20	0	4	1	2	0	10	46	41	13	3	1	0	0	121
25	0	0	3	2	1	2	8	21	6	3	0	0	0	46
30	0	0	0	0	0	2	3	1	1	1	0	0	0	8
35	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	4
40	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
45	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
50	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
55	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
65	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
85	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
95	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Messdauer	Ausfall Messwerte	N_0	f_f	f_d
307,99	6,99	72,76	1,07	1,21

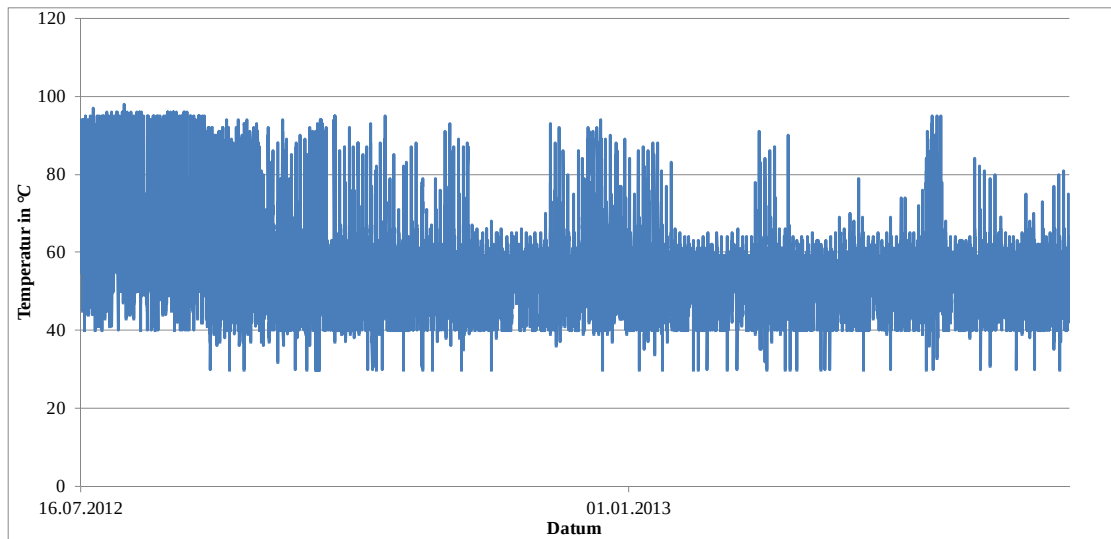
Messpunkt 8834 Rücklaufleitung



ΔT	Mittelwert										
0	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	Summe
5	19	33	949	421	498	432	218	65	7	0	2642
10	0	7	107	161	247	254	118	30	1	1	926
15	0	4	21	97	144	220	74	16	0	0	576
20	0	1	12	61	154	144	47	0	0	0	419
25	0	0	5	24	112	97	32	0	0	0	270
30	0	0	0	6	65	97	18	1	0	0	187
35	0	0	0	16	24	95	5	0	0	0	140
40	0	0	0	5	6	57	13	0	0	0	81
45	0	0	0	0	4	24	8	0	0	0	36
50	0	0	0	0	1	12	0	0	0	0	13
55	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	5
60	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4

Messdauer	Ausfall Messwerte				
Tage	Tage		N_0	f_f	f_d
286,99	34,97		566,74	1,13	1,45

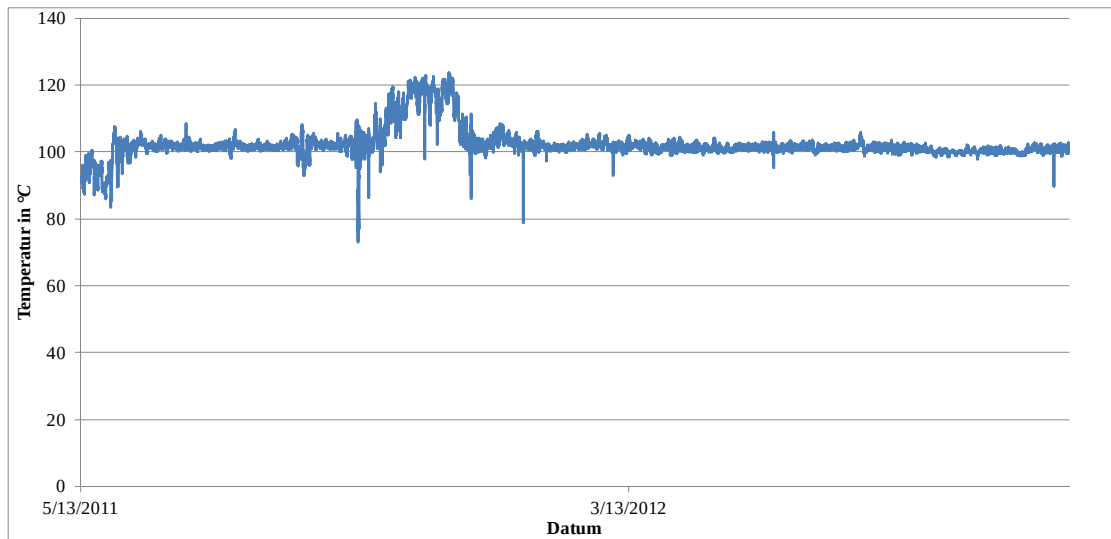
Messpunkt 8710 Rücklaufleitung



ΔT	Mittelwert													
0	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	Summe
5	5	30	244	304	581	253	120	55	31	13	7	12	4	1659
10	0	1	24	237	309	78	42	28	30	4	23	3	0	779
15	0	0	14	362	259	44	33	32	32	2	1	0	0	779
20	0	0	28	227	176	36	27	37	15	0	0	0	0	546
25	0	0	29	56	72	58	26	24	12	0	0	0	0	277
30	0	0	1	11	19	10	11	15	13	5	0	0	0	85
35	0	0	0	3	11	14	19	19	19	6	0	0	0	91
40	0	0	0	0	7	15	19	13	9	0	0	0	0	63
45	0	0	0	0	4	10	16	24	12	0	0	0	0	66
50	0	0	0	0	2	16	23	25	0	0	0	0	0	66
55	0	0	0	0	0	9	26	26	0	0	0	0	0	61
60	0	0	0	0	0	2	12	7	0	0	0	0	0	21
65	0	0	0	0	0	1	15	0	0	0	0	0	0	16
70	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Messdauer	Ausfall	Messwerte		
Tage	Tage	N_0	f_f	f_d
265,99	34,97	1047,00	1,09	1,58

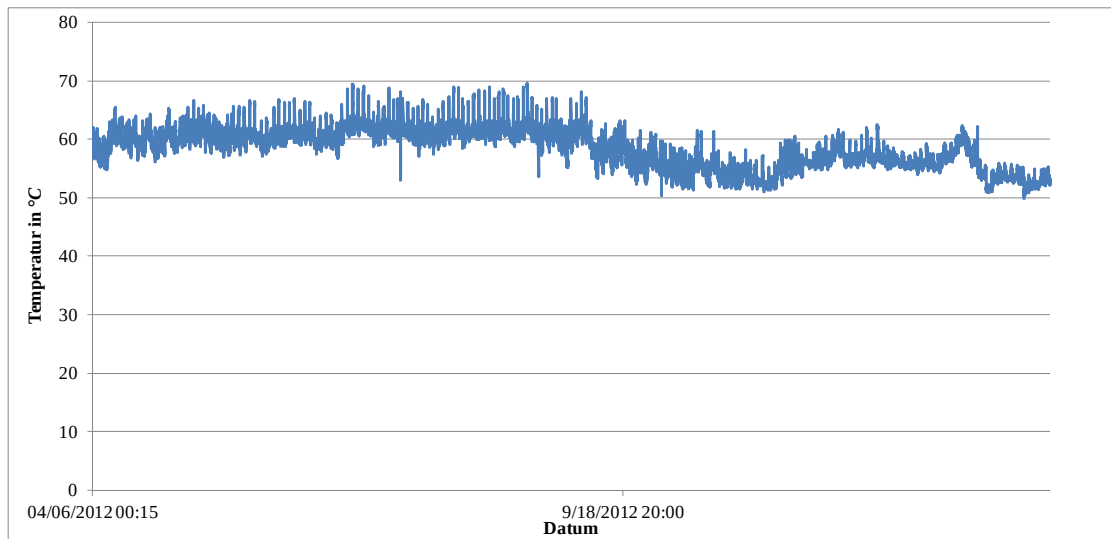
Messpunkt 8720 Vorlauf



ΔT	Mittelwert														
0	45	50	55	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	Summe
5	3	0	0	1	0	13	75	428	8512	2102	1009	519	161	3	12826
10	0	1	0	0	0	0	0	16	35	48	34	19	0	0	153
15	0	0	0	0	1	0	0	10	12	9	11	4	0	0	47
20	0	1	0	0	0	0	0	7	3	2	6	0	0	0	19
25	0	0	0	0	0	0	1	5	4	0	2	0	0	0	12
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
40	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
45	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Messdauer	Ausfall	Messwerte			
Tage	Tage	N_0	f_f	f_d	
489,99	1,25	4,30	1,09	0,75	

Messpunkt 8720 Rücklauf



Amplitude		Mittelwert					Summe
0	45	50	55	60	65	70	
5	163	4383	5322	2869	483	0	13220
10	1	28	64	58	0	1	152
15	0	4	9	4	0	0	17
20	0	0	1	0	0	3	4
25	0	0	0	0	0	1	1
55	0	0	0	0	1	0	1

Messdauer	Ausfall Messwerte				
Tage	Tage		N_0	f_f	f_d
489,99	1,25		1,95	1,05	0,75

Schwingspiele Messpunkt München

RF-Zählung Verschiebung WP02 Vorlauf

x_1	x_2	t_1	t_2	Δx
113,6	113,7	10.01.2013 21:00	10.01.2013 22:00	0,1
112,6	112,5	10.02.2013 04:30	11.02.2013 14:00	0,1
113,6	113,7	10.01.2013 23:00	11.01.2013 10:00	0,1
112	111,9	22.02.2013 21:00	22.02.2013 21:10	0,1
112	111,9	23.02.2013 03:50	23.02.2013 04:00	0,1
112	111,9	23.02.2013 05:00	23.02.2013 12:30	0,1
114,5	114,4	09.05.2013 09:20	09.05.2013 09:30	0,1
114,4	114,5	10.05.2013 04:00	10.05.2013 15:30	0,1
114,3	123,9	06.05.2013 15:20R	07.12.2012 06:00R	9,6

RF-Zählung Verschiebung WP02 Rücklauf

x_1	x_2	t_1	t_2	Δx
120,3	125,2	13.05.2013 12:00R	07.12.2012 06:00R	4,9

RF-Zählung Verschiebung WP04 Vorlauf

x_1	x_2	t_1	t_2	Δx
127,6	127,5	07.12.2012 06:00R	07.12.2012 07:00R	0,1
123,2	127,8	26.02.2013 09:50R	07.12.2012 08:00R	4,6

Temperaturkollektiv München

ΔT	Mittelwert																		
0	5	15	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	Summe	
5	9	6	0	1	0	0	1	1	1	0	14	55	38	63	140	151	28	508	
10	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	4	4	5	0	18	
15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	5	
20	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	
25	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	
35	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
40	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
80	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

kummulierter Anteil der Kollektivstufen

kummulierter Anteil $\frac{N_i}{N_0}$ der Kollektivstufen ΔT mit Kollektiv Trend NRM RL					kummulierter Anteil $\frac{N_i}{N_0}$ der Kollektivstufen ΔT mit Kollektiv Trend NRM VL				
Neigung m					Neigung m				
ΔT	3,2	4	5	2	ΔT	3,2	4	5	2
	%					%			
5	0,06	0,01	0,00	0,00	5	0,08	0,01	0,00	0,00
10	0,29	0,04	0,00	0,00	10	0,36	0,05	0,00	0,00
15	0,73	0,14	0,02	0,00	15	0,89	0,17	0,02	0,00
20	1,42	0,14	0,02	0,00	20	1,7	0,41	0,07	0,03
25	2,41	0,35	0,06	0,00	25	2,81	0,81	0,17	0,48
30	3,70	1,23	0,31	0,06	30	4,24	1,41	0,36	1,66
35	5,32	2,00	0,59	0,55	35	6,02	2,26	0,67	3,60
40	7,30	3,05	1,30	1,70	40	8,15	3,40	1,14	6,23
45	9,66	4,43	1,67	3,58	45	10,65	4,88	1,84	9,47
50	12,40	6,18	2,59	6,20	50	13,54	6,75	2,82	13,25
55	15,56	8,37	3,85	9,52	55	16,82	9,04	4,16	17,51
60	19,14	11,03	5,54	13,5	60	20,51	11,81	5,93	22,19
65	23,15	14,22	7,73	18,11	65	24,63	15,11	8,21	27,25
70	27,62	17,99	10,53	23,3	70	29,16	18,98	11,10	32,66
75	32,56	22,4	14,03	29,03	75	34,14	23,47	14,71	38,37
80	37,98	27,5	18,37	35,27	80	39,57	28,64	19,13	44,36
85	43,89	33,35	23,66	41,98	85	45,45	34,52	24,49	50,61
90	50,30	40,00	30,04	49,14	90	51,8	41,17	30,92	57,09
95	57,22	47,52	37,66	56,71	95	58,62	48,63	38,54	63,779
100	64,69	5,95	46,66	64,68	100	65,92	56,97	47,51	70,69
105	72,68	65,35	57,21	73,01	105	73,71	66,22	57,93	77,77
110	81,23	75,79	69,50	81,7	110	81,93	76,45	70,1	85,01
115	90,33	87,32	83,69	90,72	115	90,71	87,69	83,97	92,43
120	100	100	100	100	120	100	100	100	100

PHP-Code der Vierpunkt-Rainflow-Zählmethode

Kern der PHP Implementierung der Rainflow-Zählmethode. Die Extremwertfilterung und Behandlung des Residuums sind nicht dargestellt.

```

1  <?php
2  function rainflow($arr_ausgabe){
3      $fin = false;
4      $size= count($arr_ausgabe['extrem']);
5      if ($size < 4) {
6          $fin = true;
7      }
8      $i = 4;
9      $dll = new SplDoublyLinkedList();
10     $dll_time = new SplDoublyLinkedList();
11     foreach($arr_ausgabe['extrem'] as $key => $value) {
12         $dll->push($value);
13     }
14     foreach($arr_ausgabe['time'] as $key => $value) {
15         $dll_time->push($value);
16     }
17     while ($fin == false){
18         $x1 = abs($dll->offsetGet($i-1) - $dll->offsetGet($i-2));
19         $x2 = abs($dll->offsetGet($i-2) - $dll->offsetGet($i-3));
20         $x3 = abs($dll->offsetGet($i-3)
21             - $dll->offsetGet($i-4));
22         $mean = round(($dll->offsetGet($i-3)
23             +$dll->offsetGet($i-4))/2,0);
24         if ( $x1<$x2 or $x3<$x2){
25             $i++;
26         }
27         else {
28             $range=round($x2/2,0);
29             $row = array(
30                 number_format($dll->offsetGet($i-3),10,',',''),
31                 number_format($dll->offsetGet($i-2),10,',',''),
32                 $dll_time->offsetGet($i-3),
33                 $dll_time->offsetGet($i-2),
34             );
35             $arr_ausgabe['rainflow'][] = $row;
36             if (isset($arr_ausgabe['rfm'][$range])){
37                 if (isset($arr_ausgabe['rfm'][$range][$mean])){
38                     $arr_ausgabe['rfm'][$range][$mean] +=1;
39                 }
40                 else{
41                     $arr_ausgabe['rfm'][$range][$mean]=1;
42                     $arr_ausgabe['range'][$range]=true;
43                     $arr_ausgabe['mean'][$mean]=true;
44                 }
45             }
46             else{
47                 $arr_ausgabe['rfm'][$range][$mean]=1;
48                 $arr_ausgabe['range'][$range]=true;
49                 $arr_ausgabe['mean'][$mean]=true;
50             }
51             $dll->offsetUnset($i-2);
52             $dll->offsetUnset($i-3);
53             $dll_time->offsetUnset($i-2);
54             $dll_time->offsetUnset($i-3);
55             $size = $dll->count();
56             if($i>=6){$i=$i-2;}
57         }

```

Tabellenverzeichnis

```
58     $size = $dll->count();
59     if ($i >= $size){
60         $fin = true;
61     }
62 }
63 foreach($dll as $key => $value) {
64     $tmp[] = $value;
65 }
66 foreach($dll_time as $key => $value) {
67     $time[] = $value;
68 }
69 $arr_ausgabe['extrem'] = $tmp;
70 $arr_ausgabe['time'] = $time;
71 return($arr_ausgabe);
72 }
73 ?>
```