



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**EINSATZ VON THERMOELEMENTEN ZUR ERFASSUNG
DER TEMPERATUR VON ROHRLEITUNGSWANDUNGEN
IM RAHMEN DER ERMÜDUNGSÜBERWACHUNG**

BMU - 2003-632



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2004-632

**Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der
Temperatur von Rohrleitungswandungen im Rahmen
der Ermüdungsüberwachung**

Dipl.-Ing. P. Hofstätter

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht wurde vom TÜV Anlagentechnik GmbH, Köln, erstellt.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Arbeitsgruppe RS I 1
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

ISSN 1612-6386
Erscheinungsjahr: 2004

Kurzfassung

Für Rohrleitungen in Kraftwerken sind neben dem Innendruck und eventuellen äußeren Momenten die thermischen Belastungen beanspruchungsrelevant, die aus der globalen und lokalen Temperaturverteilung bzw. aus zeitlichen Temperaturänderungen resultieren. Man unterscheidet nach der Temperaturänderungs-Geschwindigkeit stationäre Zustände, quasistationäre Vorgänge (z. B. langsames Aufheizen) sowie transiente Temperaturänderungen (Einströmen von heißem Medium in kalte Leitungen bzw. von kaltem Medium in heiße Leitungen) mit dem Grenzfall Temperaturschock. Als zugehörige Beanspruchungen treten Spannungen aus globaler und lokaler behinderter Wärmedehnung (einschließlich der Spannungen aus Temperaturschichtungen) sowie Wärmespannungen auf Grund radialer Temperaturdifferenzen im Rohr auf. Diese Vorgänge sind im **Arbeitspaket 1** beschrieben. Desweiteren werden die derzeit üblichen Arten der messtechnischen Erfassung dieser Temperaturen an Rohrleitungen beschrieben.

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wird auf vorhandene Messdaten aus Messungen in Kernkraftwerken zurückgegriffen. Im **Arbeitspaket 2** wird beschrieben, welche Daten vorliegen, welche Beanspruchungszustände entsprechend der Zusammenstellung im Arbeitspaket 1 damit erfasst wurden und mit welchen Installationen die einzelnen Messungen durchgeführt wurden.

Zur Erfassung der Temperaturen und ihrer Gradienten an Rohrleitungen in Kraftwerken werden Thermoelemente nach verschiedenen Installationsarten eingesetzt. Um diese zu vergleichen und ihre Messergebnisse vergleichbar zu bewerten, wurden im **Arbeitspaket 3** fünf typische Installationen auf einem Testrohr befestigt. Neben jedem Thermoelement wurde als Referenz eine Thermoperle auf der Rohroberfläche angebracht. Ein zusätzliches Testrohr enthielt neben den äußeren Thermoperlen auch solche in Bohrungen dicht vor der Innenoberfläche. Beide Testrohre wurden in einem Versuchsstand gleichzeitig mit Heißluft auf 350, 280 und 200°C erhitzt und dann mit kaltem Wasser schockartig abgekühlt. Während sich in den stationären Temperaturen nur geringe Temperaturunterschiede zeigten, ergaben sich in den Gradienten - verglichen mit der Anzeige der jeweiligen Referenz-Perle - deutliche Unterschiede.

Die im Arbeitspaket 3 zunächst zusammengestellten Ergebnisse wurden von Siempelkamp rechnerisch weiterverarbeitet. Dabei ergaben sich Hinweise, dass die Referenzperle die tatsächlich an der Rohroberfläche ablaufenden Gradienten nicht ausreichend erfasst. Dies konnte in zwei Ergänzungsversuchen an dem Versuchsrohr mit den Originalperlen nachvollzogen werden. Bei diesen Versuchen wurden zur besseren Erfassung der Oberflächentemperaturen neben den ursprünglichen Referenzperlen Temperaturmessfolien der Fa. Vishay angebracht, die zwar nur bis 260°C einsetzbar sind, dafür aber die rechnerischen Werte (Oberflächengradienten) bestätigten. Dabei ergaben sich für die verschiedenen Installationen auf einem Rohr mit 8 - 10 mm Wanddicke bei hohen Abkühlungsgradienten folgende Abweichungen von dem mit der Folie gemessenen und mit der Berechnung für die Rohroberfläche ermittelten tatsächlichen Gradienten:

- TÜV Schelle: 82%
- FAMOS neu: 79%
- FAMOS alt: 59%
- TÜV Polster: 59% und
- AMTEC: 62%.

Diese Ergänzungsversuche sind im **Kapitel 3.7** beschrieben.

Im **Arbeitspaket 4** werden die durchgeführten Versuche mit verschiedenen Berechnungsmethoden nachvollzogen und ausgewertet. Außerdem werden Mess-Beispiele aus Kraftwerken unter Verwendung der an Hand der Versuche kalibrierten FEM-Modelle nachgerechnet. Es wird gezeigt, dass es mit Hilfe dieser Modelle möglich ist, aus den mit den Thermoelement-Installationen gemessenen Temperaturverläufen auf die im Rohrinnenen ablaufenden thermischen Vorgänge zu schließen und somit nicht nur die gemessenen Temperaturverläufe an der Rohraußenwand nachzuvollziehen, sondern auch die thermischen Belastungen im Rahmen von Spannungs- und Ermüdungsberechnungen auf andere Bauteile zu übertragen.

Die Installationsarten werden hinsichtlich schneller Temperatur-Transienten bewertet und es werden Anforderungen an die Thermoelement-Anordnung definiert.

Im **Arbeitspaket 5** werden einige Empfehlungen hinsichtlich der Temperaturmessung an Rohrleitungen gegeben.

Abstract

Pipes in power plants have to withstand loads that are due to, for instance, internal pressure, external moments, if any, and thermal stresses resulting from the overall and local distribution of temperature or even from the change in temperature with time. The rate at which temperature changes governs the division into steady states, quasi-steady processes (e. g. slow heating up) and transient changes in temperature (hot medium flowing into cold pipes or cold medium flowing into hot pipes) with thermal shock constituting the borderline case. Stresses building up from overall and local confined thermal expansion (including stresses resulting from thermal stratifications) and thermal stresses attributable to radial temperature differences in the pipe are known to mean associated loads. **Work package 1** describes these processes and the standard methods currently applied to record temperatures on pipes.

In the research project reference is made to values obtained from measurements in nuclear power plants. **Work package 2** enlarges on the data available, the load conditions recorded on the basis of the compilation of work package 1 and on the installations by which the measurements were taken.

Temperatures and their gradients on power plant pipes are recorded by means of thermocouples that are different in their installation. To compare the thermocouples and to make the values measured comparable for evaluation, five typical installations were fixed to a test pipe in **work package 3**. Right next to each thermocouple a thermobead was attached to the surface of the pipe for reference. An extra test pipe was provided with the thermobeads on the outside and also with welding beads sunk into non-through boreholes right above the inner surface. On a test bench both test pipes were heated simultaneously with hot air to 350, 280 und 200°C and than shock-cooled using cold water. While the temperature differences were only small with stationary temperatures, distinct differences - compared with the reading of the respective reference welding bead - were to be found with gradients.

The results first compiled in work package 3 were processed mathematically by Siempelkamp. There were indications that the reference bead did not adequately record the gradients actually occurring on the surface of the pipe. For reconstruction, two supplementary tests were carried out on a test pipe with the original welding beads. In these tests, the original reference beads were used and so were measuring sheets - similar to strain gages - made by Vishay to record the surface temperatures better than before. Though heat-resistant only up to 260°C, the sheets corroborated the values determined by computation (surface gradients). With high cooling down gradients, the different types of installation on a pipe with a wall thickness of 8 - 10 mm showed the following deviations from the actual gradient of the surface of the pipe that had been measured by means of the sheet and established by computation:

- TÜV strap: 82%
- FAMOS new type: 79%
- FAMOS old type: 59%
- TÜV padding: 59% and
- AMTEC: 62%.

The supplementary tests are described in **chapter 3.7**.

Work package 4 deals with the reconstruction and evaluation of the tests applying different methods of computation. Additionally, examples of measurements taken in power plants are checked against FEM models calibrated in the tests. It is demonstrated that with these models the thermal processes going on inside the pipe can be inferred from the temperature traces measured by the installations of the thermocouples. It is thus possible not only to reconstruct the temperature traces measured on the outside of the pipe, but also to transfer the thermal loads to other components for stress and fatigue calculations.

The types of installation are evaluated with regard to fast temperature transients and requirements for the arrangement of the thermocouples are defined.

Work package 5 makes some recommendations for temperature measurements on pipes.

Inhalt	Seite	
0	Kurzdarstellung	6
0.1	Aufgabenstellung	6
0.2	Voraussetzungen	6
0.3	Planung und Ablauf	6
0.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
0.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
1	Beschreibung der Ausgangssituation	8
1.1	Beanspruchungen von Rohrleitungen durch Temperaturen	8
1.1.1	Stationäre Zustände	8
1.1.1.1	Beanspruchungen bei konstanter Temperatur	8
1.1.1.2	Beanspruchungen bei axial veränderlicher Temperatur	9
1.1.1.3	Temperaturschichtungen	10
1.1.2	Temperaturtransienten	10
1.1.2.1	Beanspruchungen durch Transienten	10
1.1.2.2	Transienten „kalt – heiß“	12
1.1.2.3	Transienten „heiß – kalt“	12
1.1.2.4	Transienten mit Temperaturschichtung	13
1.1.3	Temperaturschichtungen	14
1.1.3.1	Schichtung in horizontalen Leitungen: „oben heiß – unten kalt“	14
1.1.3.2	Schichtung in horizontalen Leitungen: „oben kalt – unten heiß“	16
1.1.3.3	Schichtung in vertikalen Rohrleitungen	18
1.1.4	Konsequenzen für Spannungs- und Ermüdungsberechnungen	18
1.2	Installationsarten zur Erfassung von Temperaturen an Rohrleitungen	18
1.2.1	FAMOS alt	19
1.2.2	FAMOS neu	19
1.2.3	AMTEC	19
1.2.4	TÜV Schellen	19
1.2.5	TÜV Polster	19
1.2.6	Sonstige Installationsarten	20
2	Aufbereitung vorhandener Messdaten	22
2.1	Erfasste Belastungen	22
2.2	Eingesetzte Installationsarten	23
2.2.1	FAMOS alt	23
2.2.2	FAMOS neu	23
2.2.3	AMTEC	23
2.2.4	TÜV Schellen	23
2.2.5	TÜV Polster	23
3	Laborversuch	30
3.1	Versuchsstand	30
3.2	Messtechnik	30
3.3	Versuche	31
3.4	Versuchsergebnisse	32
3.5	Bewertung	32
3.6	Zusammenfassung	33
3.7	Ergänzungsversuche	79
3.7.1	Anlass	79
3.7.2	Zusatzinstallation	79

3.7.3	Zusatzversuche	80
3.7.4	Ergebnisse	83
3.7.5	Bewertung	83
3.7.6	Zusammenfassung	86
4	Berechnungen	87
4.1	FEM-Modellierung der Installationen	87
4.1.1	FAMOS alt	88
4.1.2	FAMOS neu	89
4.1.3	AMTEC	90
4.1.4	TÜV Schelle	91
4.1.5	TÜV Polster	91
4.1.6	Referenzperlen	92
4.2	Verifizierung der FEM-Modelle anhand der Laborversuche	94
4.2.1	Auswahl der nachzurechnenden Laborversuche	94
4.2.2	Thermische Randbedingungen	94
4.2.3	Ergebnisse der Verifikation	97
4.3	FEM-Berechnung und Auswertung vorliegender Messdaten	100
4.4	Vergleich der Installationen anhand der inversen Temperaturberechnung	102
4.4.1	Messwerte der Installationen	102
4.4.2	Messwerte der Siempelkamp-Messebene	103
4.5	Spannungs- und Ermüdungsberechnung	105
4.5.1	Auswertung der Versuche	105
4.5.2	Bewertung der Berechnungsergebnisse	107
4.6	Bewertung der Installationsarten im Hinblick auf schnelle Transienten	108
4.6.1	Temperaturänderungsgeschwindigkeiten	108
4.6.2	Abheben des Thermoelementes vom Rohr	108
4.6.3	Abfragefrequenz	109
4.7	Anforderungen an die Anordnung der Temperaturmessstellen	111
4.7.1	Erfassung schneller Vorgänge	111
4.7.2	Erfassung von Temperaturschichtungen	111
5	Empfehlungen	130
5.1	Messtechnik	130
5.1.1	Verbesserung der Installationen	130
5.1.2	Abfragefrequenz	131
5.1.3	Messstellenanordnung	131
5.2	Messwertverarbeitung	132
5.2.1	Signalauswertung	132
5.2.2	Berücksichtigung der Trägheit der Messinstallationen	133

0. Kurzdarstellung

0.1 Aufgabenstellung

Mit dem Untersuchungsvorhaben sollten auf der Basis der Ergebnisse der Studie SR 2218 "Qualifikation und Bewertung von Konzepten und Verfahren zur Betriebsüberwachung von Rohrleitungen und Behältern in Kernkraftwerken" die verschiedenen Arten der Messung der Oberflächentemperaturen im Hinblick auf ihren Einfluß auf die Ermüdungsüberwachung verglichen und bewertet werden. Aufgrund dieser Erkenntnisse sollten Empfehlungen für ein einheitliches Vorgehen bei Neuinstallationen bzw. für eine einheitliche Bewertung vorhandener Installationen gegeben werden.

0.2 Voraussetzungen

Voraussetzungen für Durchführung des Vorhabens waren

- die Erkenntnisse aus der Studie SR 2218,
- die messtechnischen Erfahrungen aus vielen Betriebsmessungen des Hauptauftragnehmers sowie
- auf der Seite des Unterauftragnehmers die Erfahrungen bei der Umsetzung gemessener Temperaturverläufe in Belastungsannahmen zur Temperaturfeld-, Spannungs- und Ermüdungsberechnung und dessen versuchstechnische Möglichkeiten.

0.3 Planung und Ablauf

Es war geplant, das Vorhaben in fünf Arbeitspaketen abzuwickeln:

- Arbeitspaket 1: Beschreibung der Ausgangssituation,
- Arbeitspaket 2: Aufbereitung vorliegender Messdaten,
- Arbeitspaket 3: Durchführung des Laborversuches,
- Arbeitspaket 4: Berechnungen und
- Arbeitspaket 5: Empfehlungen.

Projektleitung, Koordination, Projektgespräche und Berichterstattung wurden im

- Arbeitspaket 6: Projektleitung und Berichterstattung zusammengefasst.

Der geplante Zeitablauf und seine Realisierung sind in **Bild 0.1** dargestellt.

Gegenüber der Planung ergab sich im Arbeitspaket 3 eine Abweichung durch die Notwendigkeit eines Zusatzversuches, die sich auch auf die Arbeitspakete 4 und 5 auswirkte. Insgesamt wurde das Vorhaben trotzdem im Rahmen des Gesamtzeit- und Kostenplanes abgewickelt.

0.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Angeknüpft wurde an Erkenntnisse aus der Studie SR 2218, an eigene Erfahrungen auf dem Gebiet der Temperaturüberwachung von Rohrleitungen in Kraftwerken sowie auf dem Gebiet der Spannungs- und Ermüdungsbewertung gemessener thermischer Vorgänge in Rohrleitungsbauteilen.

0.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Hauptauftragnehmer TÜV Anlagentechnik GmbH, Köln, schaltete als Unterauftragnehmer die Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH, Dresden ein. Die Firmen Framatome ANP GmbH, Erlangen und AMTEC Messtechnischer Service GmbH, Lauffen stellten für die Laborversuche Originalinstallationen bei und nahmen an den Versuchen teil.

Arbeitspaket	Jahr Monat	2001						2002									Bearbeitungsstand Bericht
		7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
AP 1	Beschreibung der Ausgangssituation	Plan															AP abgeschlossen
	Ist-Stand	Ist															12.09.01
AP 2	Bereitstellung vorhandener Meßdaten	Plan															AP abgeschlossen
	Ist-Stand	Ist															30.10.01
AP 3	Durchführung von Laborversuchen			Plan													AP abgeschlossen
	Ist-Stand			Ist											Zusatzversuch		08.03.02/08.10.02
AP 4	Berechnungen	Plan															AP abgeschlossen
	Ist-Stand	Ist															30.09.02
AP 5	Empfehlungen												Plan				AP abgeschlossen
	Ist-Stand																30.09.02
AP 6	Projektgespräche	Plan						Plan						Plan			23.08.01
	Ist-Stand	Ist					Ist								Ist		20.12.01/05.09.02
AP 6	Quartalsberichte											Ist			Ist		
	Ist-Stand												Ist				31.03.02/30.06.02
AP 6	Jahresbericht							Ist									
	Ist-Stand							Ist									31.12.01
AP 6	Schlußbericht														Plan		
	Ist-Stand														Ist		30.11.02

Bild 0.1: Zeitplan zum Projekt BfS SR 2392

1. Beschreibung der Ausgangssituation

1.1 Beanspruchungen von Rohrleitungen durch Temperaturen

In Spannungs- und Ermüdungsanalysen von Kernkraftwerksrohrleitungen liefern i. a. Temperaturbelastungen die größten Spannungsanteile. Dabei ist die Auswirkung von Temperaturen und Temperaturdifferenzen auf die Beanspruchung von Rohrleitungen sehr vielschichtig. **Tabelle 1.1** zeigt die wesentlichen Arten, die im Folgenden diskutiert werden. Man unterscheidet stationäre Zustände (Abschnitt 1.1.1) und Transienten (Abschnitt 1.1.2). Außerdem werden Temperaturschichtungen beobachtet (Abschnitt 1.1.3), die sowohl als stationäre Zustände als auch als Teil von Transienten auftreten.

1.1.1 Stationäre Zustände

1.1.1.1 Beanspruchungen bei konstanter Temperatur

Schon bei einer konstanten Rohrleitungstemperatur entstehen in der Leitung Spannungen infolge der behinderten Wärmedehnung des Rohrleitungssystems. Diese Behinderung der Wärmedehnung macht sich in zusätzlichen Kräften und Momenten bemerkbar, insbesondere an den Behälterstutzen der Leitung sowie an den angrenzenden Rohrbögen. **Bild 1.1** zeigt schematisch die auftretenden Ovalisierungsbeanspruchungen in Rohrbögen durch ein zubiegendes Moment.

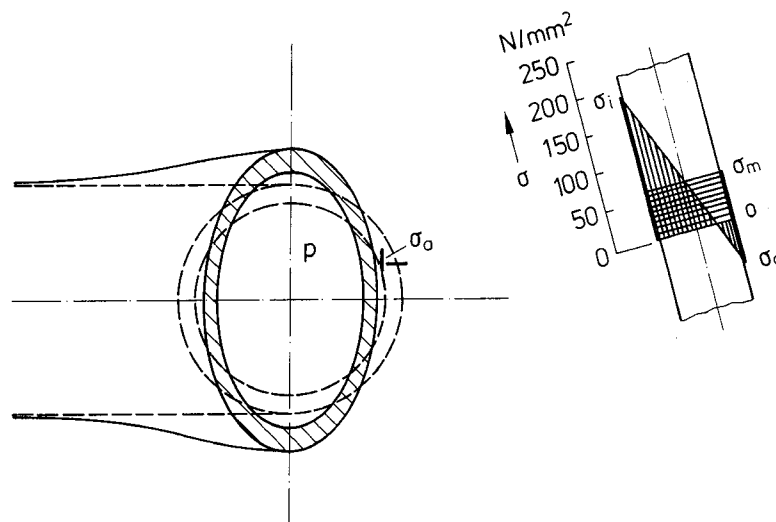


Bild 1.1: Beanspruchung eines Rohrbogens durch behinderte Wärmeausdehnung

1.1.1.2 Beanspruchungen bei axial veränderlicher Temperatur

Beanspruchungen in Rohrleitungen durch Temperaturbelastungen treten auch durch axiale Temperaturdifferenzen auf.

Ist die Temperaturverteilung in der Leitung in axialer Richtung linear, so treten dadurch keine zusätzlichen Beanspruchungen auf (**Bild 1.2**). Das zylindrische Rohr verformt sich spannungsfrei zu einem Konus.

Bei Abweichungen vom linearen, axialen Verlauf treten temperaturbedingte Beanspruchungen auf. Nichtlineare Temperaturverteilungen in axialer Richtung wurden im vertikalen Teil der Sprühleitung vor den Sprühventilen bei stehenden Hauptkühlmittelpumpen gemessen. Der Wasserspiegel in der Sprühleitung fällt auf das Niveau des Druckhalterfüllstandes. Oberhalb des Wasserspiegels ist in der Sprühleitung Dampf (Wasserstoff-Dampf-Gemisch) vorhanden, das die Leitung erwärmt. Das Wasser selbst ist kalt. Damit kommt es in Höhe des Wasserspiegels zu einem nichtlinearen Temperaturverlauf in axialer Richtung (**Bild 1.5**).

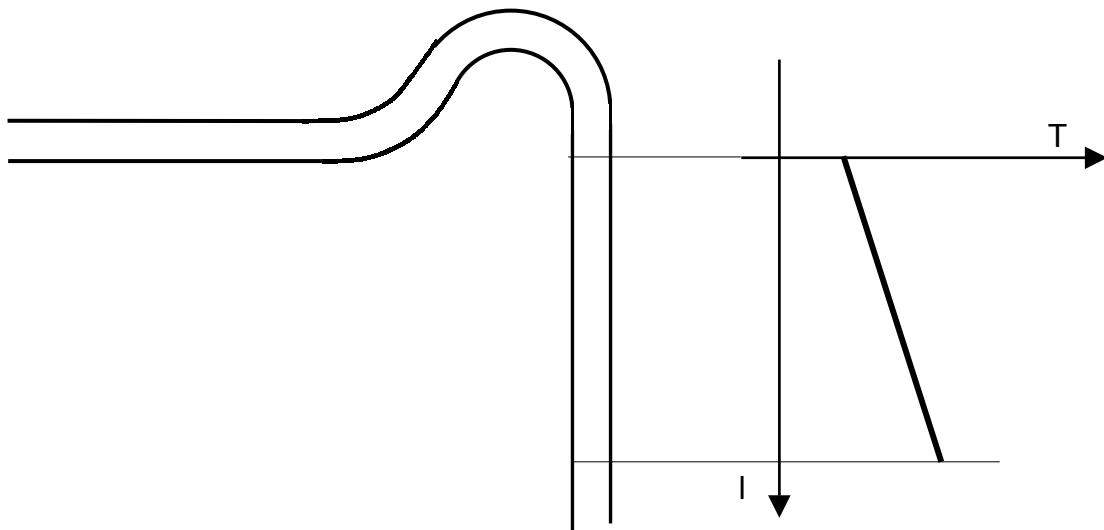


Bild 1.2: Axiale Temperaturdifferenz in einer vertikalen Hilfssprühleitung

1.1.1.3 Temperaturschichtungen

Stationäre Temperaturschichtungen treten in verschiedenen Rohrleitungen auf. Diese werden im Abschnitt 1.1.3 diskutiert.

1.1.2 Temperaturtransienten

1.1.2.1 Beanspruchungen durch Transienten

Transiente Vorgänge mit rotationssymmetrischem Temperaturprofil, sogenannte „Kolbenströmungstransienten“, belasten die Rohrleitung im Wesentlichen durch die dabei auftretenden radialen Temperaturdifferenzen (**Bild 1.3**).

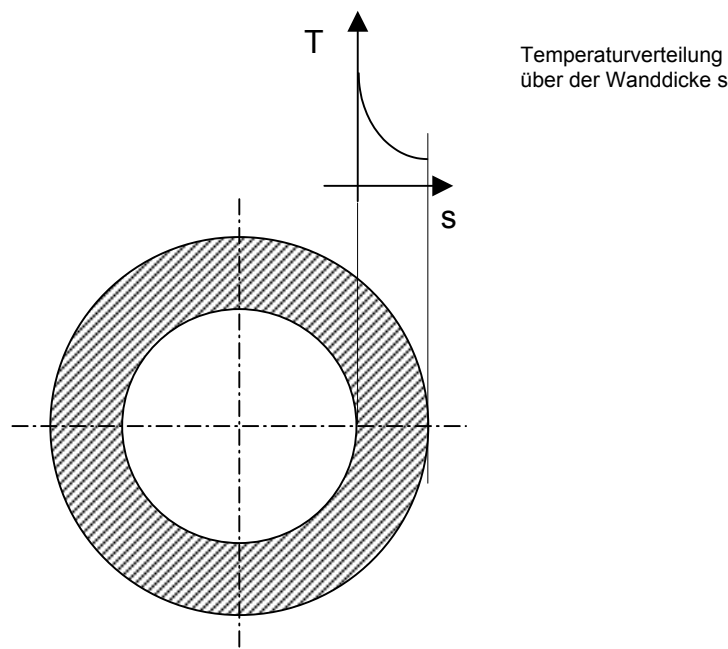


Bild 1.3: Eindimensionale Temperaturverteilung (nur Temperaturdifferenzen über der Wanddicke s) bei Kolbenströmungszuständen

Im Bereich von Wanddickenveränderungen treten bei Kolbenströmungstransienten zusätzlich zu den radialen auch axiale Temperaturdifferenzen infolge der unterschiedlichen mittleren Temperatur „rechts“ T_{mr} und „links“ T_{ml} der Störstelle auf (**Bild 4**). Die Rohrleitung wird zusätzlich durch den Temperaturunterschied der mittleren Temperatur $T_{mr} - T_{ml}$ beansprucht:

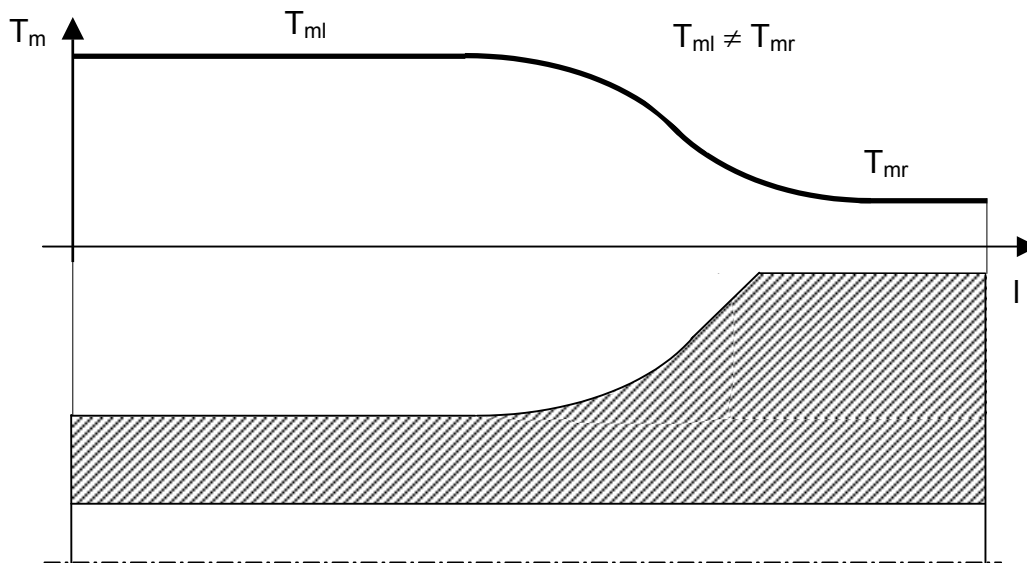


Bild 1.4: Temperaturdifferenz $T_{mr} - T_{ml}$ bei Kolbenströmungstransienten an Wanddickenübergängen

Temperaturdifferenzen $T_{ml} - T_{mr}$ können auch in vertikalen Rohrleitungen ohne Wanddickenübergang auftreten. Das in **Bild 1.5** gezeigte Phänomen in Sprühleitungen tritt während des sinkenden Wasserspiegels nach dem Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen auch als transients Vorgang auf.

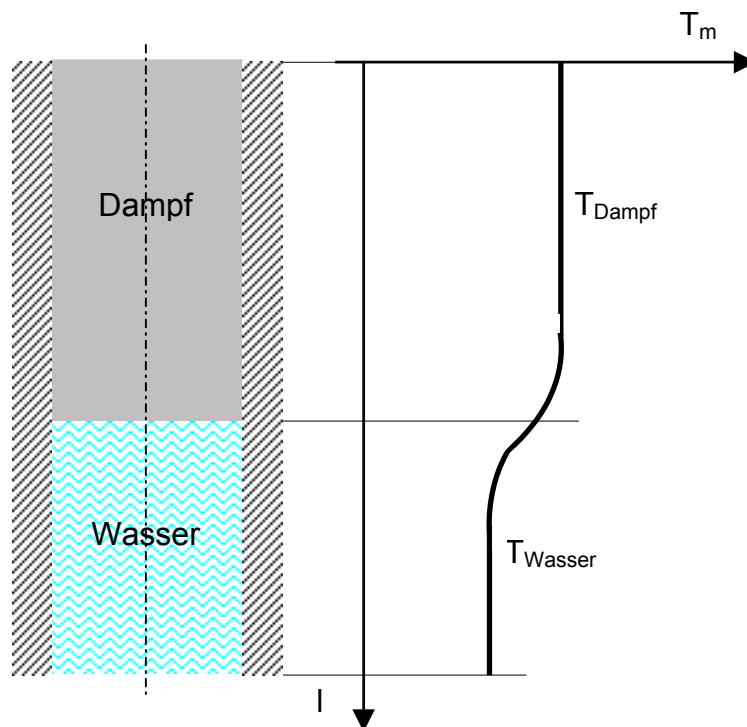


Bild 1.5: Temperaturdifferenz $T_{mr} - T_{ml}$ ohne Wanddickenübergänge in einem vertikalen Rohr (nichtlinear in axialer Richtung)

Kolbenströmungstransienten können sowohl von einem „warmen“ Ausgangszustand der Leitung in einen „kalten“ Endzustand verlaufen (negativer zeitlicher Temperaturgradient) als auch umgekehrt. Spannungs- und ermüdungsmäßig sind die Rohrleitungen hoch belastet, bei denen sowohl Transienten mit negativem als auch mit positivem Temperaturgradienten vorkommen. Ein markantes Beispiel dafür sind die Sprühleitungen bzw. die Hilfssprühleitung.

1.1.2.2 Transienten „kalt – heiß“

Beim Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen strömt in die ca. 50 °C kalte Sprühleitung aus dem je nach Abfahrtechnologie bis zu 242 °C heißen Druckhalter Sattedampf ein. Dieser Dampf kondensiert mit hohen Wärmeübergangskoeffizienten an der Wand. Es kommt zu einem Thermoschock, bei dem an der Außenwand Temperaturgradienten bis zu +10 K/s gemessen werden.

1.1.2.3 Transienten „heiß – kalt“

An der gleichen Leitung treten beim Anfahren bzw. beim Sprühbeginn Transienten mit negativem Temperaturgradienten auf. Beim Anfahren der Anlage wird zunächst bei stehenden Hauptkühlmittelpumpen der Druckhalter durch die elektrische Heizung auf „Temperatur und Druck“ gebracht. Die leere Sprühleitung heizt sich dabei auf die Druckhaltertemperatur (z. B. 242 °C) auf. Beim Einschalten der Hauptkühlmittelpumpen gelangt kaltes Wasser (50 °C) aus der Hauptkühlmittelleitung in die Sprühleitung. Die dabei auftretenden Wärmeübergangskoeffizienten sind nicht so hoch wie beim Einströmen von Sattedampf in die kalte Leitung. Deshalb werden bei diesem Vorgang auch nicht ganz so hohe (negative) Temperaturgradienten gemessen.

In einigen Kraftwerken ist die „Borierleitung“ (TW- System bzw. JDH-System) in die Sprühleitung über ein T-Stück eingebunden. Beim Sprühen mit der „Borierleitung“ (zu Nachweiszwecken bei der Inbetriebsetzung (IBS) des Kraftwerkes) gelangt in die leere 345 °C heiße Sprühleitung Wasser von nur 20 °C. Wandtemperaturmessungen von IBS-Versuchen liegen nicht vor. Bei einem „TW-Sprühversuch“ in eine mit Thermoelementen versehene Sprühleitung wurden bei einer Ausgangstemperatur von 240 °C Außenwandtemperaturgradienten an der Sprühleitung von ca. -9 K/s gemessen.

1.1.2.4 Transienten mit Temperaturschichtung

Neben den reinen „Kolbenströmungstransienten“ werden in Kernkraftwerken auch relativ schnell verlaufende Transienten beobachtet, bei denen eine nicht rotationssymmetrische Temperaturbelastung der Rohrleitung auftritt. Man spricht in diesem Fall von Transienten mit Temperaturschichtung. Ein solcher Vorgang tritt z. B. in einer betrieblichen Sprühleitung am Ende eines Sprühvorganges auf. Die durch den Sprühvorgang abgekühlte Leitung läuft im Bereich nach den Sprühventilen leer. In den horizontalen Leitungsabschnitten befindet sich dabei für kurze Zeit im unteren Teil der Leitung noch das kalte Sprühmedium, während im oberen Teil der Leitung bereits Sattedampf aus dem Druckhalter in die Sprühleitung eingeströmt ist. Dadurch treten neben den radialen Temperaturdifferenzen über der Wand auch noch Temperaturdifferenzen in der Leitung zwischen „oben „ und „unten“ auf (**Bild 1.6**). Einen gemessenen Vorgang dieser Art während eines TW-Sprühens zeigt **Bild 7**

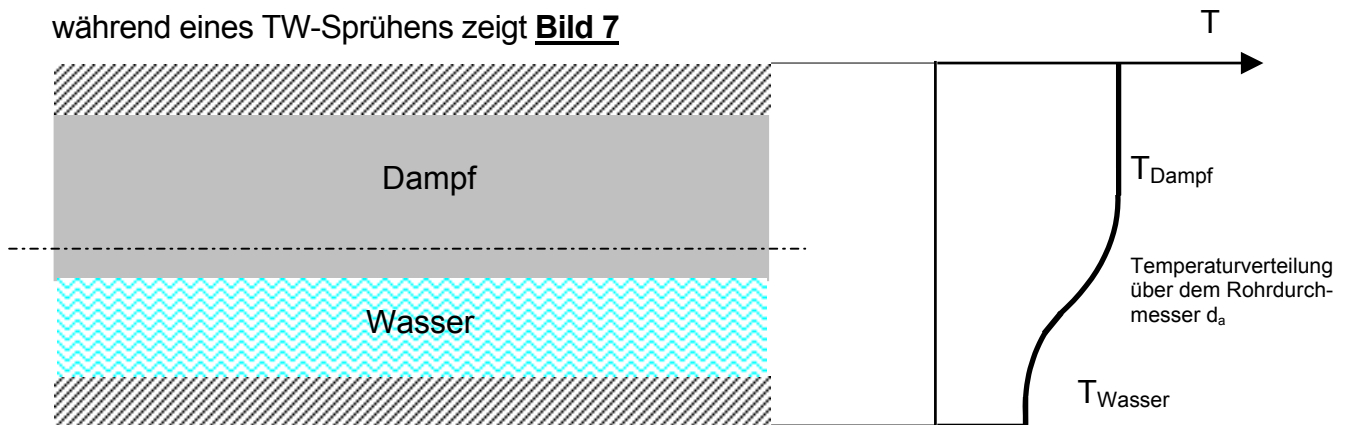


Bild 1.6: Positive Temperaturschichtung in einer horizontalen Leitung (Sprühleitung nach dem Sprühventil beim Dauersprühen)

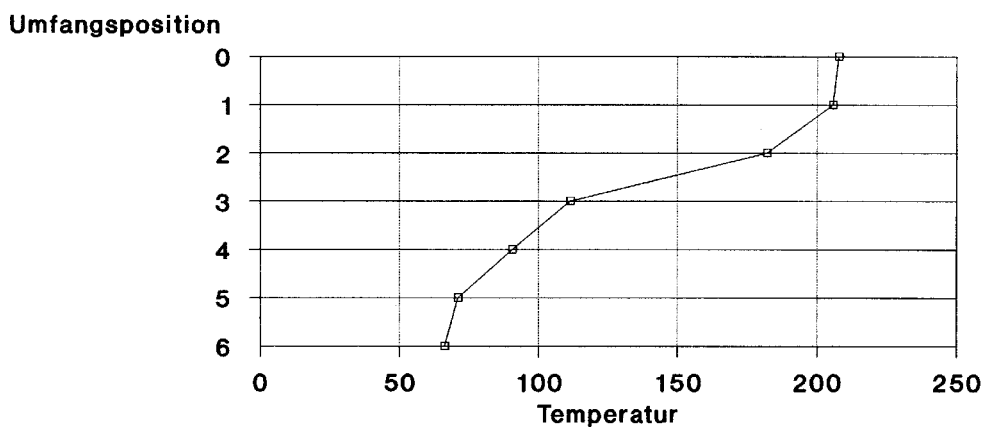


Bild 1.7: Messtechnische Erfassung einer positiven Temperaturschichtung über der Abwicklung des halben Umfangs (0 = oben, 6 = unten)

1.1.3 Temperaturschichtungen

Temperaturschichtungen treten sowohl als stationäre Zustände als auch als Teil von Transienten auf. Die dadurch hervorgerufenen Beanspruchungen werden im Folgenden diskutiert.

1.1.3.1 Schichtung in horizontalen Leitungen: „oben heiß – unten kalt“

Bei einer Temperaturschichtung „oben“ heiß und „unten“ kalt (**wie in Bild 1.6**) will sich die Rohrleitung bogenförmig nach oben verformen. I. a. wird sie aber durch die mehr oder weniger steife Verlegung der Rohrleitung daran gehindert. Es entstehen wiederum Wärmespannungen durch die Behinderung der Wärmedehnung des Rohrleitungssystems. Die Temperaturschichtung macht sich bei einer Spannungsanalyse durch erhebliche zusätzliche Momente an den Behälterstützen bemerkbar.

Für eine Ermüdungsanalyse ist bei Temperaturschichtungs Zustände die Form der Temperaturverteilung in Umfangsrichtung von ausschlaggebender Bedeutung. Ist die Temperaturverteilung in Umfangsrichtung rein sinusförmig (von der Seite betrachtet ist dann über der Höhe der Leitung eine lineare Temperaturverteilung vorhanden), treten am Rohrumfang örtlich keine zusätzlichen Temperaturbelastungen auf.

Bei nicht sinusförmiger Temperaturverteilung in Umfangsrichtung (wie z. B. in **Bild 1.6**) treten zusätzliche örtliche Temperaturbelastungen auf. Ein Beispiel hierfür sind die in der Hauptkühlmittelleitung (HKL) durch Outsurge-Vorgänge aus der Volumenausgleichsleitung (VAL) hervorgerufenen Temperaturschichtungen. Die Hauptkühlmittelleitung wird dabei nur im Bereich zwischen der 12-Uhr- und 1-Uhr-Position heiß. Der „lineare“ Temperaturschichtungsanteil, der für die bogenförmige Verformung der Leitung verantwortlich ist, ist dabei relativ klein. Die Rohrwand in der 12-Uhr-Position will sich entsprechend ihrer Temperatur ausdehnen, wird aber durch die im Mittel kalte Leitung daran gehindert. In der 12-Uhr-Position entstehen dadurch örtlich Wärmepressuren.

Liegt eine relativ „harte“ Trennschicht in der Leitung vor, wie dies z. B. bei den Temperaturschichtungen in der Volumenausgleichsleitung der Fall ist, treten auch noch oberhalb und unterhalb der Trennschicht wesentliche örtliche Temperaturbelastungen auf.

Transienten mit Temperaturschichtung und sowohl positiven als auch negativen Temperaturgradienten werden an den Dampferzeugerspeisewasserstutzen beobachtet. Am Ende einer Einspeisung (bei einer Bespeisungsunterbrechung) erwärmt sich der Speisewasser-Stutzenbereich bis zum Ventil durch freie Konvektion auf Dampferzeugertemperatur (z. B. von 120 °C auf 269 °C). Bei der anschließenden Bespeisungsaufnahme wird der Stutzenbereich relativ rasch abgekühlt. Bei dieser Abkühlung werden sowohl reine Kolbenströmungstransienten als auch Transienten mit Temperaturschichtung beobachtet. **Bild 1.8** zeigt einen Schichtungszustand, bei dem auch deutlich die örtlich begrenzte Ausdehnung der „kalten Strähne“ (ca. 5-Uhr- bis 7-Uhr-Position) und die daraus resultierende nicht sinusförmige Temperaturverteilung zu erkennen ist.

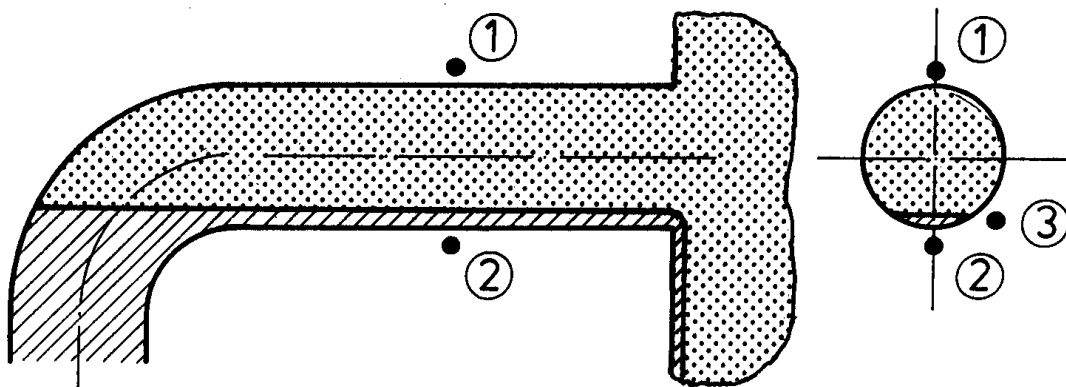


Bild 1.8: Temperaturschichtung in einem Einspeisestutzen bei Teilspeisung eines kalten Mediums in ein heißes

Ein weiteres Beispiel für Temperaturschichtung „oben heiß – unten kalt“ wird im Bereich der HD-Umfahrung beobachtet, wo sich bedingt durch eine Querschnittsverringeringung ein Wasserspiegel etwa in 4-Uhr-Position ausbildet (**Bild 1.9**). Dieses Bild zeigt eine weitere zu beachtende Situation: hier liegt eine Leitung für kaltes Medium über einer Leitung für heißes Medium (hinter den beiden Vorwärmern). Die beim Öffnen der HD-Umfahrung auftretende Vermischung "kalt" mit "heiß" sollte in dem dafür ausgelegten Formstück hinter den Vorwärmern stattfinden. Da aber kaltes Medium schwerer ist als heißes, lief das kalte Medium aus der oberen Leitung und wurde durch heißes aus der tieferliegenden Leitung ersetzt. So fand die Vermischung beim Öffnen der Umfahrung in dem ersten Rohrbogen über dem Ventil statt, und da der dafür nicht ausgelegt war, kam es zu Schäden.

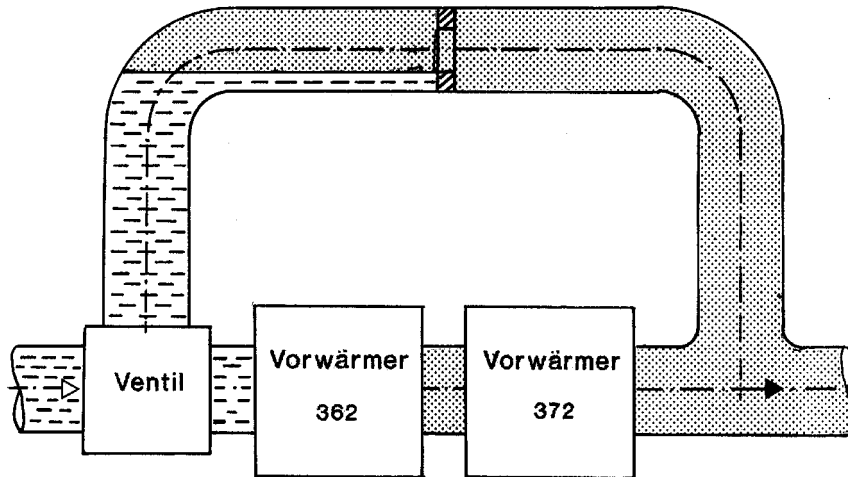


Bild 1.9: Austausch kalten Mediums durch heißes in einer kalten, über einer heißen angeordneten Leitung

1.1.3.2 Schichtung in horizontalen Leitungen: „oben kalt – unten heiß“

Normalerweise ist bei Temperaturschichtungen infolge der Dichteunterschiede des Mediums die 12-Uhr-Position heißer als die 6-Uhr Position (**Bild 1.6**). Im Sprachgebrauch hat sich dafür der Begriff „positive Temperaturschichtung“ eingebürgert.

Beim Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen werden in Sprühleitungen, insbesondere vor den Sprühventilen, auch „negative Temperaturschichtungen“ gemessen, d. h., die 12-Uhr-Position ist kälter als die 6-Uhr Position (**Bild 1.10**). Die höchste Temperatur am Rohrumfang tritt bei diesen Transienten in der 4-Uhr-Position auf.

Diese Temperaturphänomene können durch das Vorhandensein von Wasserstoff in der Leitung erklärt werden. In den horizontalen Ast der Sprühleitung vor den Sprühventilen gelangt beim Leerlaufen der Leitung zunächst Wasserstoff. Durch seine geringe Wärmekapazität und die extrem niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten ändert sich die Rohrwandtemperatur dadurch nicht. Erst wenn der kalte Wasserspiegel ca. auf die 3-Uhr-Position abgefallen ist, fließt heißes Kondensat aus dem vertikalen Rohrabschnitt auf die kalte Wasseroberfläche. Da die Kondensatmenge gering ist, bleibt der Rohrquerschnitt zwischen der 12-Uhr- und 3-Uhr- Position im Wesentlichen mit Wasserstoff gefüllt. Die dünne (heiße) Kondensatschicht erwärmt die Leitung nur in der 4-Uhr-Position.

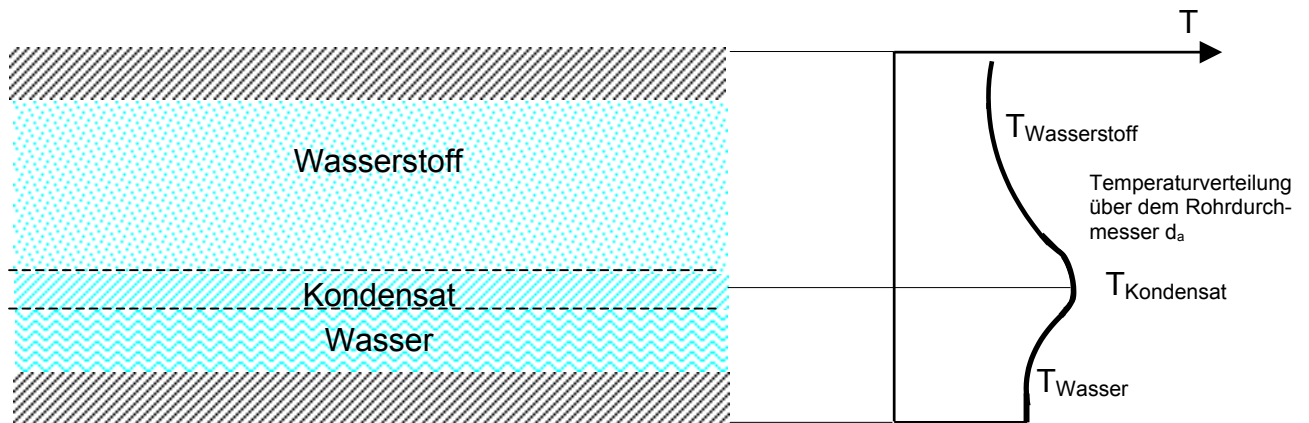


Bild 1.10: Negative Temperaturschichtung in einer horizontalen Leitung (Sprühleitung vor dem Sprühventil nach dem Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen)

Bild 1.11 zeigt dieses Phänomen der inversen Temperaturverteilung an Hand einer Temperaturmessung an einer Sprühleitung.

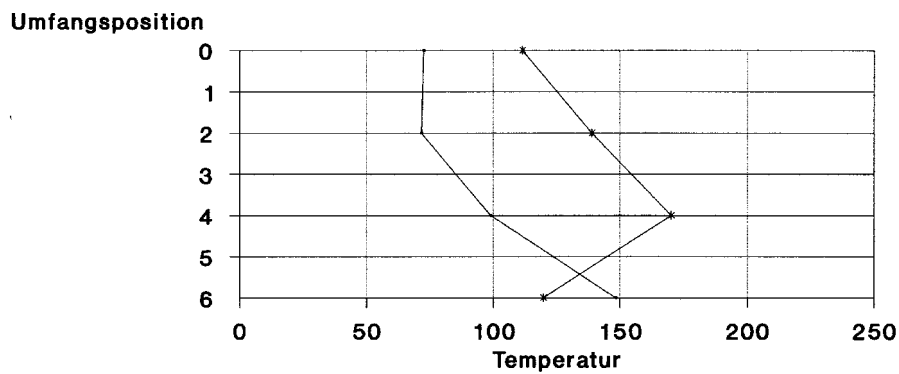


Bild 1.11: Gemessene Temperaturverteilungen mit dem Maximum bei 4 Uhr- und bei 6 Uhr-Position Umfangslage

1.1.3.3 Schichtung in vertikalen Rohrleitungen

Transienten mit Temperaturschichtung wurden auch in vertikalen Leitungen gemessen. Bei vertikalen Leitungen kann z. B. bei kleinen Leckage-Mengen einseitig eine Wassersträhne herablaufen. Bei einer Hilfssprühleitung wurden dabei bis zu 110 K "Schichtung" beobachtet. Pendelt diese Strähne in Umfangsrichtung, so können dadurch auch noch örtlich radiale Temperaturdifferenzen auftreten.

1.1.4 Konsequenzen für Spannungs- und Ermüdungsberechnungen

Wie die Darlegungen zeigen, ist das Belastungsgeschehen von Rohrleitungen durch Temperaturen sehr vielschichtig. Für eine Nachweisführung ist es wesentlich, dass man die gemessenen Temperaturen in Belastungsannahmen für Spannungs- und Ermüdungsanalysen umsetzt.

Die Temperaturmessungen an Rohrleitungen können i. a. nicht an den spannungs- und ermüdungsmäßig führenden Stellen (z. B. Behälterstützen) durchgeführt werden. Um Aussagen über die Beanspruchungen der dickeren Bauteile machen zu können, müssen aus den gemessenen Außenwandtemperaturen die thermischen Randbedingungen (Mediumtemperatur und Wärmeübergangskoeffizient) an der Rohrinnenoberfläche ermittelt werden. Mit diesen thermischen Randbedingungen kann dann das Temperaturfeld und die Wärmespannung in dem ermüdungsmäßig führenden Bauteil berechnet werden.

1.2 Installationsarten zur Erfassung von Temperaturen an Rohrleitungen

Zur messtechnischen Erfassung der Temperaturen von Rohrleitungen sind in Kernkraftwerken eine Vielzahl von Messebenen mit jeweils unterschiedlicher Anzahl von Messstellen eingerichtet [BMU-Studie SR 2218]. Die Messungen werden in der Regel mit NiCr-Ni Thermoelementen mit einem Durchmesser von 1 mm durchgeführt. Diese Thermoelemente werden von den verschiedenen Firmen, die derartige Installationen einrichten, auf unterschiedliche Art mit der Rohroberfläche in Berührung ge-

bracht. Ziel dieser Arbeit ist, diese Installationsarten miteinander zu vergleichen, um die gemessenen Temperaturen vergleichbar zu bewerten.

Im Folgenden werden die verschiedenen Installationsarten kurz beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung folgt im Teil 2 auf der Basis der dann aus tatsächlichen Installationen vorliegenden Informationen. Hier sei hinsichtlich genauerer Informationen auf die bereits erwähnte Studie SR 2218 hingewiesen.

1.2.1 FAMOS alt

Bei der Installation "FAMOS alt" wurden die Thermoelemente mit kleinen Schellen auf einem Spannband vorbefestigt mit überkragenden Köpfen der Thermoelemente. Diese Köpfe wurden mit einem zweiten Spannband auf die Rohroberfläche gedrückt. Um diese Installation wurde dann mit Abstandsbolzen eine massive zweiteilige Schutzschelle gelegt.

1.2.2 FAMOS neu

Auch bei dieser Installationsart sind die Thermoelemente mit kleinen Schellen auf einem hier breiteren Spannband außen befestigt. Die Thermoelemente kragen aber nicht über, sondern sind ebenfalls mit einer Folie außen auf dem Spannband befestigt. Auch diese Installation wird durch eine Massive Schutzschelle abgedeckt.

1.2.3 AMTEC

Bei dieser Installationsart werden die Thermoelemente mit Spannbandern auf die Rohroberfläche gedrückt, wobei zwischen Aufnehmer und Spannband ein Isolierkissen gelegt wird. Damit sollen eine Wärmeisolierung und ein mechanischer Schutz erreicht werden.

1.2.4 TÜV Schellen

Hier werden die Thermoelemente wie bei 1.2.1 auf einem Spannband vorbefestigt. Die überkragenden Köpfe werden dann aber mit kleinen Schellen einzeln befestigt. Um eine eventuelle Temperaturabfuhr in der Schutzschelle zu vermeiden, wurde auf diese verzichtet und die Installation unmittelbar isoliert.

1.2.5 TÜV Polster

Die Thermoelemente werden auch hier auf einem Spannband vorbefestigt. An den Messpositionen befindet sich unter dem Spannband ein am Spannband innen befe-

befestigtes Glasfaser-Polster. Das Thermoelement wird hier unter das Spannband geführt und dann mit dem Polster festgespannt. Auch diese - relativ wenig Platz brauchende - Installation wird ohne weiteren Schutz direkt isoliert.

1.2.6 Sonstige Installationsarten

Als weitere Installationsarten sind u.a. möglich:

- Thermoelemente in einer aussen eingefrästen Nut,
- Thermoelemente, die in eine Bohrung bis dicht an die Innenoberfläche des Rohres geführt werden,
- dünnere Thermoelemente,
- Thermoelemente, die als Perle auf die Rohroberfläche geschweißt werden,
- Temperaturmessfolien auf Widerstandsbasis..

Im Verlauf der Detailplanung zu den vorgesehenen Versuchen wird geklärt, welche dieser sonstigen Installationsarten zusätzlich eingesetzt werden.

Beanspruchung		Temperatur	Max. Temperatur- änderungsgeschwindig- keit bei Messung mit "FAMOS alt"	bei Wanddicke in mm	Beispiel		
					Zustand	Leitung	Bild
Stationäre Zustände	1.1	Konstant, aber verschieden von der Montagetemperatur	-	-	Stationärer Betrieb	Hauptkühlmittelleitung (HKL)	1.1
	1.2	Axial veränderlich	-	-	nach Abschalten HKMP (Wasserspiegel in Höhe Druckhalter- Füllstand)	vertikale Leitungen wie Sprühleitung / Hilfssprühleitung u.a.	1.2
Transienten mit Kolbenströmung	2.1	Einfluß Wanddicke	-	-	radiale Temperaturdifferenz	allgemein	1.3
					Wanddickenveränderung	allgemein	1.4
	2.2	kalt -> heiß	ca. 5 K/s außen	ca. 10	Dampf einströmen	Sprühleitung	
			ca. 5 K/s außen	ca. 10	Abschaltung HKMP	Sprühleitung	
			ca. 1,5 K/s außen	ca. 14	Pumpenumschaltung	Stutzen Rekuperator	
			ca. 2 K/s außen	ca. 10	veränderliche vertikale Säule	Sprühleitung (bei stehender HKMP) auch 1.2	1.5
	2.3	heiß -> kalt	ca. 6 K/s außen	ca. 10	TW-Sprühen	Sprühleitung	
			ca. 6 K/s außen	ca. 10	Sprühbeginn	Sprühleitung und Hilfssprühltg	
			ca. 1,5 K/s außen	ca. 14	Pumpenumschaltung	Stutzen Rekuperator	
			ca. 2 K/s außen	ca. 10	veränderliche vertikale Säule	Sprühleitung (bei stehender HKMP) auch 1.2	1.5
Schichtungen, stationär und instationär	3.1	oben heiß/unten kalt	-	-	Dauersprühen	Sprühleitungen	
			ca. 5 K/s außen	ca. 10	Ende Sprühvorgang	Sprühleitung und Hilfssprühltg	1.6
			-	-	Teilbespeisung	Speisewasserstutzen	1.7
			ca. 2 K/s außen	ca. 10	Einschalten HKMP	Sprühleitung	
			-	-	Leerlaufen bei Blende	kalte Leitung über heißer Leitung	1.9
			ca. 0,5 K/s außen	50-60	Outsurgevorgänge	HKL	
			ca. 1 K/s außen	ca. 40	In- und Outsurgevorgänge	Surgeline	
	3.2	oben kalt/unten heiß	-	-	HKMP aus	Sprühleitung	1.10
			-	-	HKMP aus	ggf. auch Hilfssprühleitung	
	(3.2)	oben/unten kalt, Mitte heiß	-	-	nach Abschalten HKMP	Sprühleitung vor Sprühventil	1.10 1.11
	3.3	senkrecht ortsveränderlich	-	-	gewollte oder ungewollte Leckage	Hilfssprühleitung	

Tabelle 1.1: Beanspruchung von Rohrleitungen durch Temperatur

2 **Aufbereitung vorliegender Messdaten**

2.1 **Erfasste Belastungen**

Es liegen Messdaten aus 5 verschiedenen deutschen Kernkraftwerken (A bis E) vor, siehe **Tabelle 2.1**. Die Messwerte umfassen folgende Systeme:

- Hauptkühlmittelleitung
- Volumenausgleichsleitung (Surgeline)
- Betriebliche Sprühleitungen
- Hilfssprühleitungen und
- Speisewasserstutzen am Dampferzeuger

Durch die größtenteils über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich vorhandenen Aufzeichnungen an den verschiedenen Rohrleitungssystemen kann auf einen umfangreichen Datenbestand zurückgegriffen werden. Für die im Folgenden aufgeführten thermischen Belastungen sind Messbeispiele verfügbar (siehe auch Tabelle 2.1):

- Stationäre Beanspruchung bei konstanter Temperatur (1.1)
- Stationäre Beanspruchung bei axial veränderlicher Temperatur (1.2)
- Instationäre Beanspruchung bei Transienten „kalt – heiß“ (2.2)
- Instationäre Beanspruchung bei Transienten mit Temperaturschichtung (2.4)
- Schichtungen in horizontalen Leitungen: „oben heiß – unten kalt“ (3.1)
- Schichtung in horizontalen Leitungen: „oben kalt – unten heiß“ (3.2)
- Schichtung in vertikalen Rohrleitungen (3.3)

In dieser Auflistung sind alle im Kapitel 1.1 genannten für Rohrleitungen relevanten thermischen Beanspruchungen enthalten. Die in Klammern gesetzten Zahlen entsprechen jeweils den dortigen Gliederungs-Unterpunkten.

Die Messdaten liegen als Datentabellen teils in Form von ASCII-Dateien, teils als EXCEL-Dateien vor. Um eine sinnvolle Datenkomprimierung zu erreichen, werden im Kraftwerk nur dann Messwerte gespeichert, wenn Änderungen auftreten. Der jeweils kürzeste Aufzeichnungstakt ist abhängig vom verwendeten Messwertverarbeitungssystem und wird in Tabelle 2.1 ebenfalls angegeben.

Zur im Arbeitspaket 4 stattfindenden Temperaturfeld- und Spannungsberechnung werden die relevanten Zeiträume aus dem Datenmaterial herausgefiltert, d.h. es

werden die Abschnitte betrachtet, in denen die o. g. Beanspruchungen registriert wurden. Anschließend erfolgt eine Darstellung in Diagrammform.

2.2 Eingesetzte Installationsarten

2.2.1 FAMOS alt

Bei dieser in den deutschen Kernkraftwerken am häufigsten vorhandenen Installationsart A, **Anlage 2.1**; werden die Köpfe der Thermoelemente mit einem Spannband auf die Oberfläche des Rohres festgespannt. Die Installation wird mit einer massiven Schutzschelle geschützt.

2.2.2 FAMOS neu

Anlage 2.2 zeigt, dass bei dieser Installationsart B die Thermoelemente außen auf einer Spannschelle mit dünnen Folien befestigt werden. Die Schelle wird dann verspannt und wie bei 2.2.1 mit einer massiven Schutzschelle geschützt.

2.2.3 AMTEC

Diese Installationsart C besteht aus einer Zugentlastung mit zwei Spannbändern für das Rohr, in dem die Thermoelemente aus der Isolation herausgeführt werden, einer Positionierhilfe mit einem Spannband und einem Anpresspolster für den Kopf des Thermoelementes mit zwei Spannschellen, **Anlage 2.3**.

2.2.4 TÜV Schellen

Entsprechend **Anlage 2.4** werden bei dieser Installationsart D die Köpfe der Thermoelemente mit dünnen Schellen durch Punktschweißungen befestigt.

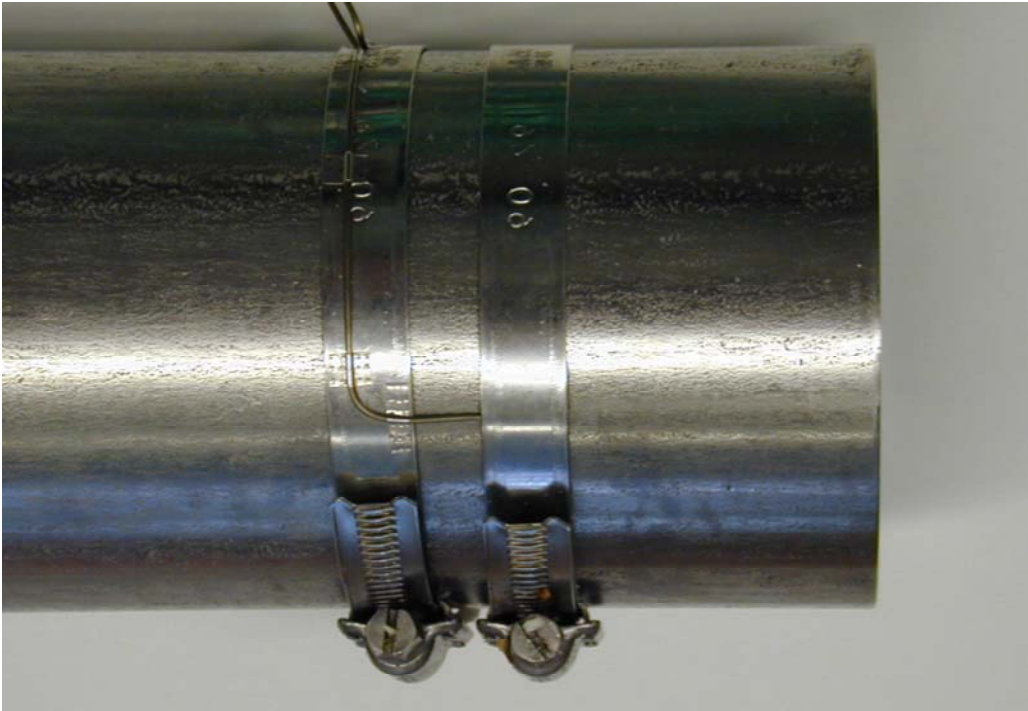
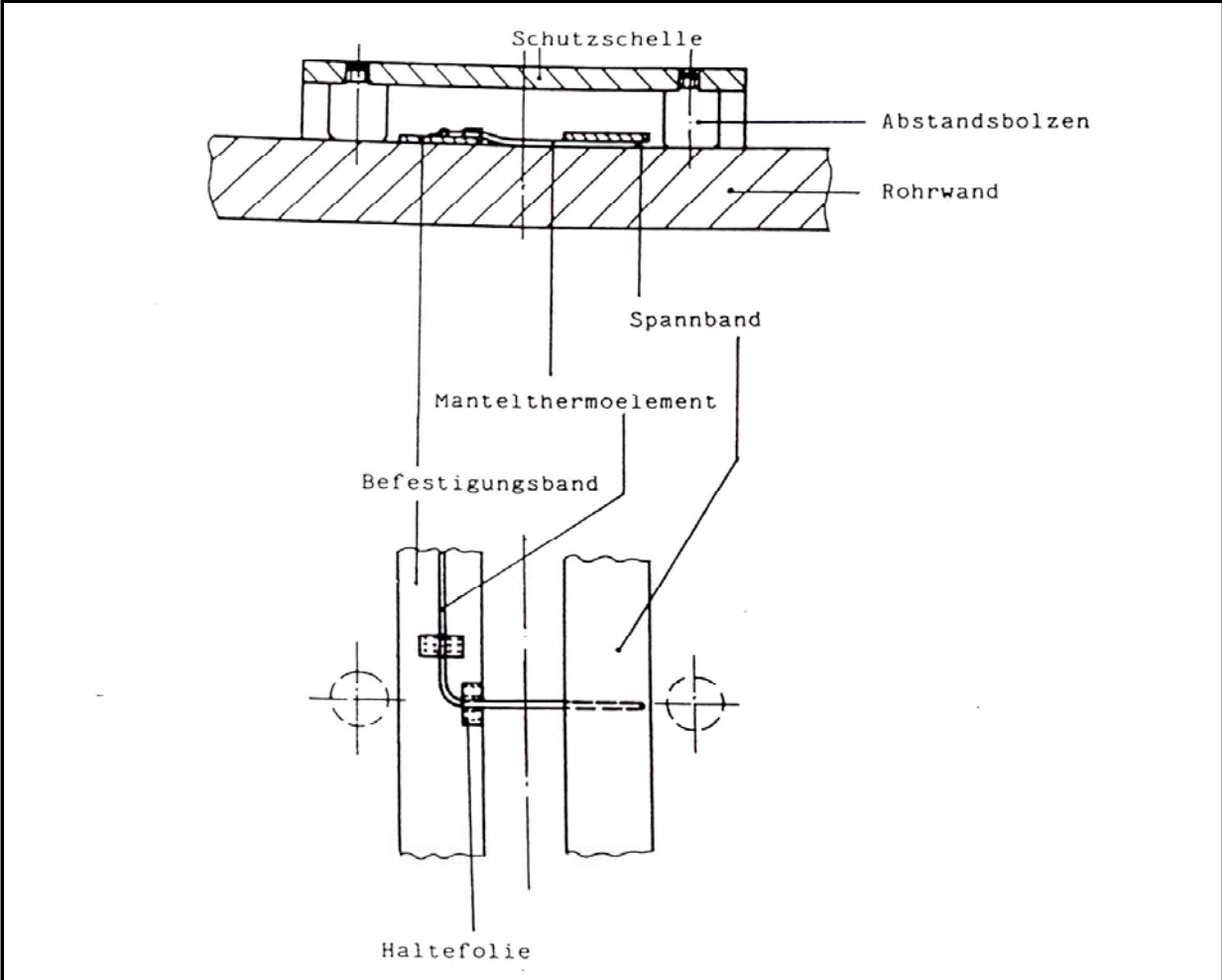
2.2.5 TÜV Polster

Bei dieser in **Anlage 2.5** dargestellten Installationsart E werden die Thermoelemente unter das Spannband geführt und mittels eines örtlichen Glasfaserpolsters auf die Rohroberfläche gepresst und gegen das Spannband isoliert.

In Tabelle 2.1 ist zu den vorhandenen Messdaten mit aufgeführt, mit welcher der beschriebenen Installationsarten die Messwerte gewonnen wurden.

KKW	Leitung	Messungen aus Jahren	A		B		C		D	E	Bemerkungen	Registrierte Belastungen gemäß Kap. 1						
			FAMOS alt	Takt je sec	FAMOS neu	Takt je sec	AMTEC je sec	TÜV Schelle	TÜV Polster je sec	1.1		1.2	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3
A	HKL	99-00	X	2-10								x				x		
A	Surgeline	90							X		8	x		x	x	x		
A	Surgeline	94-01	X	2-10								x		x	x	x		
A	Sprühltg alt	92-93	X	10					X		2-8	x		x	x	x	x	
A	Sprühltg. neu	95-01	X	2-10						X	1-2	x		x	x	x	x	
A	Hilfssprühltg	93-00	X	2-10	X	3	X	2				x	x	x	x	x	x	x
A	Speisewasserstutzen	92-00	X	2-10								x		x	x	x		
B	Sprühltg.	91-99	X	10			X	2				x		x	x	x		
C	HKL	95	X	10								x		x	x	x		
C	Sprühltg.	94/95	X	10								nur Schriebe	x	x	x	x	x	x
C	Hilfssprühleitung	90							X		8	x		x	x	x		
D	Sprühleitung	99-01	X	2-10								teilweise	x	x	x	x		x
D	Hilfssprühleitung	95-00	X	2-10								teilweise	x		x	x		
E	HKL	99-00	X	5-10									x				x	
E	Surgeline	92-99	X	5-10									x		x	x	x	
E	Sprühleitung	94-00	X	5-10									x	x	x	x	x	x
E	Hilfssprühleitung	94-00	X	5-10									x		x	x	x	x

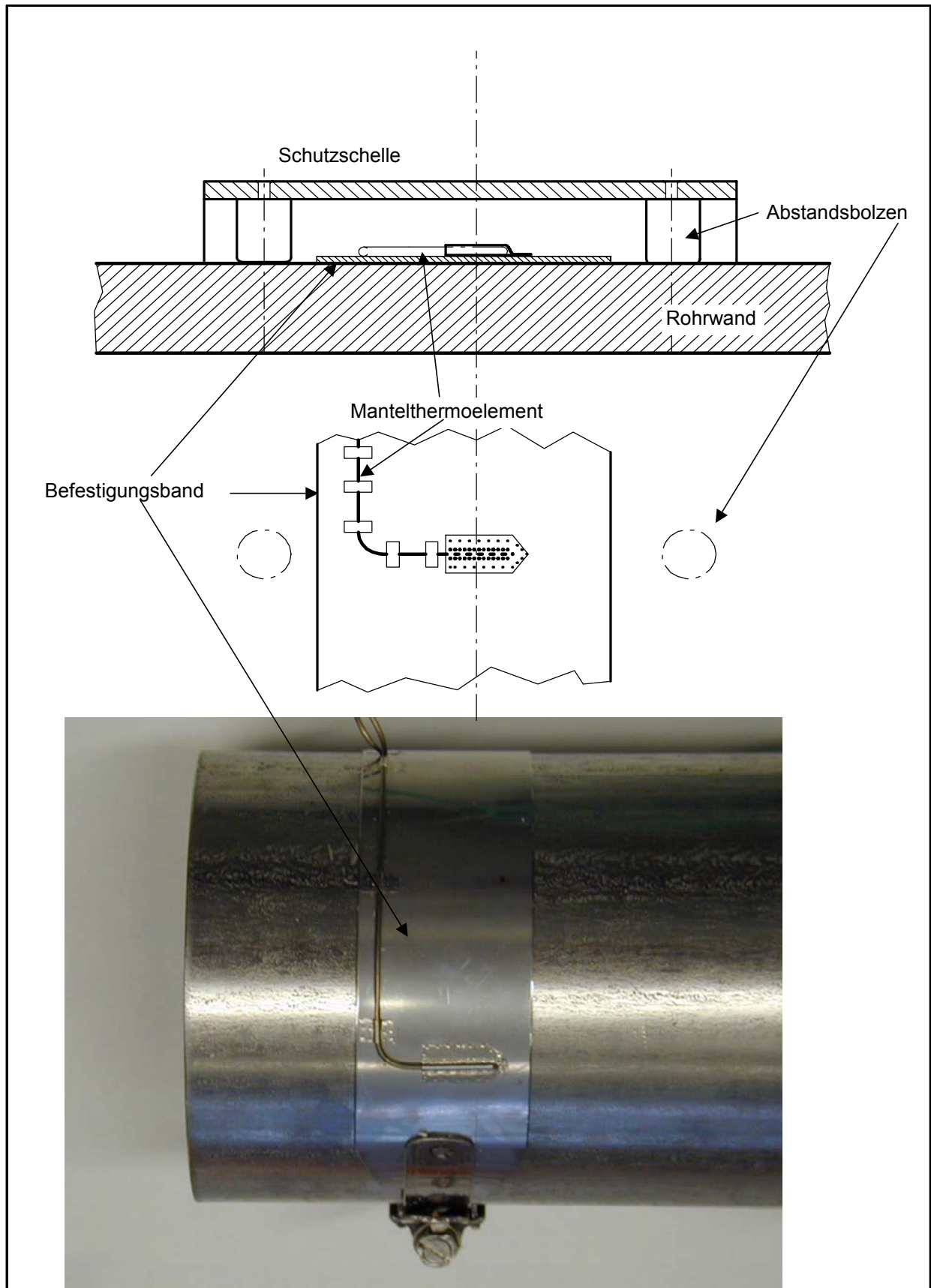
Tabelle 2.1: Vorhandene Messdaten

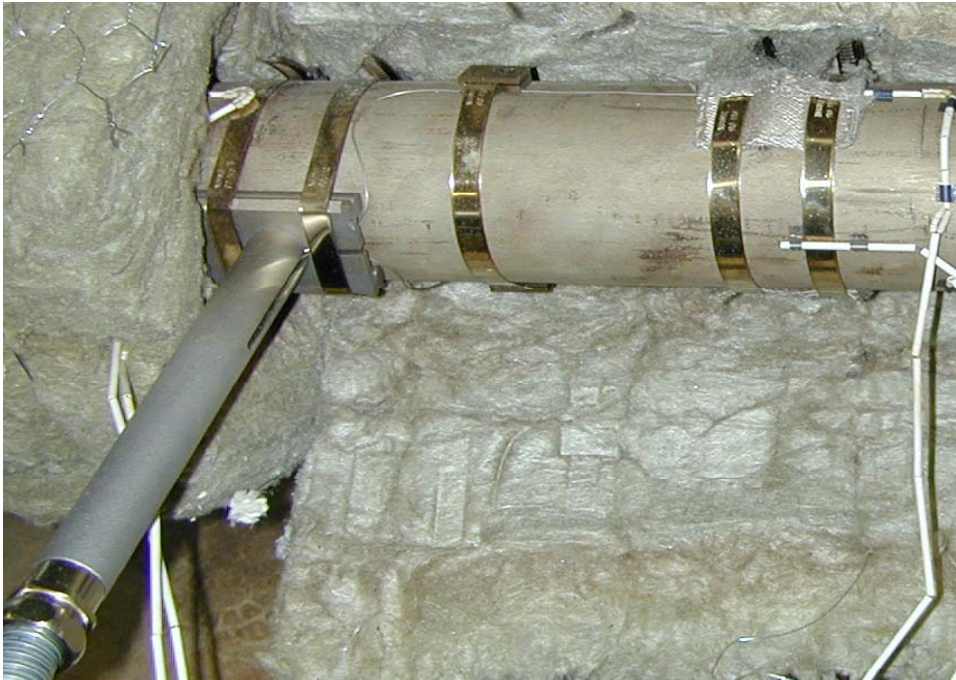
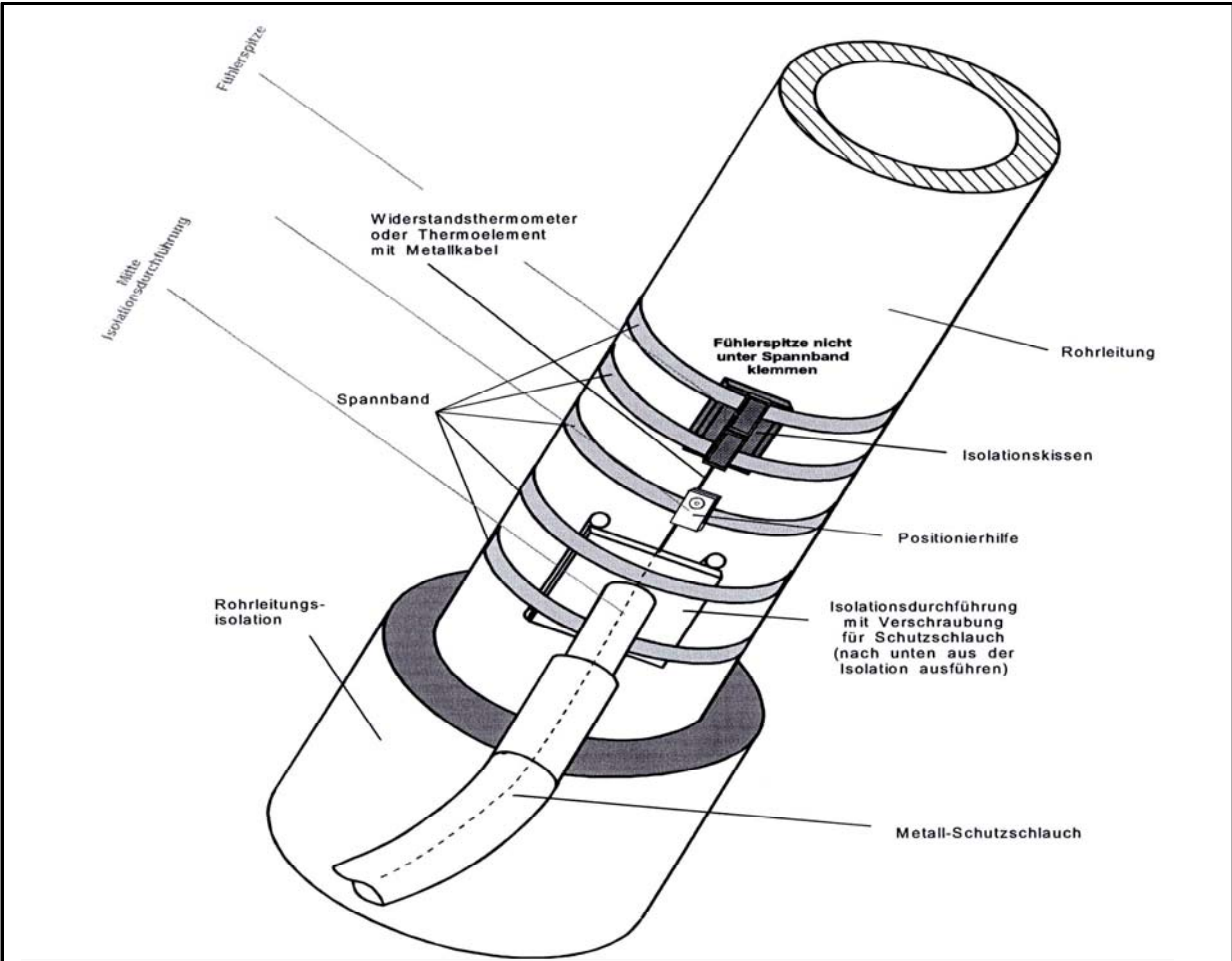


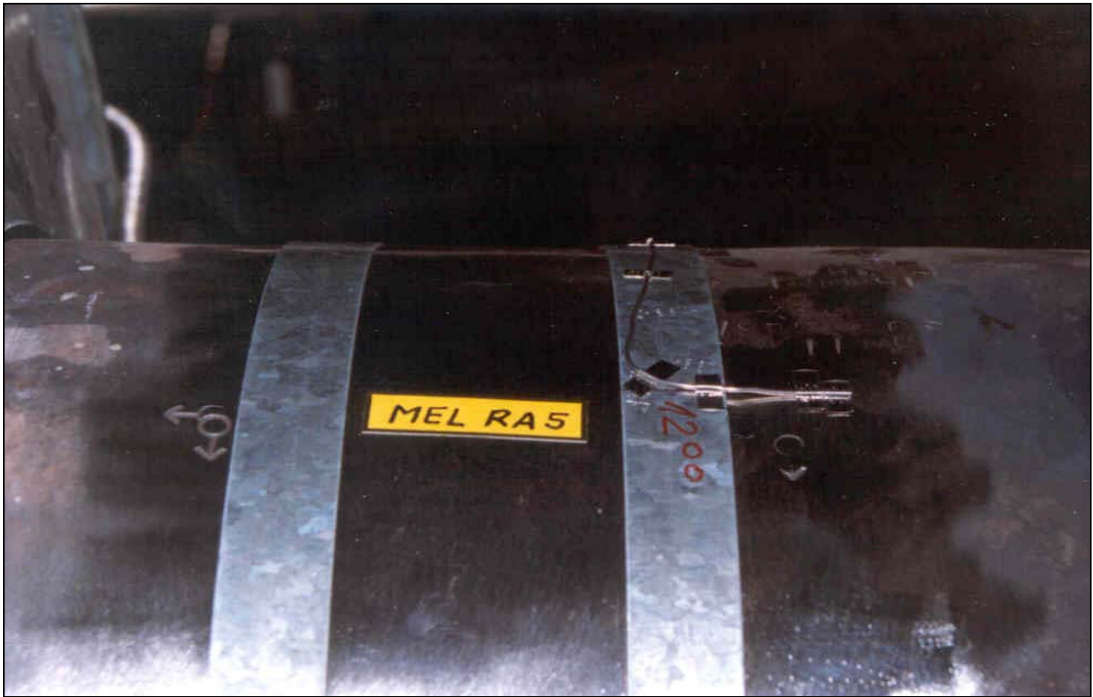
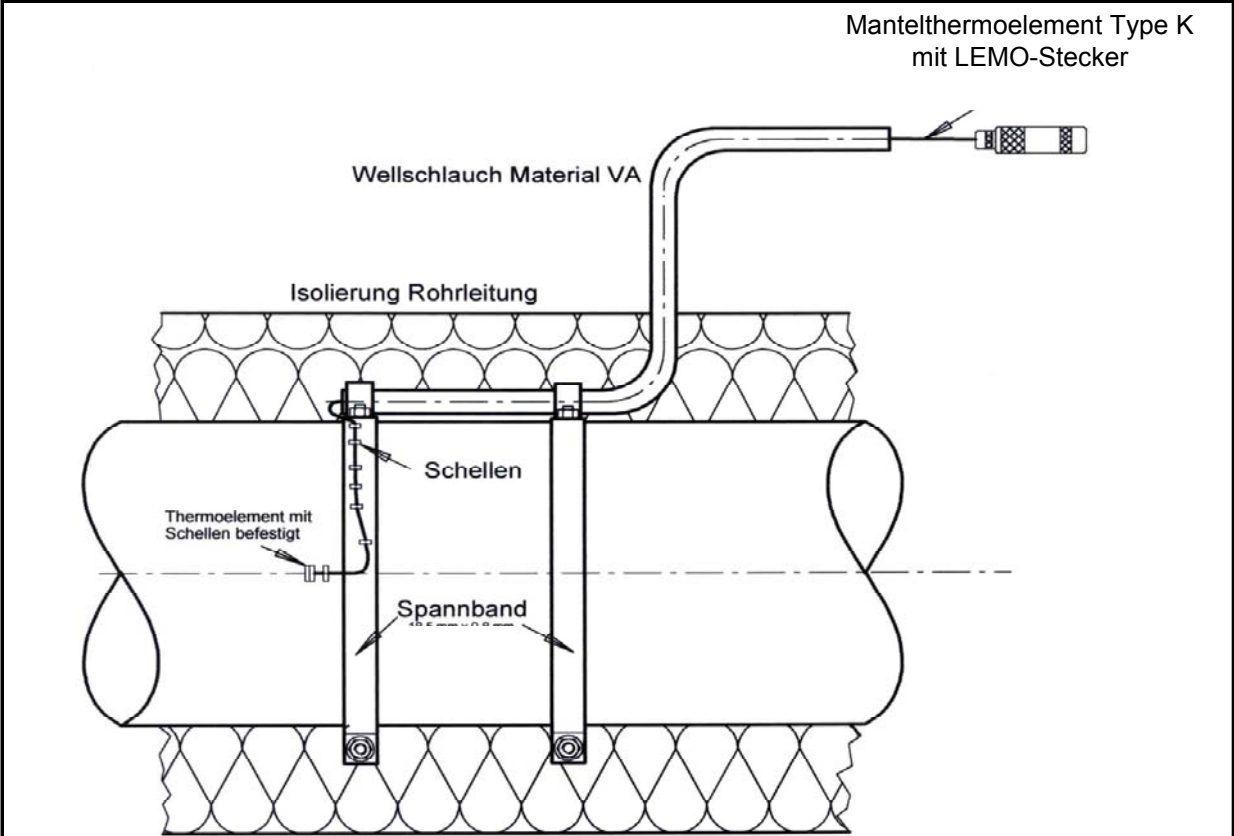
	Abt.: TAT 973
	gez.: K. Steymans
	Datum: 31.10.01

**Beispiel einer Installation
" FAMOS alt "**

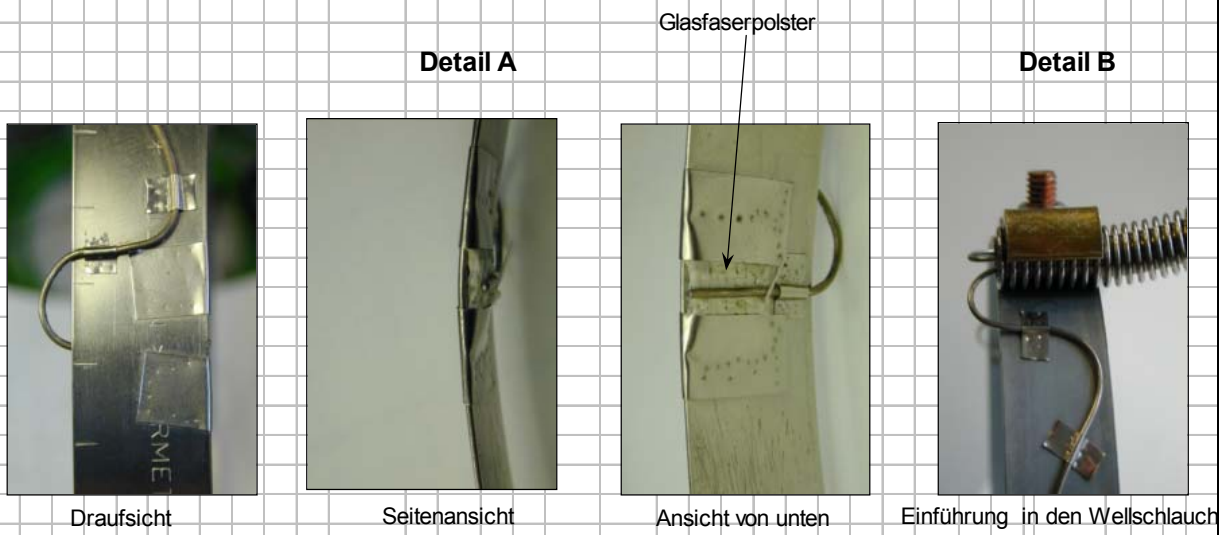
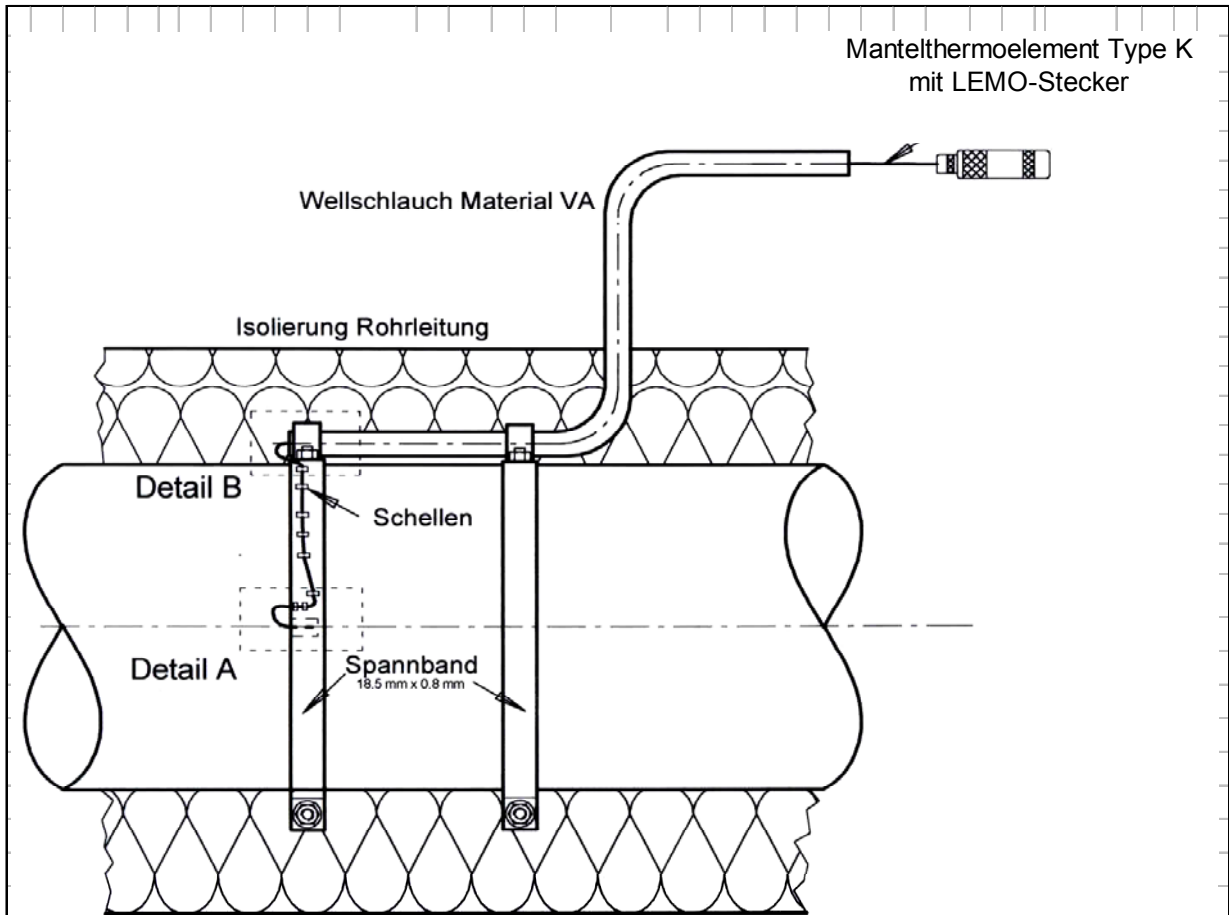
Auftrag: SB 335/01
Anlage 2.1







	Abt. : TAT 973	Beispiel einer TÜV-Applikation eines Mantelthermoelementes Type K auf einer Rohrleitung mittels Schellen	Auftrag: SB 335/01
	gez.: K. Steymans		Anlage 2.4
	Datum: 31.10.01		



3. Laborversuch

3.1 Versuchsstand

Der Versuchsstand ist in **Bild 3.1** dargestellt. Er besteht aus einem Rohr der Nennweite 88, in das eine 1 m lange Teststrecke für die 5 Installationen und eine zweite kürzere Teststrecke zur Temperaturmessung innen und außen geflanscht sind. Vor und hinter den Teststrecken befinden sich etwa 4 m lange Vor- und Nachlaufstrecken. Am Ende des Rohres befindet sich ein drehbar befestigter 90°-Krümmer. Zum Aufheizen strömt über ein Gebläse Heißluft in das Rohr mittels eines Leister Luftherhitzers 5000 mit Silence-Gebläse (Luftherhitzer max. 870 l/min, max. Temperatur 650 - 700°C, 4 kW; Silence-Gebläse max. 4.700 l/min, max. Druck 10 mbar). Zum Aufheizen wird der Austrittskrümmer nach oben gerichtet. Zur Abkühlung wird anstelle des Gebläses eine Wasserpumpe (max. 700 l/min, bei einem Rohrrinnendurchmesser von 76,3 mm $v=2,55$ m/sec) angeschlossen und kaltes Wasser über den nach unten gedrehten Krümmer in einen Vorratsbehälter gepumpt. **Bild 3.2** zeigt oben den Eintritt und unten den Austritt des Rohres. Dieses war in Kaefer Isoliertechnik auf eine Außentemperatur von 50°C abgestimmt.

3.2 Messtechnik

Das Versuchsrohr ist in **Bild 3.3** dargestellt. Es hat eine nutzbare Länge von 950 mm, einen Außendurchmesser von 88,9 mm und eine Wanddicke von im Mittel oben 8,1 mm und unten 7,2 mm. Der Werkstoff ist X6CrNiTi1810 (1.4541), ein Austenit. Damit entspricht das Rohr z.B. der Sprühleitung in einem Druckwasserreaktor.

Auf dieses Rohr wurden ab Eintritt folgende, von den Herstellern bereitgestellte Installationen mit je einem Thermoelement oben und unten aufgebracht und jeweils oben und unten um eine Thermoperle ergänzt:

- Messebene 1: TÜV Polster,
- Messebene 2: FAMOS alt (Framatome),
- Messebene 3: FAMOS neu (Framatome),
- Messebene 4: AMTEC (Amtec),
- Messebene 5: TÜV Schelle und
- Messebene 6: TÜV Polster (ohne Referenz).

Diese Installationen sind in dem Teilbericht zum Arbeitspaket 2 detailliert beschrieben und in den **Bildern 3.4.1 bis 3.4.6** dieses Berichtes dargestellt.

Auf dem zusätzlichen Testrohr wurden als

- Messebene 7: Siempelkamp

von Siempelkamp oben und unten jeweils eine Thermoperle außen und durch zwei Bohrungen innen kurz vor der Innenwand angebracht.

Die verwendeten Thermoelemente wurden vor dem Einsatz kalibriert, **Tabelle 3.1**.

Die Messwerte wurden über Verstärker MGC-Plus (Fa. HBM, D Nr. 8373884) mit Einschüben zur Temperaturmessung auf einem portablen Messtechnik-Rechner unter Einsatz des Programms CATMAN gespeichert und ausgewertet. Die Abfragefrequenz von 5 Hz wurde kurz vor dem Abkühlversuch über ein Triggersignal auf 1200 Hz erhöht.

3.3 Versuche

Die Versuche wurden in der Prüfhalle der Fa. Siempelkamp in Dresden durchgeführt. Teilweise waren Vertreter der Hersteller der Installationen, Framatome (FAMOS) und Amtec anwesend.

Die Installationen erfolgten am 26. und 27.11.2001. Am 27.11.2001 wurde ein Vorversuch aus etwa 300°C durchgeführt.

Am 28.11.2001 erfolgten die Versuche aus 350, 280 und 200°C. Da bei dem Versuch aus 280°C der Rechner vor der endgültigen Abkühlung stoppte, wurde dieser Versuch am 29.11.2001 wiederholt. An diesem Tag erfolgten zwei weitere Versuche aus 280°C mit Teilfüllung, um eine andere Abkühlgeschwindigkeit zu erreichen. Siempelkamp führte dann noch zwei weitere Versuche mit geringerer Durchströmung durch. Die Versuche sind in **Tabelle 3.2** aufgelistet. In diesem Bericht werden nur die ursprünglich geplanten Versuche aus 350, 280 und 200°C beschrieben.

Zu den Versuchen ist folgendes festzuhalten:

- Bei den ersten Versuchen wurde durch das starke Verbiegen des Rohres infolge der Temperaturschichtung der Eintrittsflansch des Testrohres undicht. Dies führte bei dem Versuch aus 350°C zu Schwankungen des Abkühlverlaufes aufgrund der feucht werdenden Isolierung.
- An der Messebene 4 (AMTEC) wurde nach dem 350°C-Versuch eine zusätzliche Thermoperle in der Mitte der Messebene (3 Uhr-Position) angebracht.
- Bei der unteren Perle der Messebene 4 (AMTEC) hatte sich die Keramik-Isolierung soweit zu der Perle verschoben, dass es gegenüber den übrigen Anzeigen zu einem Fehlsignal kam. Da alle Perlen oben und unten in einem engen

Streuband lagen, wurde dieser Messwert bei der Auswertung durch den Wert der unteren Perle der benachbarten Messebene 5 (TÜV Schelle) ersetzt.

- Bei der Messebene 4 (AMTEC) wird das relativ große Kissen mit zwei Spannbändern befestigt. Die Thermoelemente sollen aber nach Herstelleranweisung nicht unter den Spannbändern, sondern dazwischen unter dem Kissen liegen. Dies führt offensichtlich zu einer undefinierten Anlage am Rohr. Nach den Versuchen zeigte sich, daß das untere Thermoelement etwa 0,1 mm, das obere etwa 0,25 mm von dem Rohr abstand.
- Bei dem Versuch aus 200°C zeigte die Thermoperle der Messebene 3 (FAMOS neu) oben einen unrealistischen, von den übrigen abweichenden Wert. Dieser wurde verworfen und durch den entsprechenden Wert der Messebene 1 ersetzt.

3.4 Versuchsergebnisse

Die mit 1200 Hz abgefragten und gespeicherten Temperaturen aller Messebenen sind

in den **Bildern 3.5.1 bis 3.5.7** für den Versuch aus 350°C,

in den **Bildern 3.6.1 bis 3.6.7** für den Versuch aus 280°C und

in den **Bildern 3.7.1 bis 3.7.7** für den Versuch aus 200°C dargestellt.

Sie wurden jeweils im unteren um den laufenden Gradienten an den Messebenen ergänzt.

Die Ausgangstemperaturen, die maximalen Gradienten sowie einige weitere Angaben sind in den **Tabellen 3.3 bis 3.5** zusammengestellt.

3.5 Bewertung

Bild 3.8 zeigt zunächst die Ausgangstemperaturen über dem Testrohr bei dem Versuch aus 350°C mit einem deutlichen Abfall zu den beiden Enden. Dieser resultiert vermutlich aus der Wärmeabfuhr der beiden Flansche.

In **Bild 3.9** sind die mit den Thermoelementperlen (Referenzen) gemessenen Gradienten über der Temperatur dargestellt. Die Werte befinden sich in einem engen Streuband, das oben bei geringeren Werten liegt als unten. Dieser Unterschied dürfte in der knapp 1 mm unterschiedlichen Wanddicke begründet sein. Beide Streubänder zeigen eindeutig eine Zunahme der Gradienten mit höherer Temperatur.

Die vergleichbare Darstellung für die Thermoelemente der Messebenen 1 bis 6 in **Bild 3.10** zeigt ein wesentlich breiteres Streuband mit dem geringsten Gradienten an

der Messebene 4 (AMTEC) und dem höchsten an der Messebene 5 (TÜV Schelle). Hier ist ein Unterschied zwischen den verschiedenen Installationen zu erkennen.

Dieser geht noch deutlicher aus den **Bildern 3.11.1 bis 3.11.3** für die Temperaturen 350, 280 und 200°C mit den Säulendarstellungen der Gradienten Perle und Thermo-element hervor.

In **Bild 3.12** sind schließlich die Quotienten Gradient Thermoelement zu Gradient Perle jeweils für alle drei Versuche nebeneinander dargestellt. Die Unterschiede bei den verschiedenen Temperaturen dürften eher auf eine Streuung als auf einen Trend hinweisen.

Grundsätzlich zeigt sich, daß die Installation "TÜV Schelle" die beste Übereinstimmung mit der Referenz zeigt mit 96% (Mittel aus oben und unten). Es folgt die Installation "FAMOS neu" mit 86%. Dann kommen relativ dicht beieinander "FAMOS alt" mit 67%, "TÜV Polster" mit 64% und "AMTEC" mit 61%. Diese Zahlen sind in **Tabelle 3.6** zusammengestellt.

3.6 Zusammenfassung

Die Messergebnisse lassen sich anhand der Skizzen in **Tabelle 3.7** interpretieren:

- Bei der Installation "TÜV Schelle" (96%) liegt das Thermoelement unmittelbar auf dem Rohr und wird von der kleinen Schelle eng umschlossen. So wird der Temperaturabfall direkt an das Thermoelement abgegeben.
- Bei der Installation "FAMOS neu" (86%) ist die Übertragung des Temperaturabfalls durch das Spannband und den Luftspalt zum Rohr behindert.
- Bei "FAMOS alt" (67%) wird der Temperaturabfall im wesentlichen über die Mantellinie des Thermoelementes auf dem Rohr und dann über das Spannband eingebracht.
- Beim "TÜV Polster" (64%) wird die Einbringung über das Spannband durch das Polster zusätzlich behindert.
- Bei der Installation "AMTEC" (61%) ist es ähnlich, allerdings mit einem dickeren Polster. Hier wirkt sich zusätzlich aus, daß die Thermoelemente nicht durch das Spannband auf das Rohr gepreßt werden und es dadurch zu einem Luftspalt zwischen Thermoelement und Rohroberfläche kommen kann.

Sämtliche Messdaten wurden der Fa. Siempelkamp übergeben, die sie im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspaketes 4 (Kapitel 4) weiterverwandte.

Tabelle 3.1: Eingesetzte Thermoelemente und Installationen

Thermoelemente								
Installation	Typ	Hersteller	Klasse	Material	Abmessungen	Ummantelung	Kalibrierung	Datum
FRAMATOME	K	keine Angabe	k.A.	NiCr-Ni	1 mm	Stahlmantel	Centrocal	16.10.97
AMTEC	K	KMP Krick	1	NiCr-Ni	1 mm	Stahlmantel	ABB Sensycon	12.11.01
TÜV	K	Protemp	1	NiCr-Ni	1 mm	Stahlmantel	TÜV 931	08.11.01
SPG Referenz	K	Siempelkamp	k.A.	NiCr-Ni	2 x 0,35 mm	Keramikröhrchen	SPG	11/2001
SPG Bohrung	K	Heutger	k.A.	NiCr-Ni	2 x 0,35 mm	Glasseide	SPG	11/2001
Installationen								
Installation	ME	Breite	Höhe	Austritt	Schutzschelle	Inst. abnehmbar	Hersteller	
TÜV Polster	1	63 mm	24 mm	flexibel	ohne	ja	TÜV Anlagentechnik	
FAMOS alt	2	81 mm	38 mm	218 mm	ja	ja	Framatome	
FAMOS neu	3	81 mm	38 mm	229 mm	ja	ja	Framatome	
AMTEC	4	260 mm	16,5 mm	238 mm	ohne	ja	Amtec	
TÜV Schelle	5	75 mm	24 mm	flexibel	ohne	bedingt	TÜV Anlagentechnik	

Tabelle 3.2: Überblick Datensätze zum Laborversuch

Datum	Ausgang	Füllung	Durchsatz SPG	Durchsatz TÜV	Serie TÜV	Daten SPG	Bemerkung
27.11.01	300°C	voll	7,2 kg/sec	7,2 kg/sec	0	sn_0	Vorversuch
28.11.01	350°C	voll	7,2 kg/sec	7,2 kg/sec	1	sn_1	
28.11.01	280°C	voll	7,2 kg/sec	7,2 kg/sec	2	sn_2	Rechnerausf. 60°C
29.11.01	280°C	voll	7,2 kg/sec	7,2 kg/sec	2a	sn_2a	Ersatz für 2
28.11.01	200°C	voll	7,2 kg/sec	7,2 kg/sec	3	sn_3	
29.11.01	280°C teil	voll	1,1 kg/sec	1,1 kg/sec	4	sn_4	Rechnerausf. 150°C
29.11.01	280°C teil	teil	1,7 kg/sec	1,7 kg/sec	4a	sn_4a	Ersatz für 4
SPG	280°C teil	teil	1,4 kg/sec			5_kubik	
SPG	280°C teil	teil	0,5 kg/sec			2_kubik	

Tabelle 3.3: Auswertung Thermoschock aus 350°C (Serie 1 /28.11.01/ 22°C Wasser/ 7,2 l/sec)

Ergebnis/Auswertung	Dim.	Meßstelle Installation	1	2	3	4	5	6	7
			TÜV Polster	FAMOS alt	FAMOS neu	AMTEC	TÜV Schelle	TÜV Polster	Siempelkamp
Ausgangstemperatur	[°C]	Perle oben	351	360	361	368	360		329
		TE oben	346	358	359	365	358	344	
		Perle innen oben							330/329
		Perle Mitte							
		Perle unten	349	360	360	366	360		329
		TE unten	344	358	358	364	356	342	
		Perle innen unten							329/329
Zeit unten-oben [sec]	[sec]	Perlen	6,8	6,7	6,6	6,2	6,3		5,1
		TE	7,1	6,7	6,5	7,0	6,3	6,5	
Gradienten aus Bildern 3.5.1 bis 3.5.7	[K/sec]	Perle oben	-19,9	-20,2	-21,4	-20,7	-20,1		-26,2
		TE oben	-10,8	-12,7	-17,2	-10,4	-19,7	-13,5	
		Perle innen oben							-126,3
		Perle 3 Uhr							
Perle unten AMTEC wie TÜV Polster		Perle unten	-27,9	-29,0	-28,9	-27,0	-27,0		-21,6
		TE unten	-18,6	-19,1	-25,5	-18,1	-25,5	-18,9	
		Perle innen unten							-39,2
Vergleich Gradienten	[K/sec]	TE/Perle oben	0,54	0,63	0,80	0,50	0,98		
		TE/Perle unten	0,67	0,66	0,88	0,67	0,94		
		Mittel	0,60	0,64	0,84	0,59	0,96		
		Reihenfolge	4	3	2	5	1		
Vergleich Ausgangstemperaturen	[°C]	TE-Perle oben	-5	-2	-2	-3	-2		
		TE-Perle unten	-5	-2	-2	-2	-4		
		Mittel	-5	-2	-2	-2,5	-3		
		Reihenfolge	4	1	1	2	3		

Tabelle 3.4: Auswertung Thermoschock aus 280°C (Serie 2a/ 29.11.01/ 24°C Wasser/ 7,2 l/sec)

Ergebnis/Auswertung	Dim.	Meßstelle Installation	1	2	3	4	5	6	7
			TÜV Polster	FAMOS alt	FAMOS neu	AMTEC	TÜV Schelle	TÜV Polster	Siempelkamp
Ausgangstemperatur	[°C]	Perle oben	292	305	305	312	301		268
		TE oben	286	303	303	310	300	280	
		Perle innen oben							269/268
		Perle Mitte				312			
		Perle unten	290	304	304	309	300		267
		TE unten	284	302	302	309	296	277	
		Perle innen unten							267/267
Zeit unten-oben [sec]	[sec]	Perlen	4,8	4,7	4,4	3,9	4,5		3,3
		TE	4,9	4,7	4,2	5,9	4,4	4,9	
Gradienten aus Bildern 3.6.1 bis 3.6.7	[K/sec]	Perle oben	-15,3	-15,8	-16,3	-15,6	-14,8		-18,7
		TE oben	-9,8	-11,0	-13,9	-8,2	-14,4	-10,3	
		Perle innen oben							-56,8
Perle unten AMTEC = TÜV Polster		Perle 3 Uhr				-19,5			
		Perle unten	-19,8	-21,3	-21,5	-20,3	-20,3		-15,3
		TE unten	-12,9	-14,2	-19,4	-14,3	-19,5	-13,9	
Vergleich Gradienten	[K/sec]	Perle innen unten							-37,4
		TE/Perle oben	0,64	0,70	0,85	0,53	0,97		
		TE/Perle unten	0,65	0,67	0,90	0,70	0,96		
Vergleich Ausgangstemperaturen	[°C]	Mittel	0,65	0,68	0,88	0,62	0,97		
		Reihenfolge	5	4	3	2	1		
		TE-Perle oben	-6	-2	-2	-2	-1		
		TE-Perle unten	-6	-2	-2	0	-4		
		Mittel	-6	-2	-2	-1	-2,5		
		Reihenfolge	4	2	2	1	3		

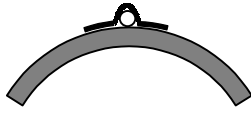


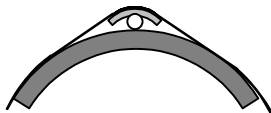
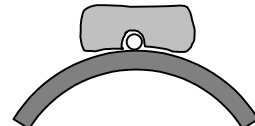
Tabelle 3.5: Auswertung Thermoschock aus 200°C (Serie 3/ 28.11.01/ 25-26°C Wasser/ 7,2 l/sec)

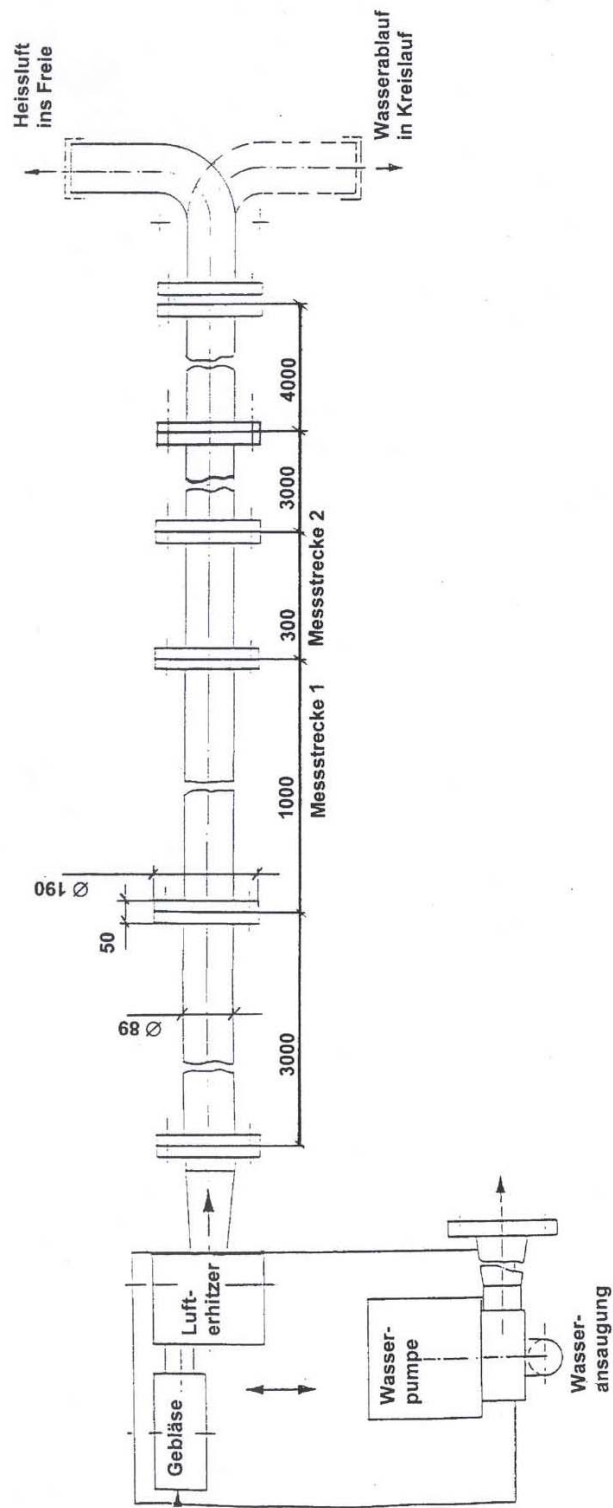
Ergebnis/Auswertung	Dim.	Meßstelle Installation	1	2	3	4	5	6	7
			TÜV Polster	FAMOS alt	FAMOS neu	AMTEC	TÜV Schelle	TÜV Polster	Siempelkamp
Ausgangstemperatur	[°C]	Perle oben	211	209	defekt	225	221		205
		TE oben	206	208	206	224	219	209	
		Perle innen oben							204/204
		Perle Mitte				225			
		Perle unten	211	208	206	224	221		201
		TE unten	206	207	205	224	217	207	
		Perle innen unten							201/201
Zeit unten-oben [sec]	[sec]	Perlen	3,4	3,5	defekt	3,7	3,9		1,8
		TE	3,4	3,3	3,3	5,6	3,8	4,2	
Gradienten aus Bildern 3.7.1 bis 3.7.7	[K/sec]	Perle oben	-10,5	-9,9	-10,5	-9,7	-9,4		-12,5
		TE oben	-6,9	-7,0	-8,5	-5,8	-8,9	-6,6	
		Perle innen oben							-22,3
Perle oben FAMOS neu = TÜV Polster 1		Perle 3 Uhr				-12,1			
Perle unten AMTEC = TÜV Polster 6		Perle unten	-12,6	-12,5	-12,3	-13,2	-13,2		-9,7
		TE unten	-8,4	-8,2	-11,0	-9,0	-12,6	-9,2	
		Perle innen unten							-23,0
Vergleich Gradienten	[K/sec]	TE/Perle oben	0,66	0,71	0,81	0,60	0,95		
		TE/Perle unten	0,67	0,66	0,89	0,68	0,95		
		Mittel	0,66	0,68	0,85	0,64	0,95		
		Reihenfolge	4	3	2	5	1		
Vergleich Ausgangstemperaturen	[°C]	TE-Perle oben	-5	-1		-1	-2		
		TE-Perle unten	-5	-1	-1	0	-4		
		Mittel	-5	-1		-0,5	-3		
		Reihenfolge	4	2		1	3		

Tabelle 3.6: Gradienten Installation/Referenz

			TUV Polster ME 1	FAMOS alt ME 2	FAMOS neu ME 3	AMTEC ME 4	TUV Schelle ME 5	
Ausgangstemp.	unten/oben	Folge						
350°C	unten	1					0,94	
		2			0,88			
		3	0,67			0,67		
		4		0,66				
		5						
	oben	1						0,98
		2			0,80			
		3		0,63				
		4	0,54					
		5				0,50		
280°C	unten	1					0,96	
		2			0,90			
		3				0,70		
		4		0,67				
		5	0,65					
	oben	1						0,97
		2			0,85			
		3		0,70				
		4	0,64					
		5				0,53		
200°C	unten	1					0,95	
		2			0,89			
		3				0,68		
		4	0,67					
		5		0,66				
	oben	1						0,95
		2			0,81			
		3		0,71				
		4	0,66					
		5				0,60		
Mittelwert	unten		0,66	0,66	0,89	0,68	0,95	
	oben		0,61	0,68	0,82	0,54	0,97	
	mittel		0,64	0,67	0,86	0,61	0,96	

**Tabelle 3.7: Vergleich der Gradienten Installation/Referenzen
aus den Versuchen 350°C, 280°C und 200°C**

Installation	Skizze	Gradient Installation/Referenz		
		unten	oben	Mittel
TÜV Schelle		95%	97%	96%
FAMOS neu		89%	82%	86%
FAMOS alt		66%	68%	67%
TÜV Polster		66%	61%	64%
AMTEC		68%	54%	61%

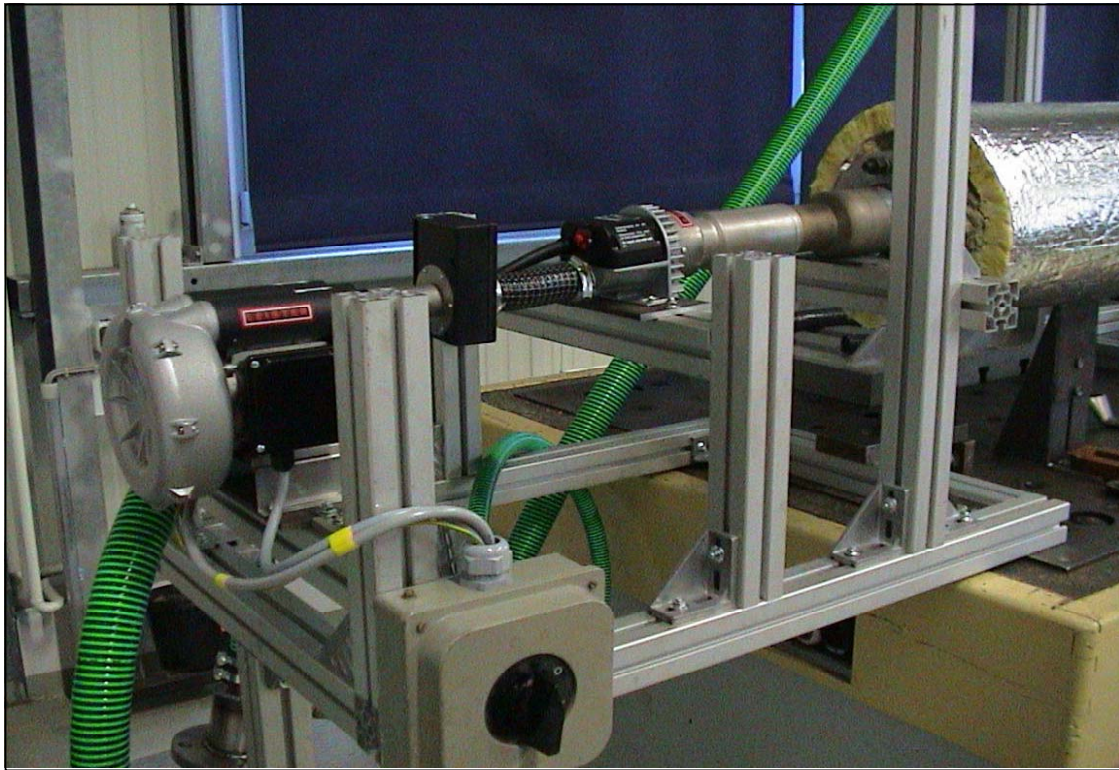



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 04.03.02

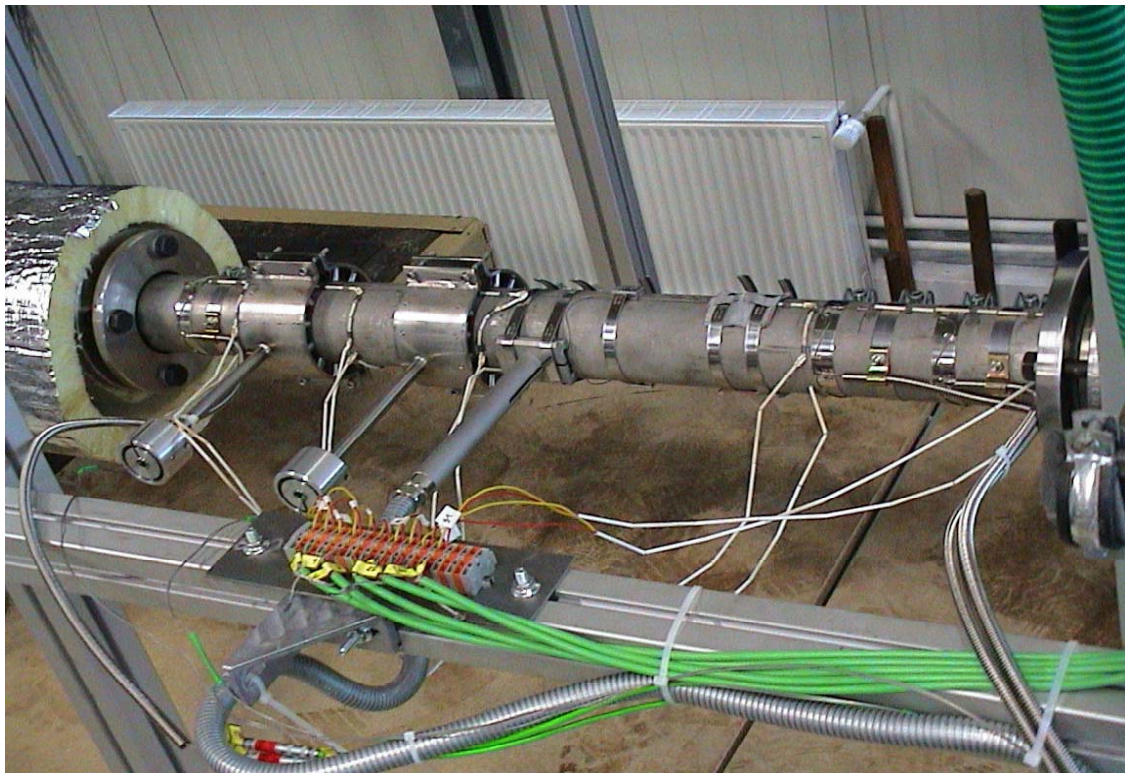
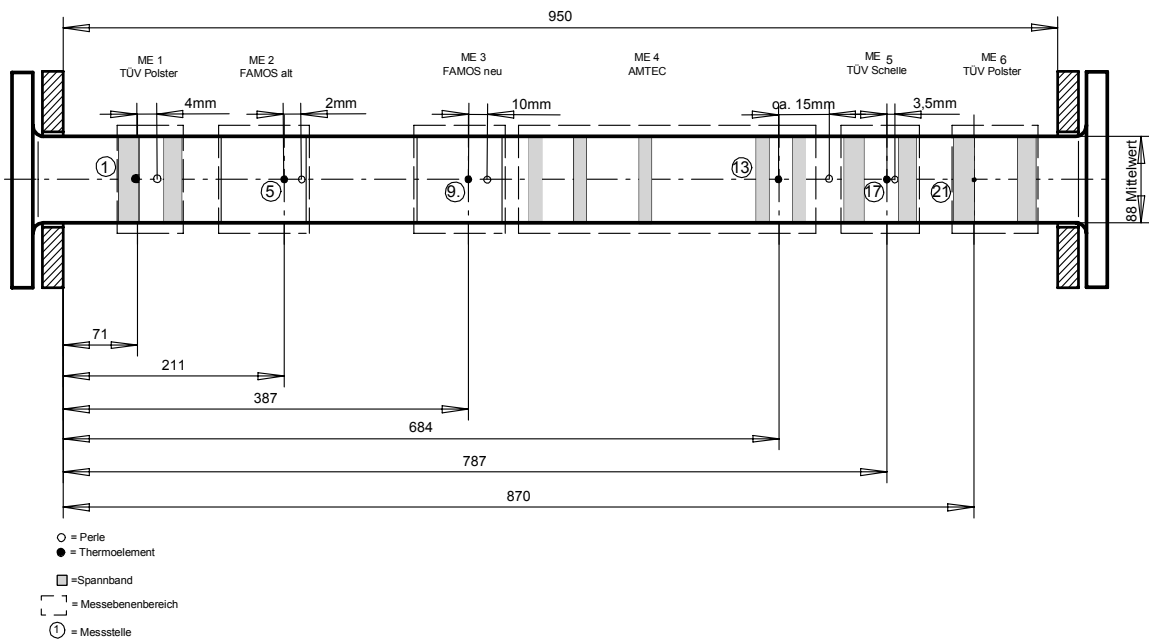
Forschungsvorhaben SR 2392
 Versuchsstand


Auftr.: SB 335/01

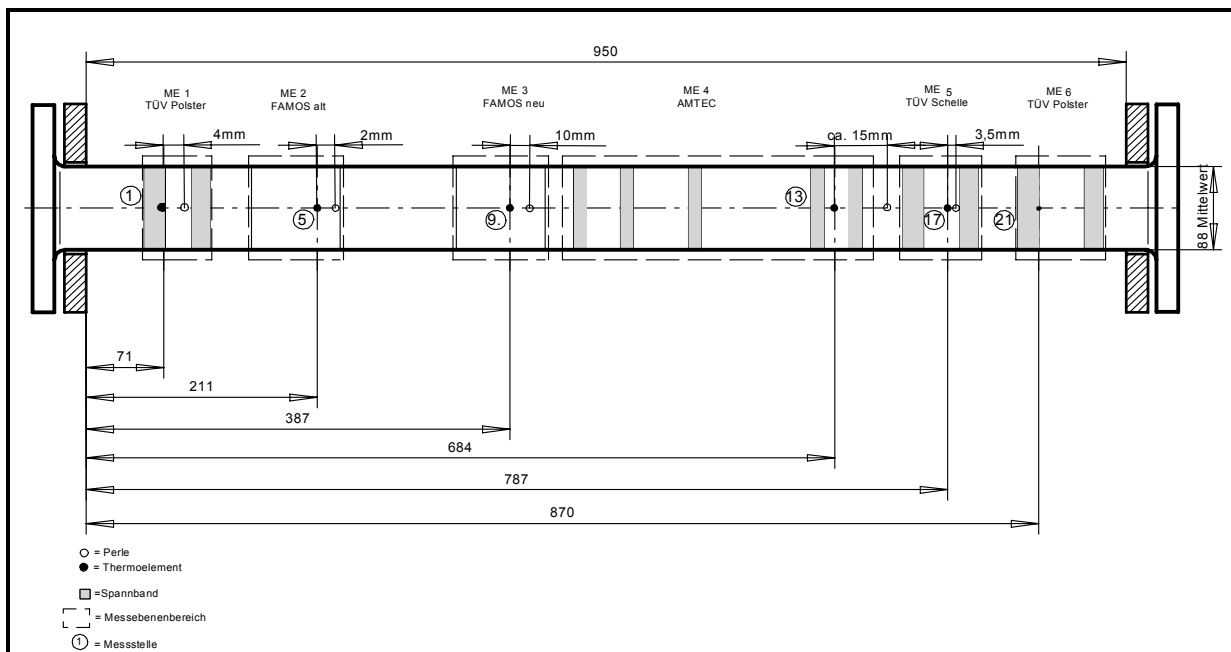
Bild: 3.1



	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Versuchsstand oben: Zulauf, unten: Ablauf	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.2
	Datum: 04.03.02		



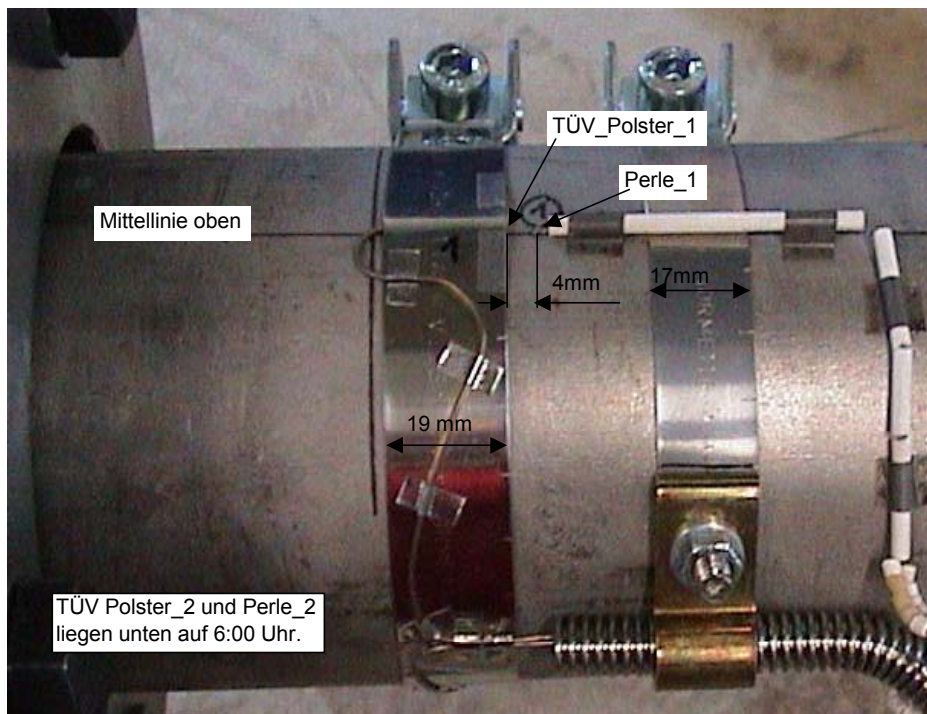
	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Versuchsrohr	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.3
	Datum: 04.03.02		



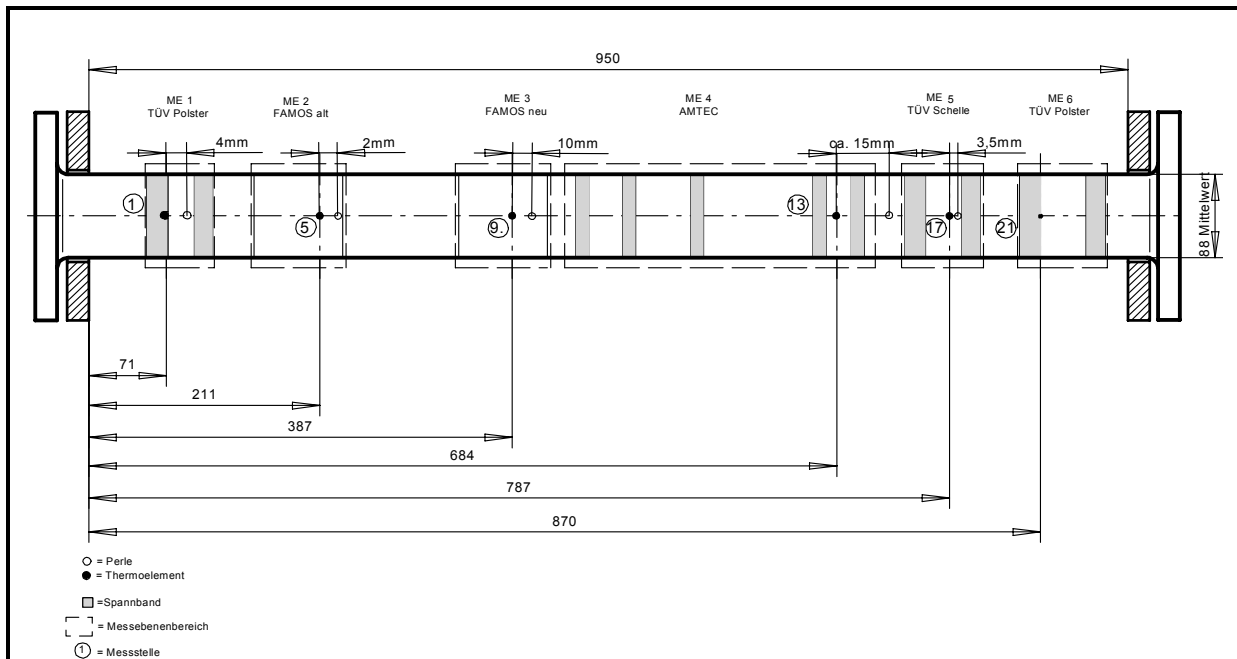
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke

Messebene 1:	Tüv Polster_1 oben	Wanddicke:	12:00	8,0 mm
	Perle_1 oben		03:00	7,7mm
	Tüv Polster_2 unten		06:00	7,3 mm
	Perle_2 unten		09:00	7,7 mm

Detail TÜV Polster



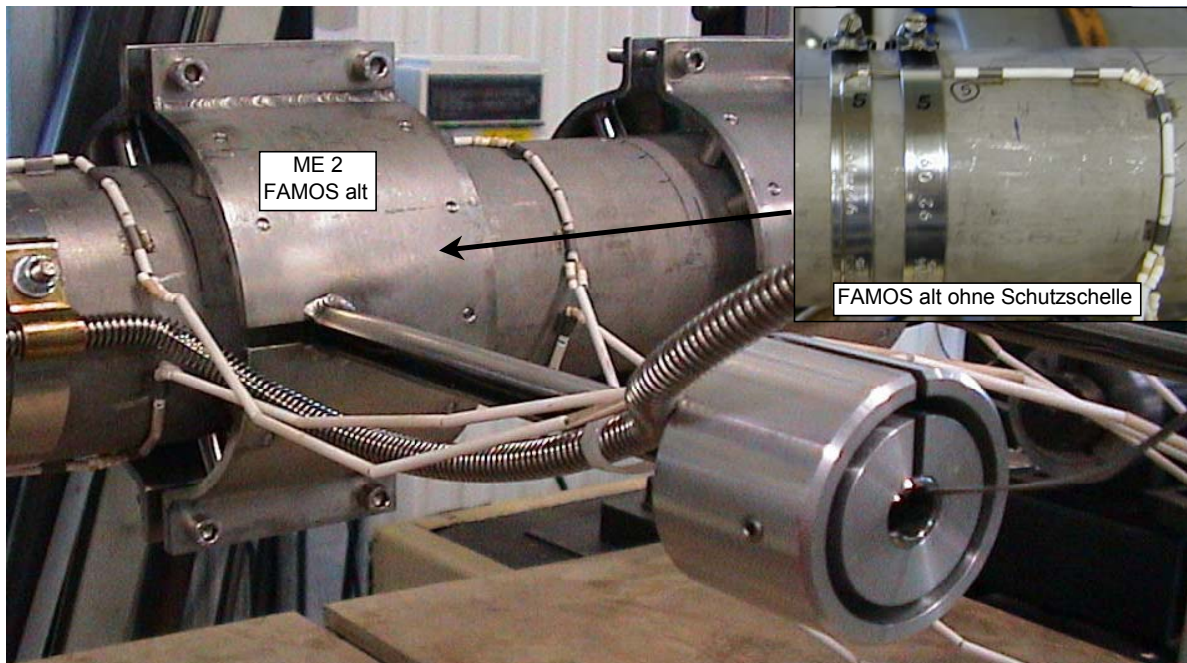
	Abt.: TAT 973	<p align="center">Messebene 1</p> TÜV Polster_1 mit Perle_1 Lage am Rohr :12:00 TÜV Polster_2 mit Perle_2 Lage am Rohr : 6:00		Auftrag: SB 335/01
	gez.: Steymans			Bild 3.4.1
	Datum: 04.01.2002			




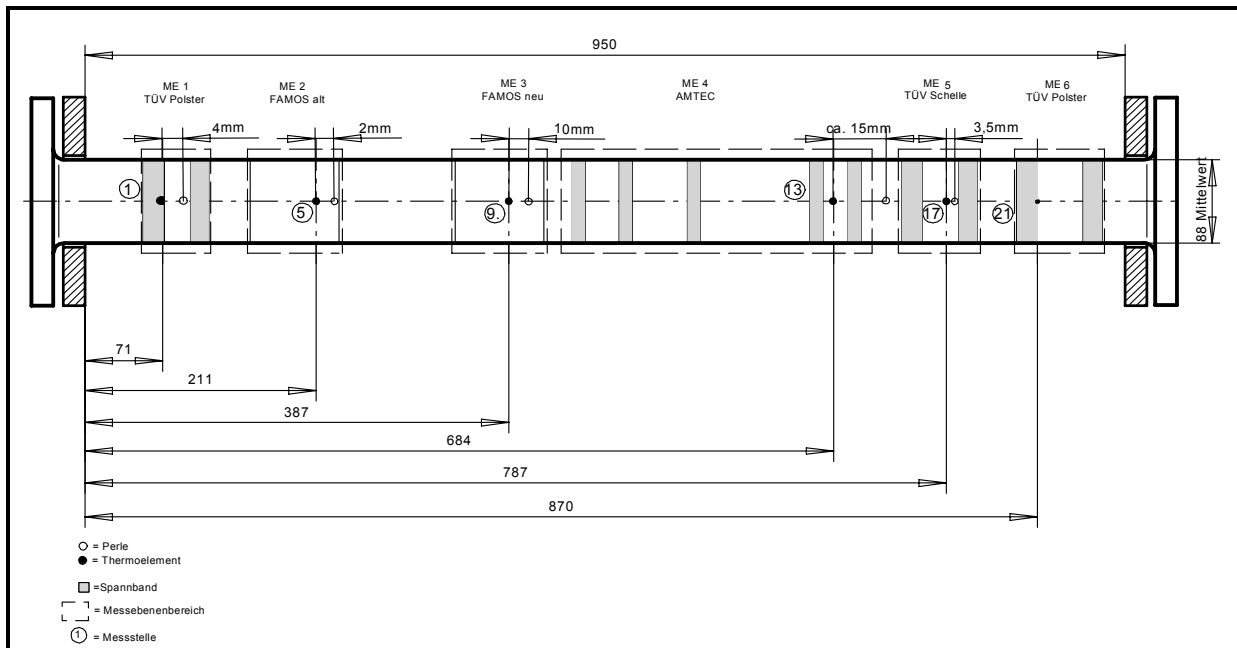
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke

Messebene 2:	FAMOS alt_1 oben	Wanddicke:	12:00	8,1 mm
	Perle_3 oben		03:00	7,6 mm
	FAMOS alt_2 unten		06:00	7,2 mm
	Perle_4 unten		09:00	7,5 mm

Detail FAMOS alt



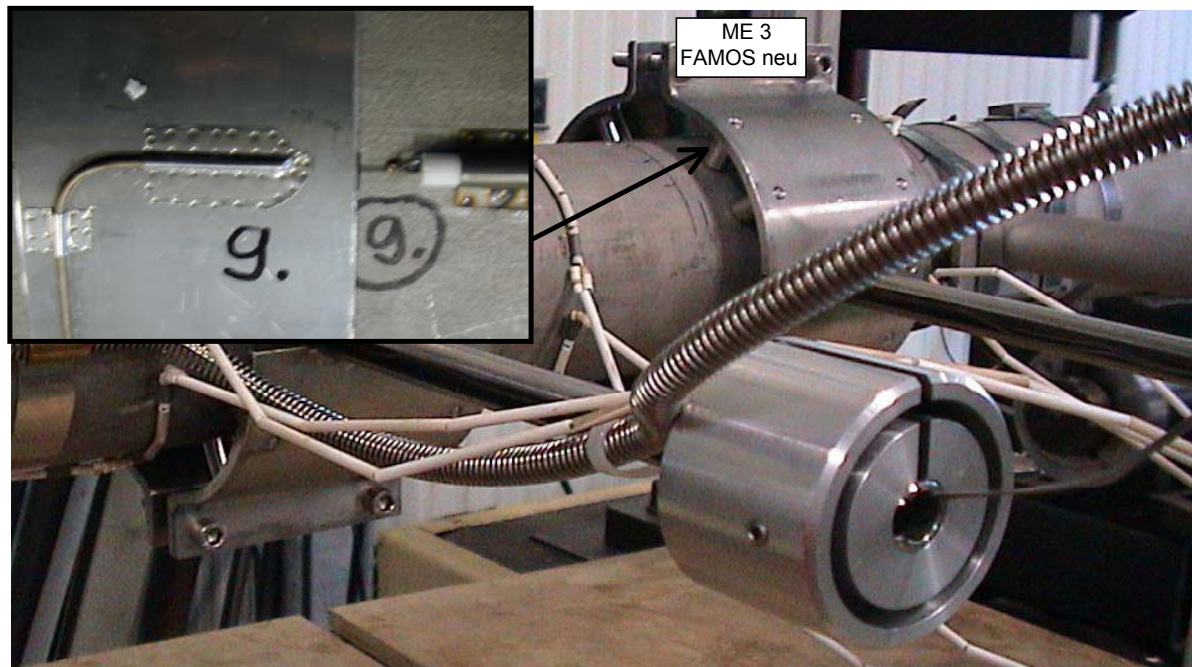
	Abt.: TAT 973	Messebene 2 FAMOS alt_1 mit Perle_3 FAMOS alt_2 mit Perle_4	Lage am Rohr :12:00	Auftrag: SB 335/01 Bild 3.4.2
	gez.: Steymans		Lage am Rohr : 6:00	
	Datum: 04.01.2002			




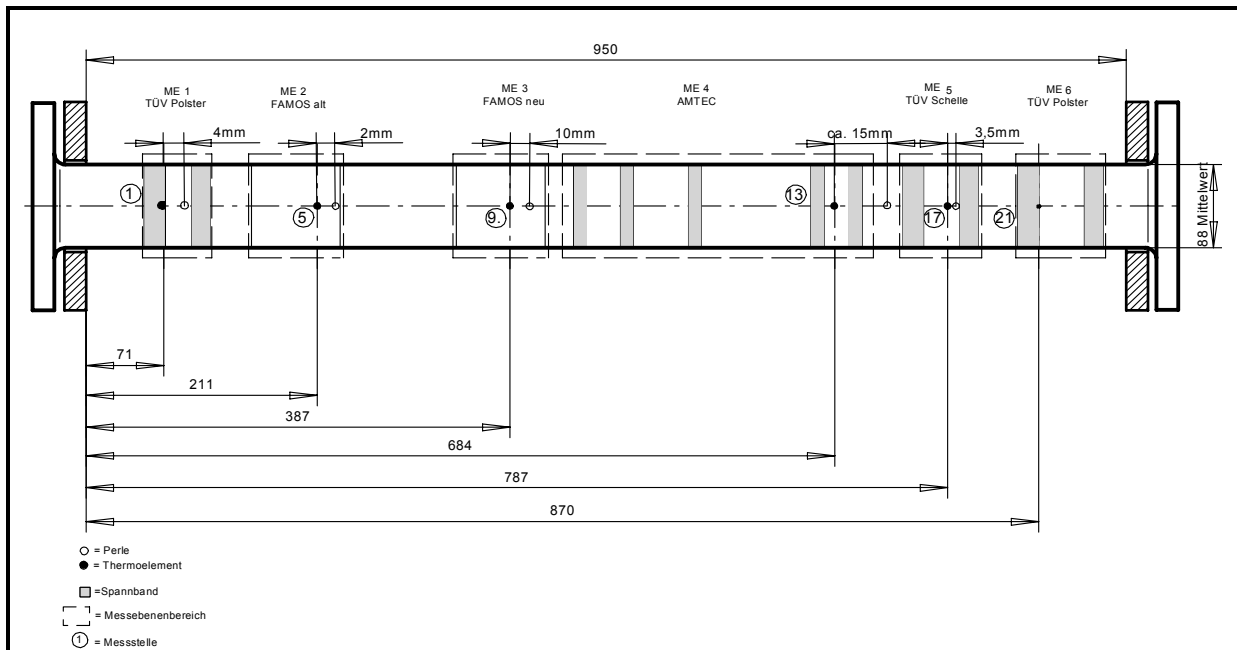
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke

Messebene 3:	FAMOS neu_1 oben	Wanddicke:	12:00	8,1 mm
	Perle_5 oben		03:00	7,7 mm
	FAMOS neu_2 unten		06:00	7,1 mm
	Perle_6 unten		09:00	7,4 mm

Detail FAMOS neu



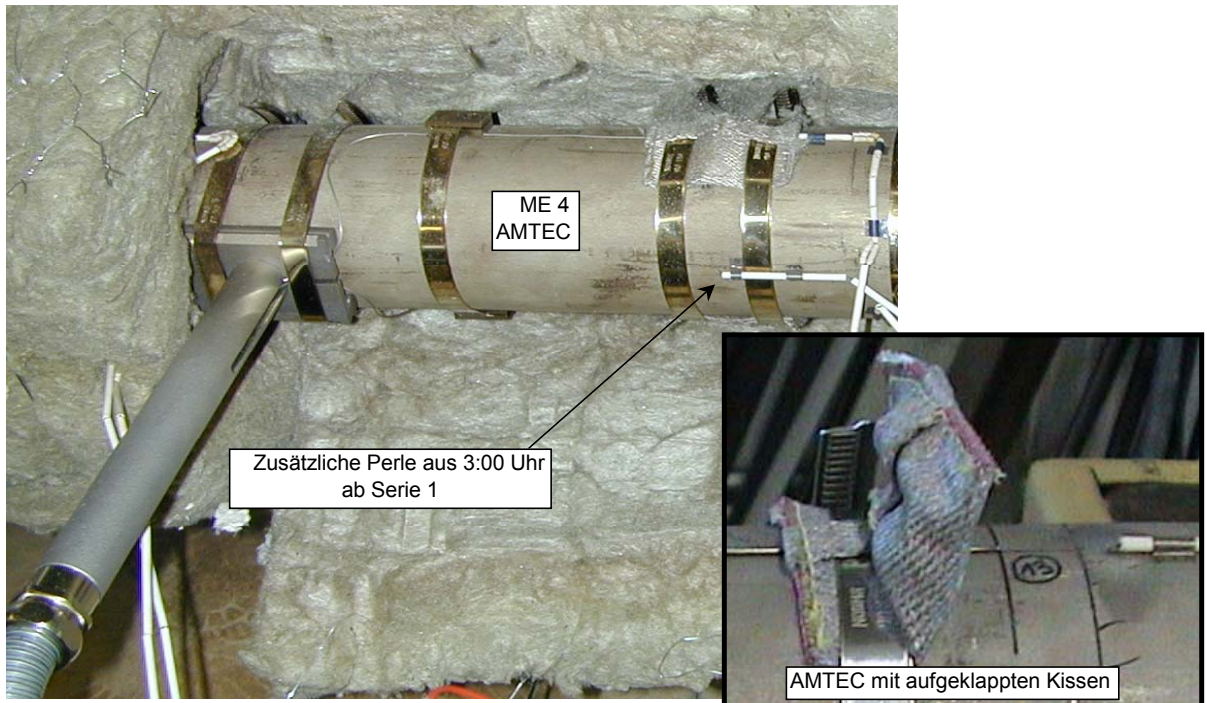
	Abt.: TAT 973	Messebene 3		Auftrag: SB 335/01
	gez.: Steymans	FAMOS neu_1 mit Perle_5	Lage am Rohr :12:00	Bild 3.4.3
Datum: 04.01.2002	FAMOS neu_2 mit Perle_6	Lage am Rohr : 6:00		



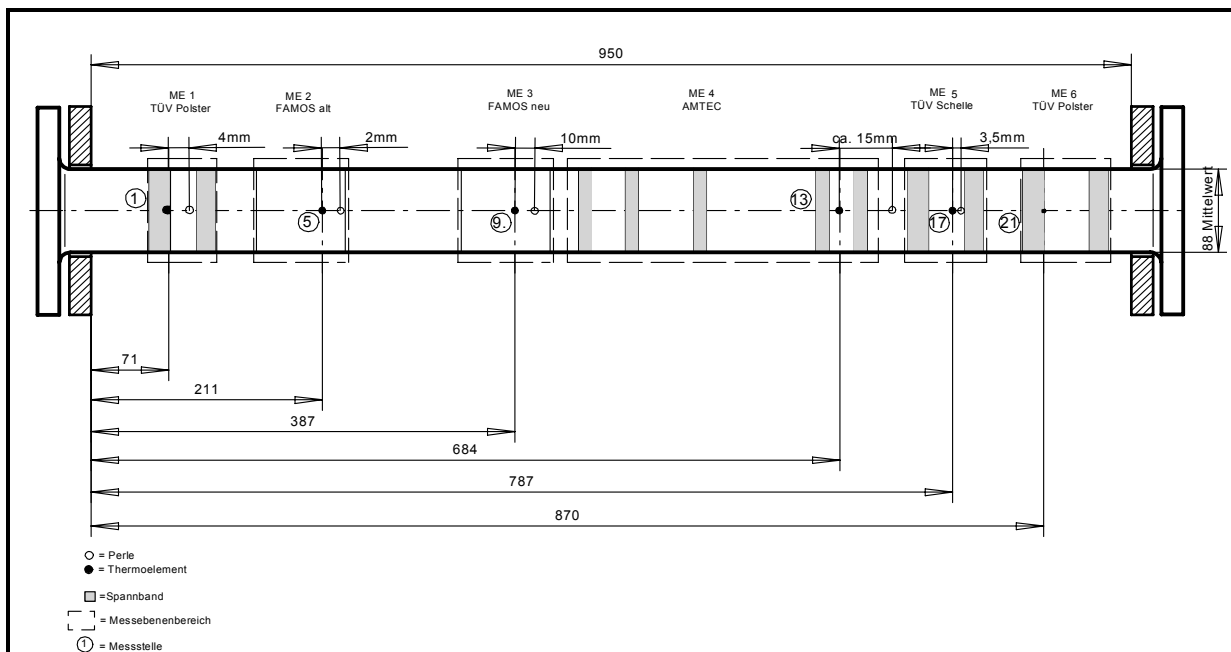
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke

Messebene 4:	AMTEC_1 oben	Wanddicke:	12:00	8,1mm
	Perle_7 oben		03:00	7,9 mm
	AMTEC_2 unten		06:00	7,2 mm
	Perle_8 unten		09:00	7,4 mm
	Perle_13		3:00	

Detail AMTEC



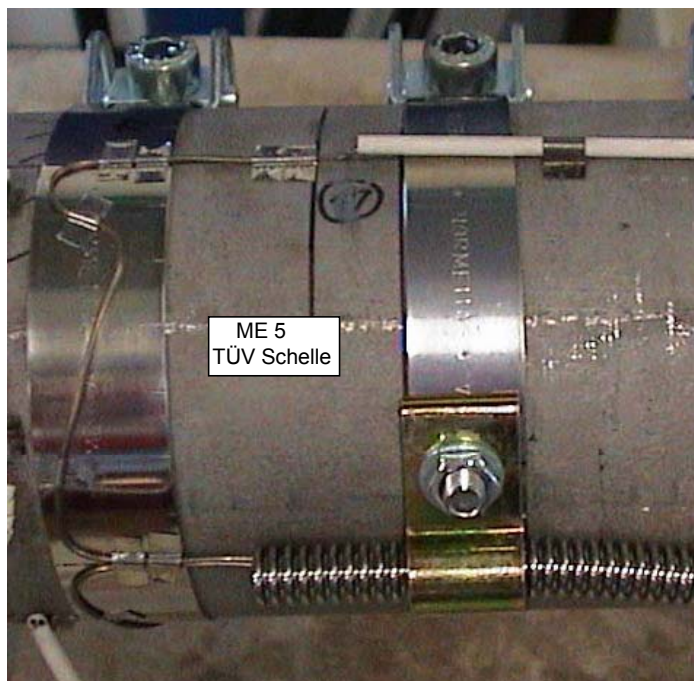
	Abt.: TAT 973	Messebene 2		Auftrag: SB 335/01
	gez.: Steymans	AMTEC_1 mit Perle_7	Lage am Rohr :12:00	Bild 3.4.4
	Datum: 04.01.2002	Perle_13	Lage am Rohr : 3:00	
	AMTEC_2 mit Perle_8	Lage am Rohr : 6:00		



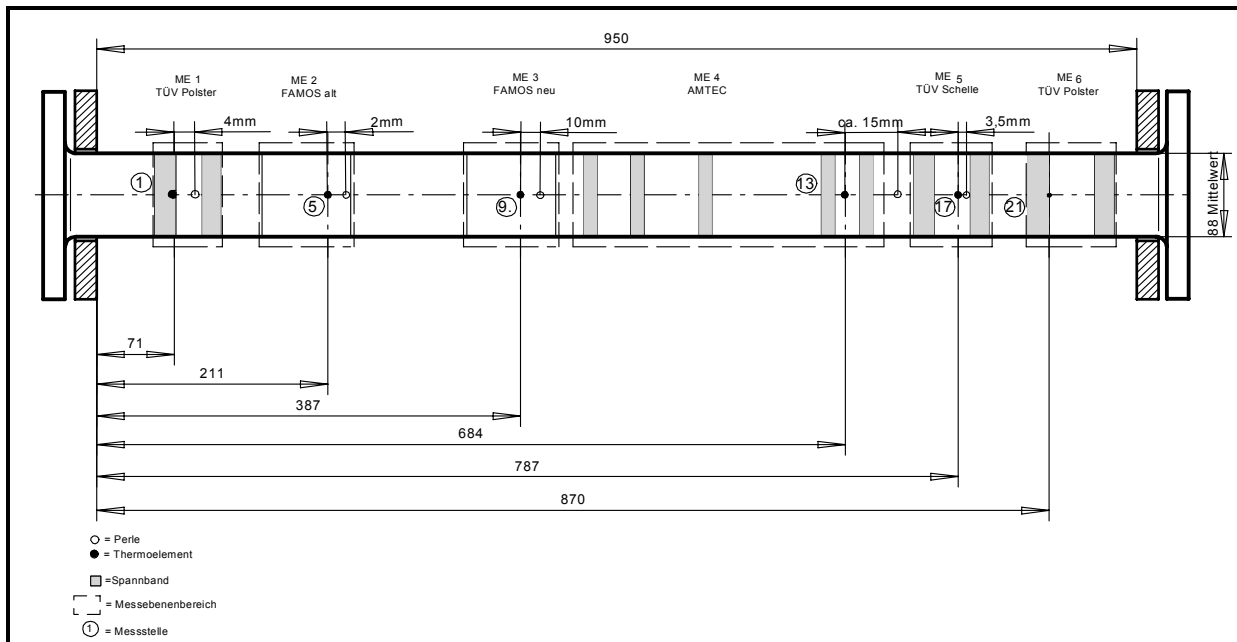
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke

Messebene 5:	TÜV Schelle_1 oben	Wanddicke:	12:00	8,0 mm
	Perle_9 oben		03:00	7,9 mm
	TÜV Schelle_2 unten		06:00	7,3 mm
	Perle_10 unten		09:00	7,3 mm

Detail TÜV Schelle



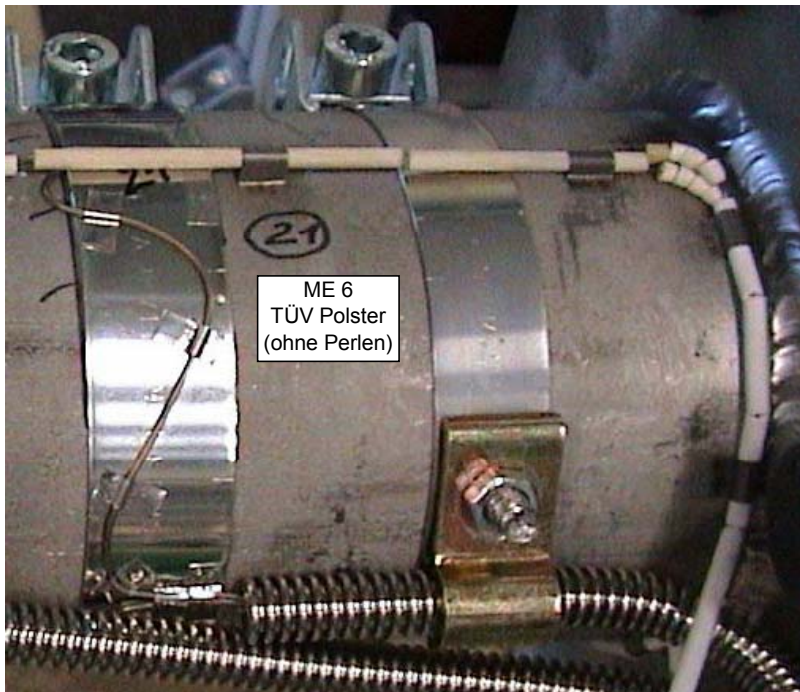
	Abt.: TAT 973	<p align="center">Messebene 5</p> TÜV Schelle_1 mit Perle_9 Lage am Rohr :12:00 TÜV Schelle_2 mit Perle_10 Lage am Rohr : 6:00		Auftrag: SB 335/01
	gez.: Steymans			Bild 3.4.5
	Datum: 04.01.2002			



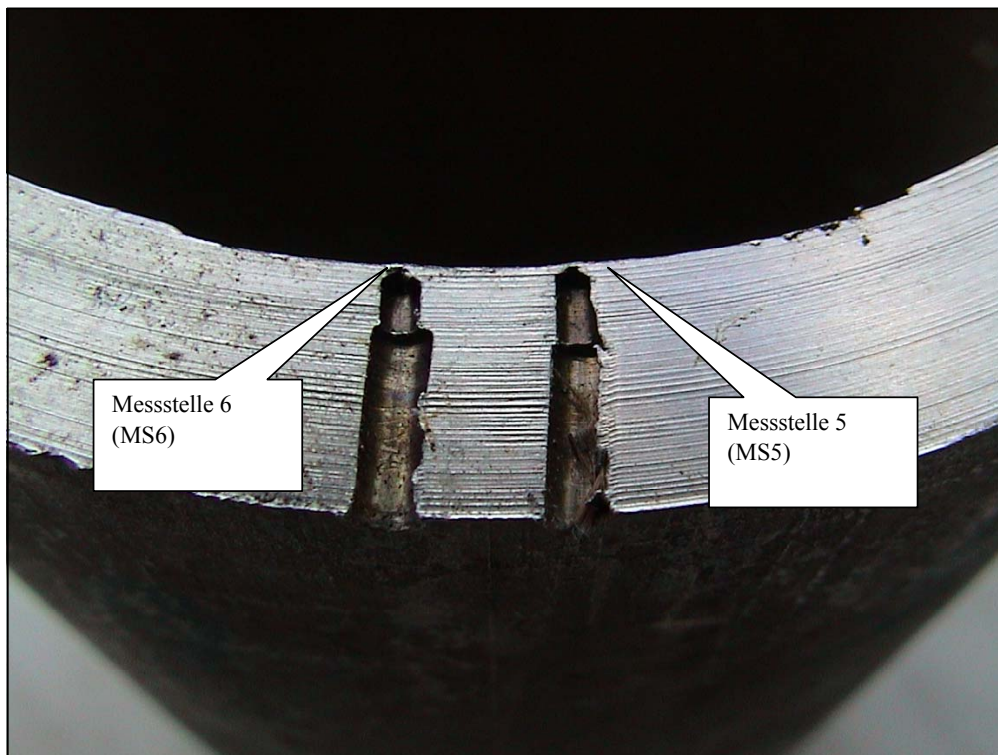
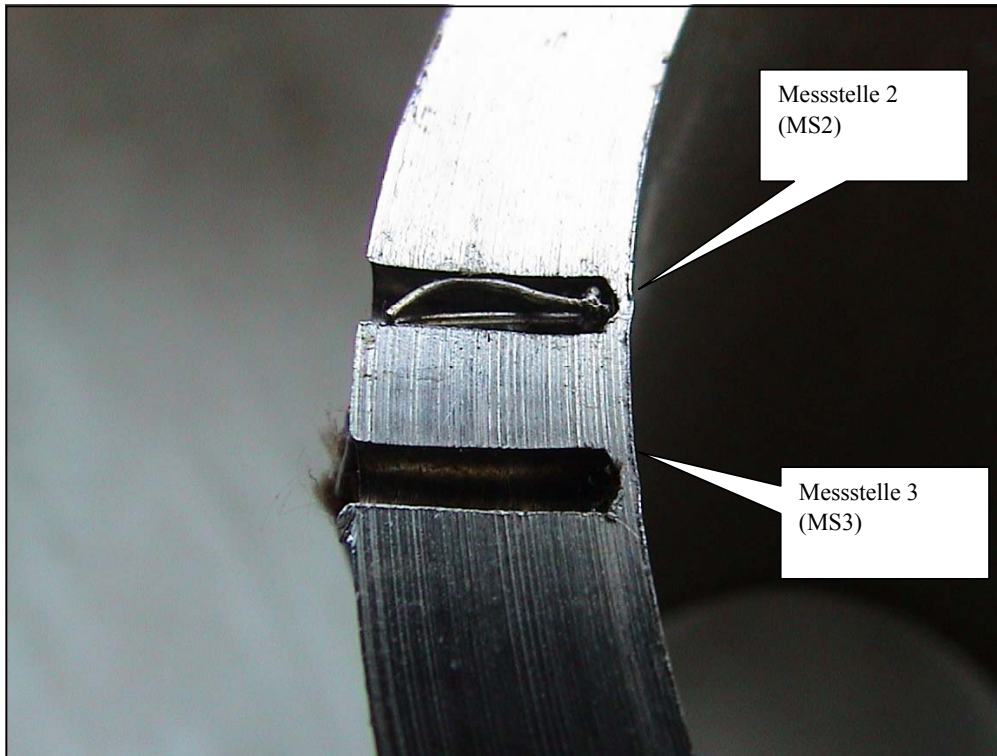
Maßstäbliche Skizze der Messstrecke


Messebene 6:	TÜV Polster_1a oben	Wanddicke:	12:00	8,1 mm
			03:00	7,9 mm
	TÜV Polster_2a unten		06:00	7,3 mm
			09:00	7,2 mm

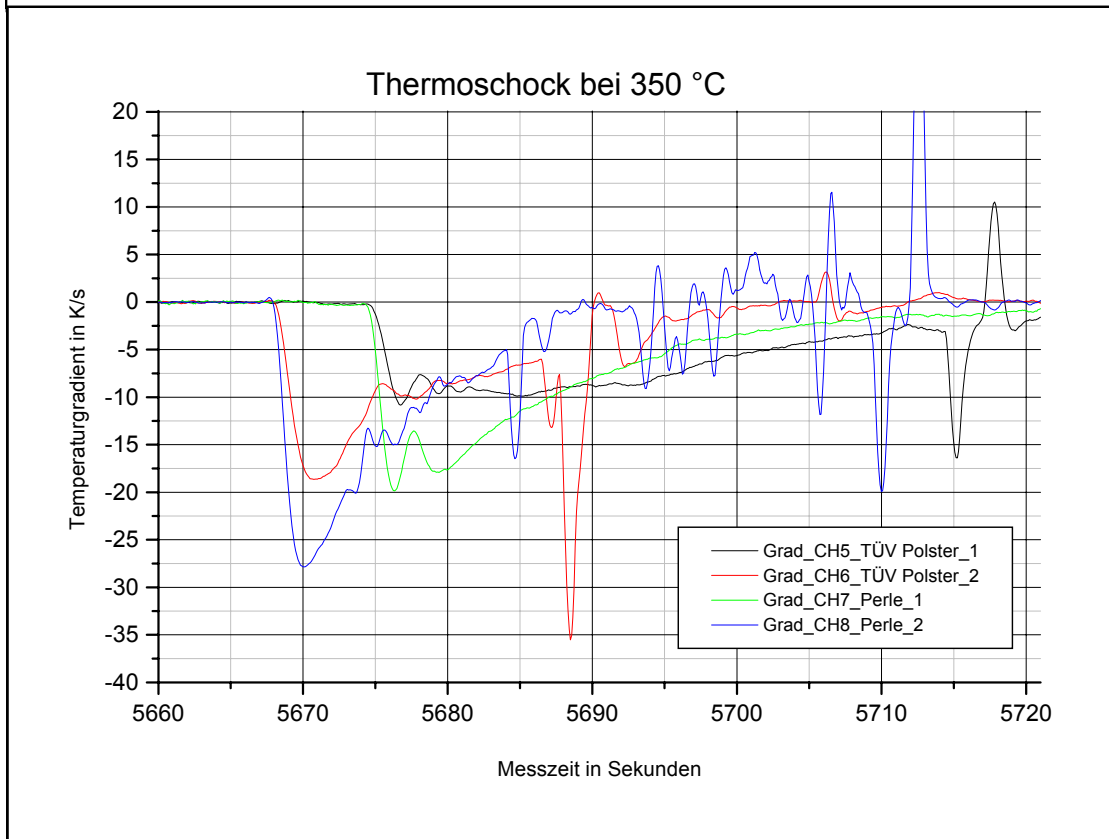
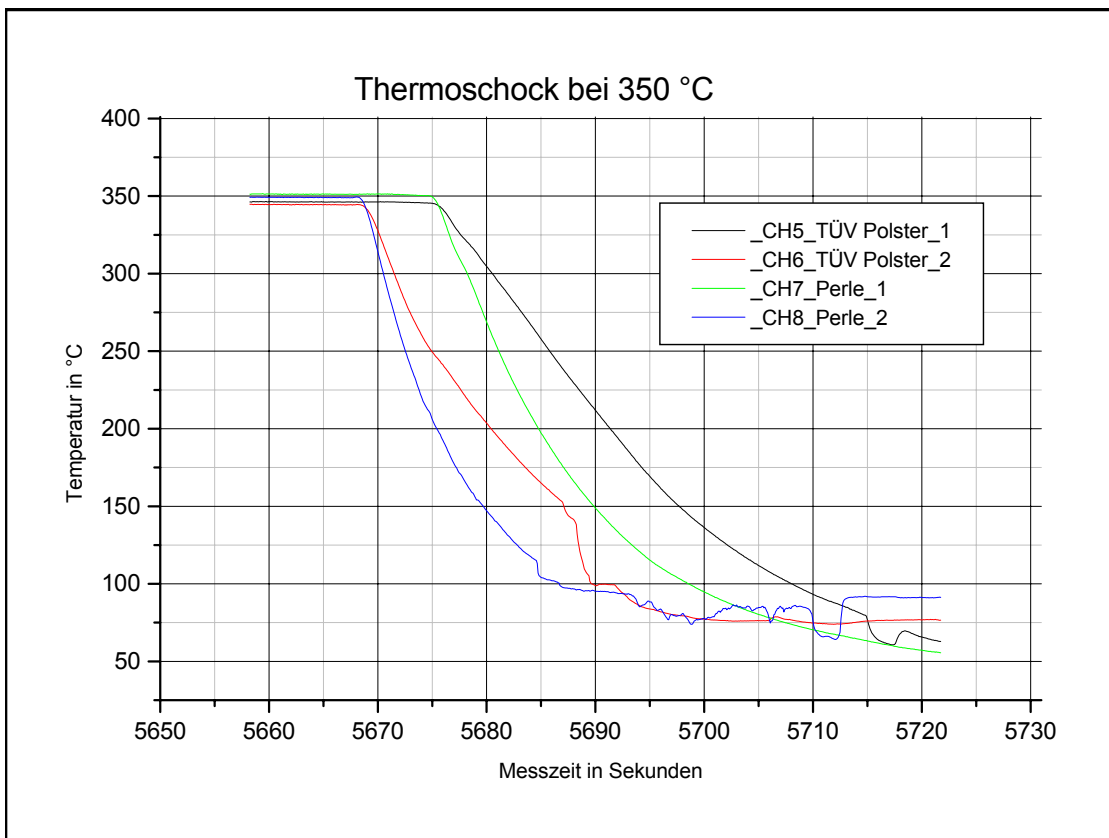
Detail TÜV Schelle



	Abt.: TAT 973 gez.: Steymans Datum: 04.01.2002	Messebene 6 TÜV Polster_1a Lage am Rohr :12:00 TÜV Polster_2a Lage am Rohr : 6:00		Auftrag: SB 335/01 Bild 3.4.6
--	--	--	--	---



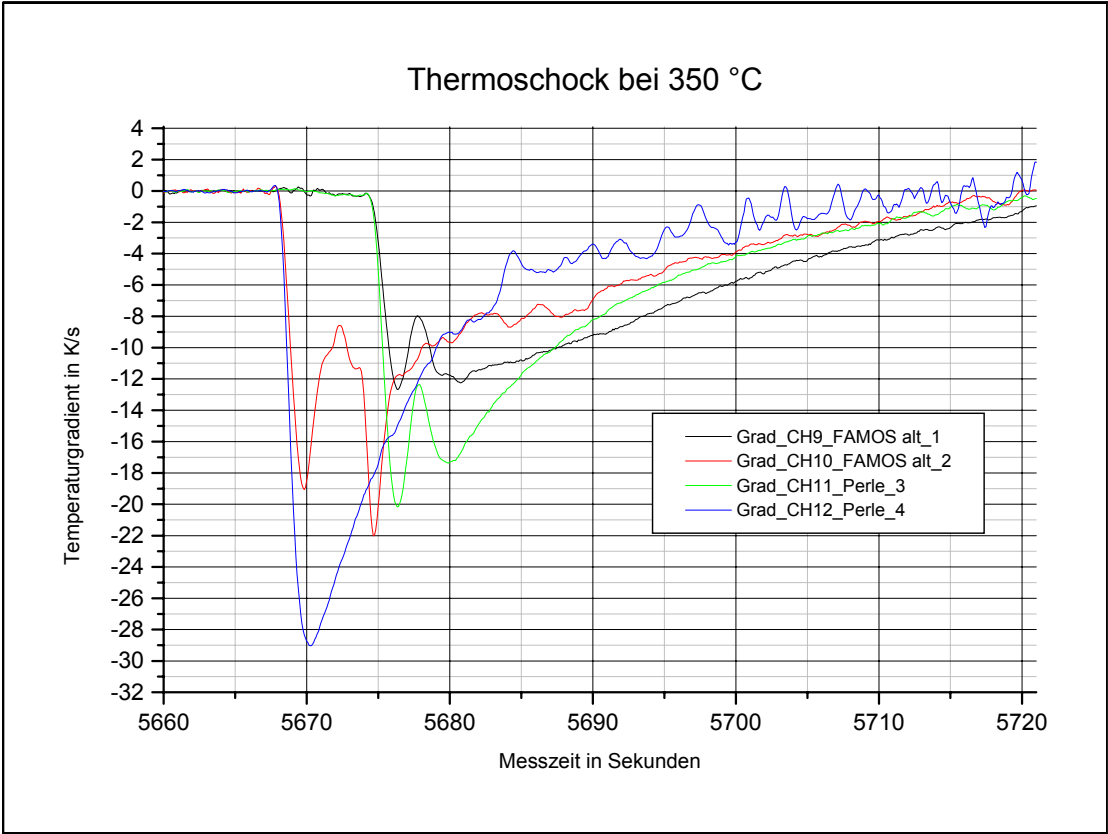
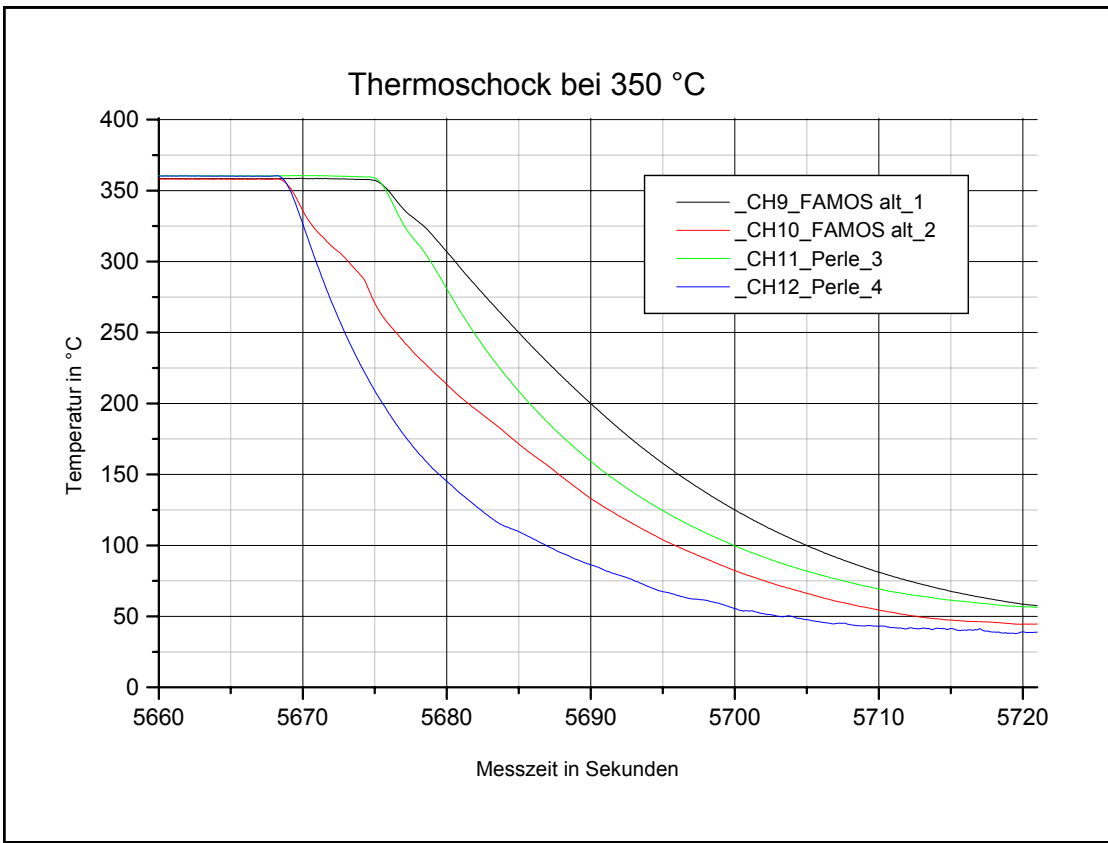
	Abt. : TAT 973	Messebene 7 Siempelkamp Messung von außen durch Bohrungen dicht vor der Innenoberfläche (oben MS 2, MS 3; unten MS 5, MS 6)	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.4.7
	Datum: 04.03.02		




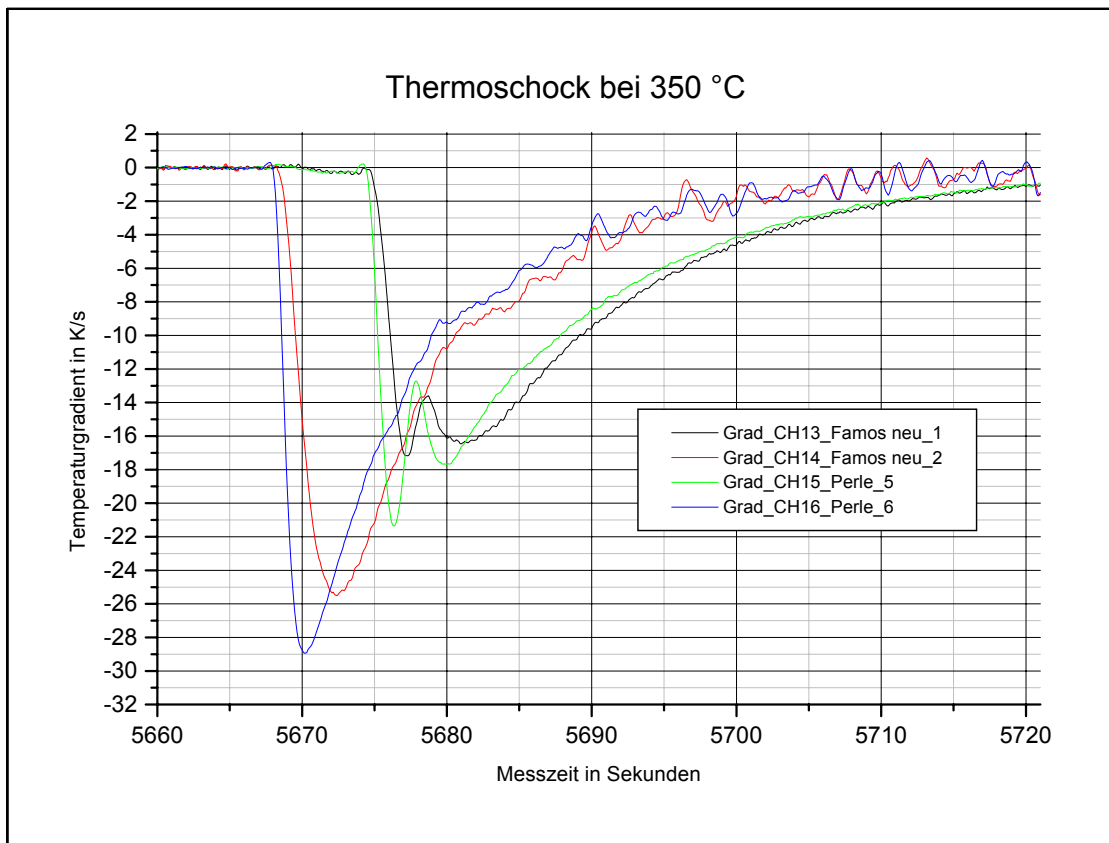
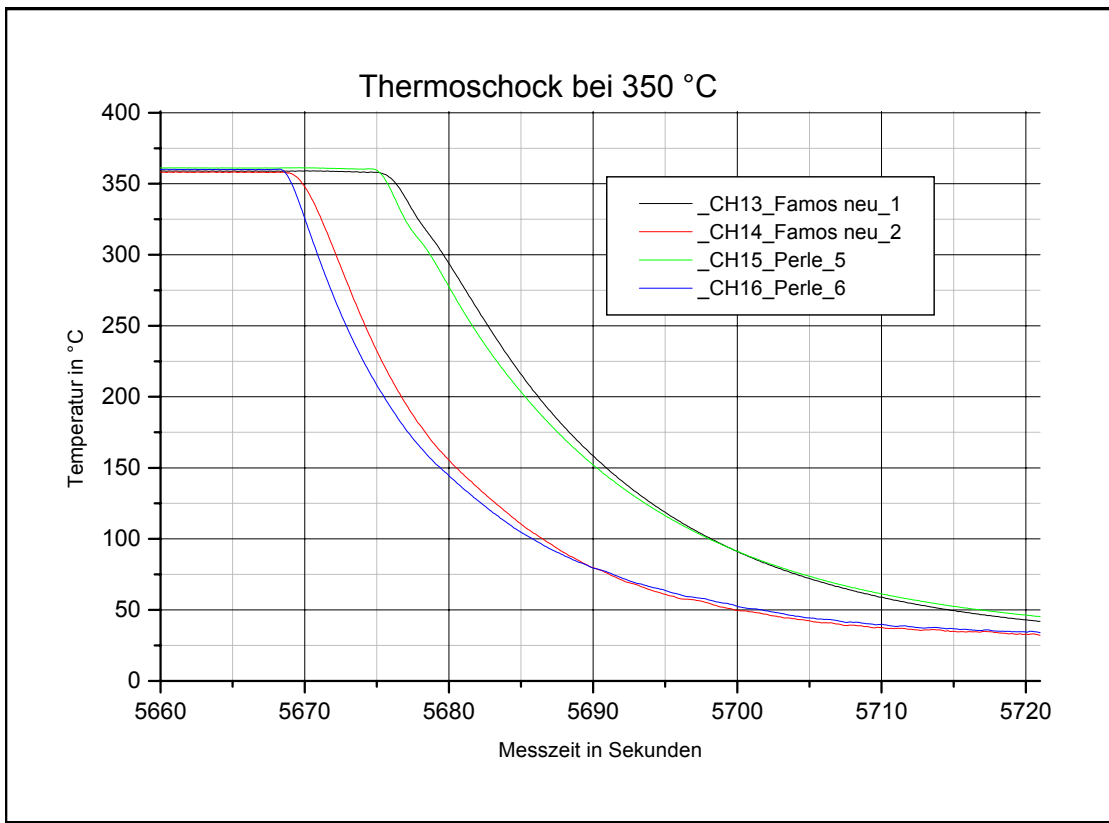
Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 04.03.02


Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 350°C
Messebene 1 "TÜV Polster"

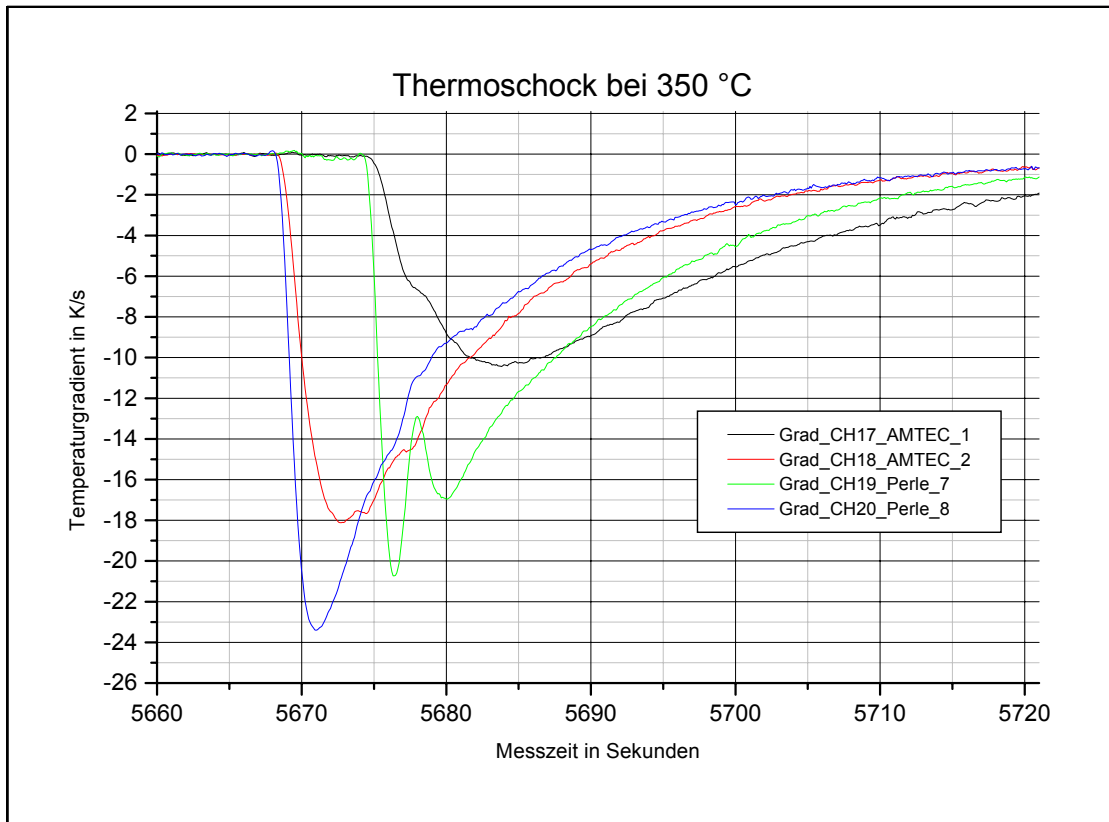
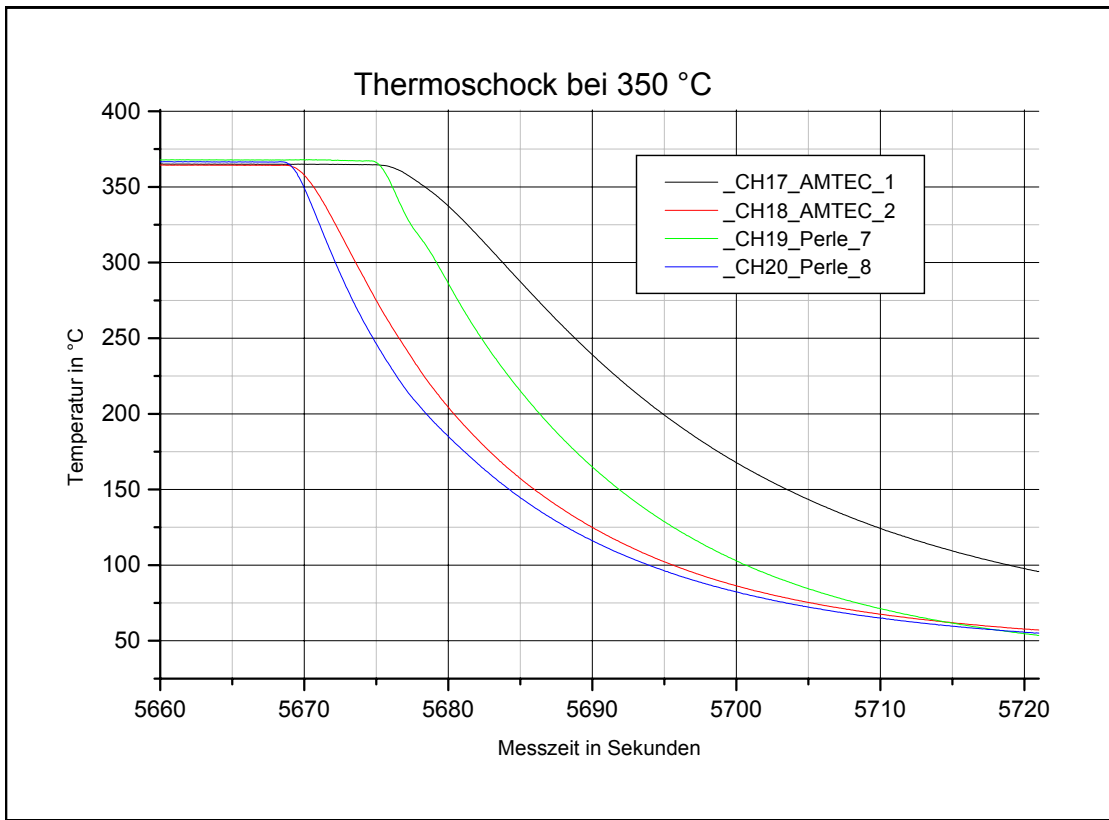
Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.5.1



	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock aus 350°C Messebene 2 "FAMOS alt"	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.5.2
	Datum: 04.03.02		



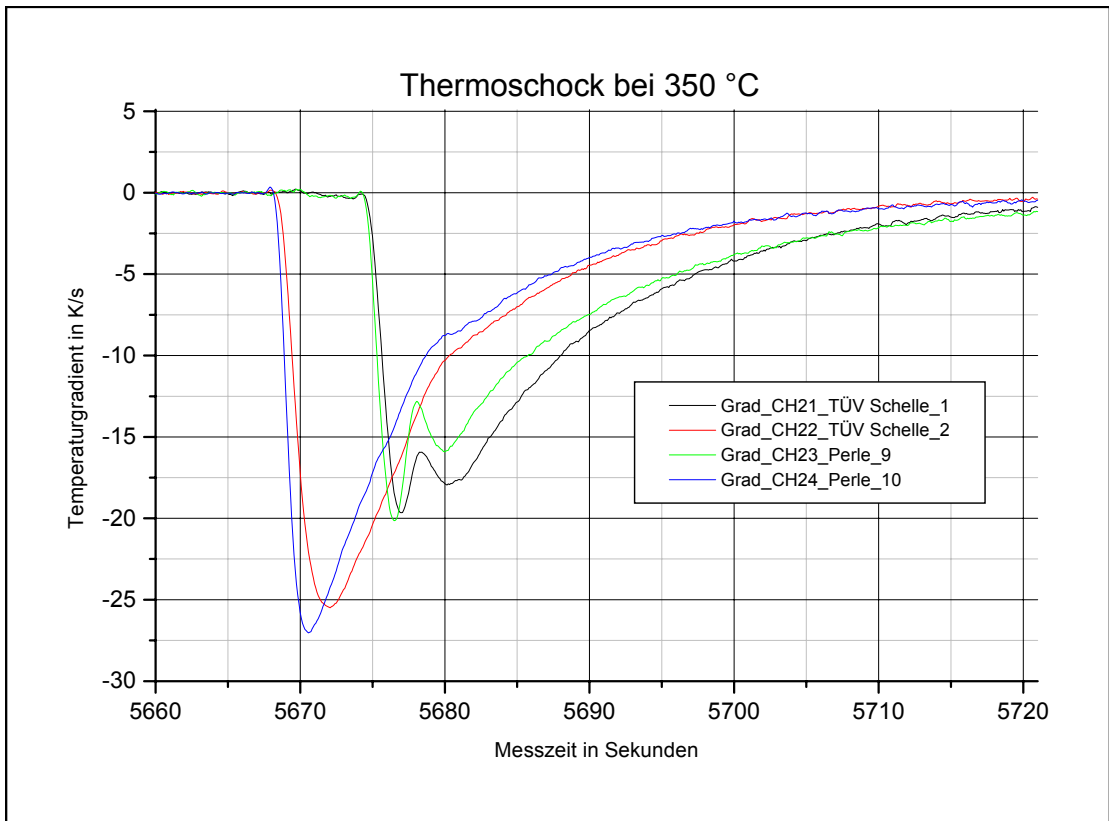
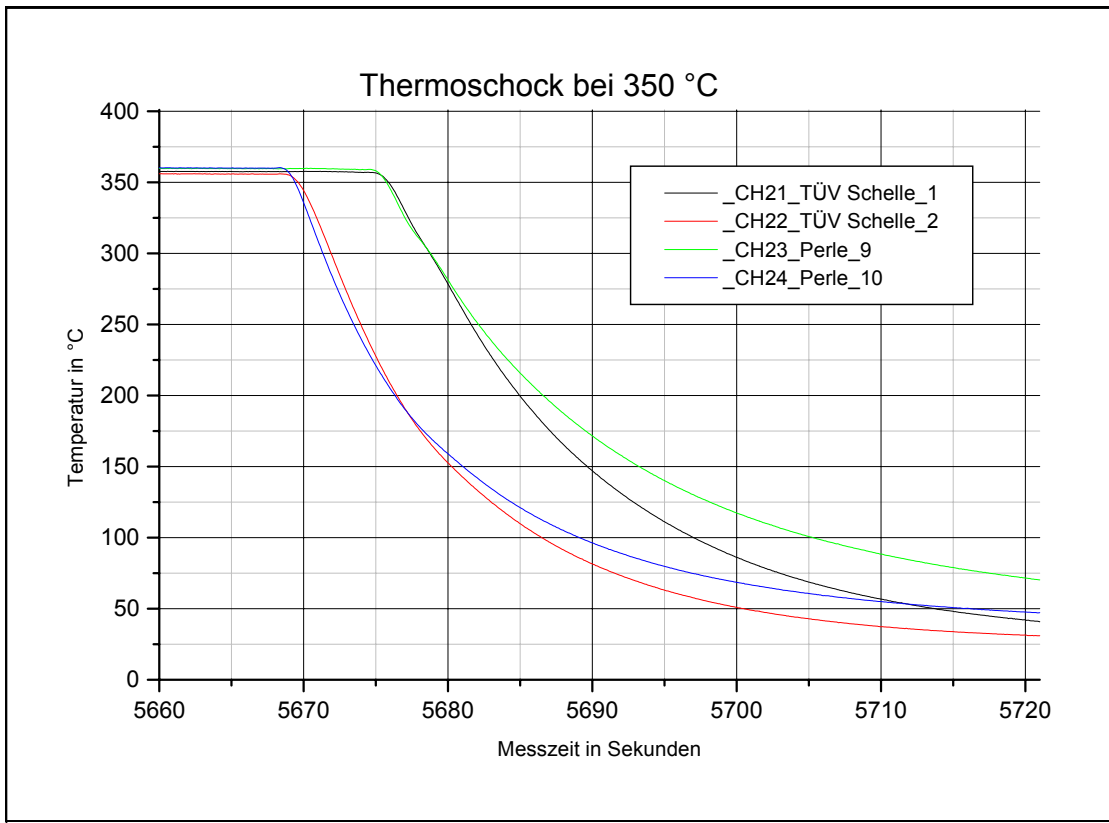
	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock aus 350°C Messebene 3 "FAMOS neu"	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.5.3
	Datum: 04.03.02		



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 04.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 350°C
Messebene 4 "AMTEC"

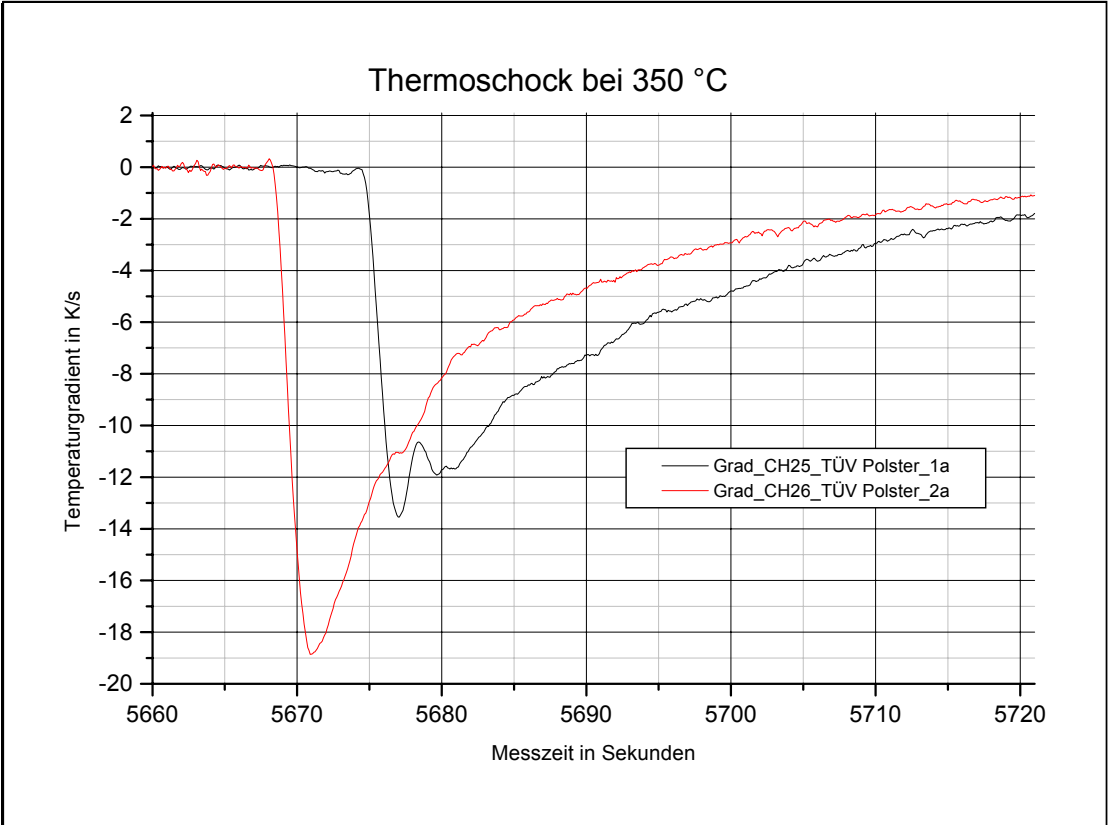
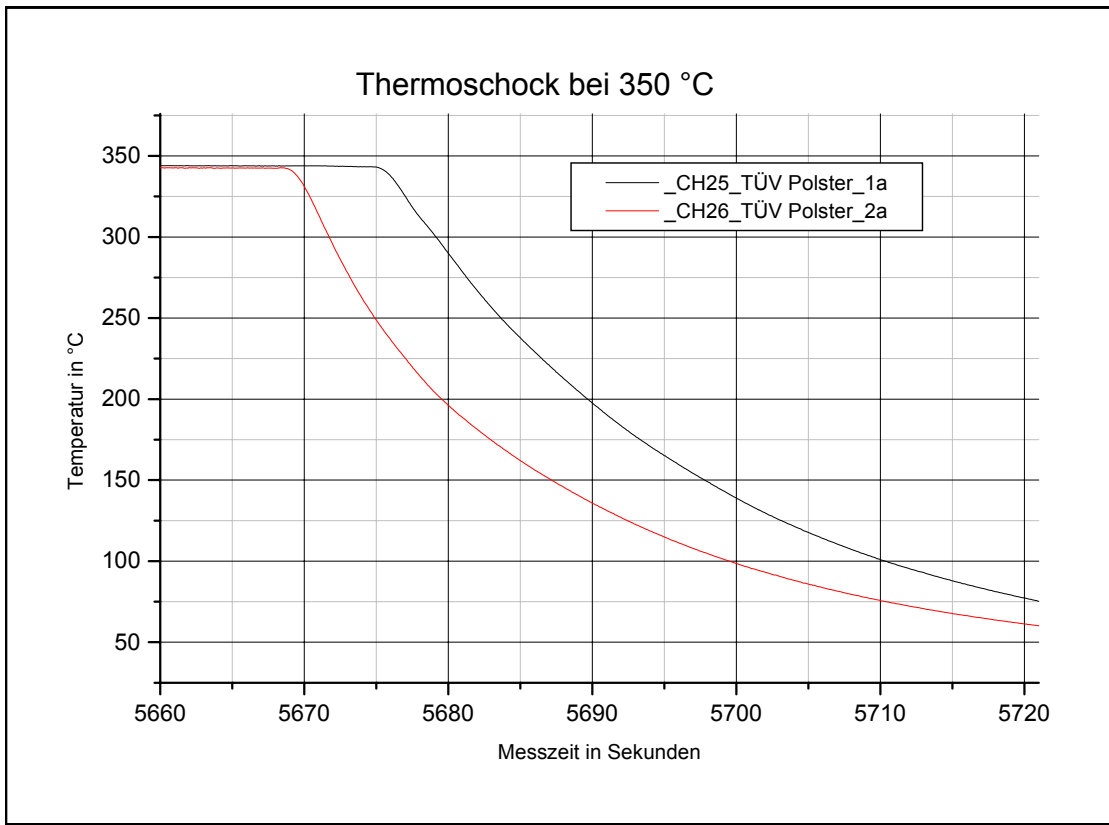
Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.5.4




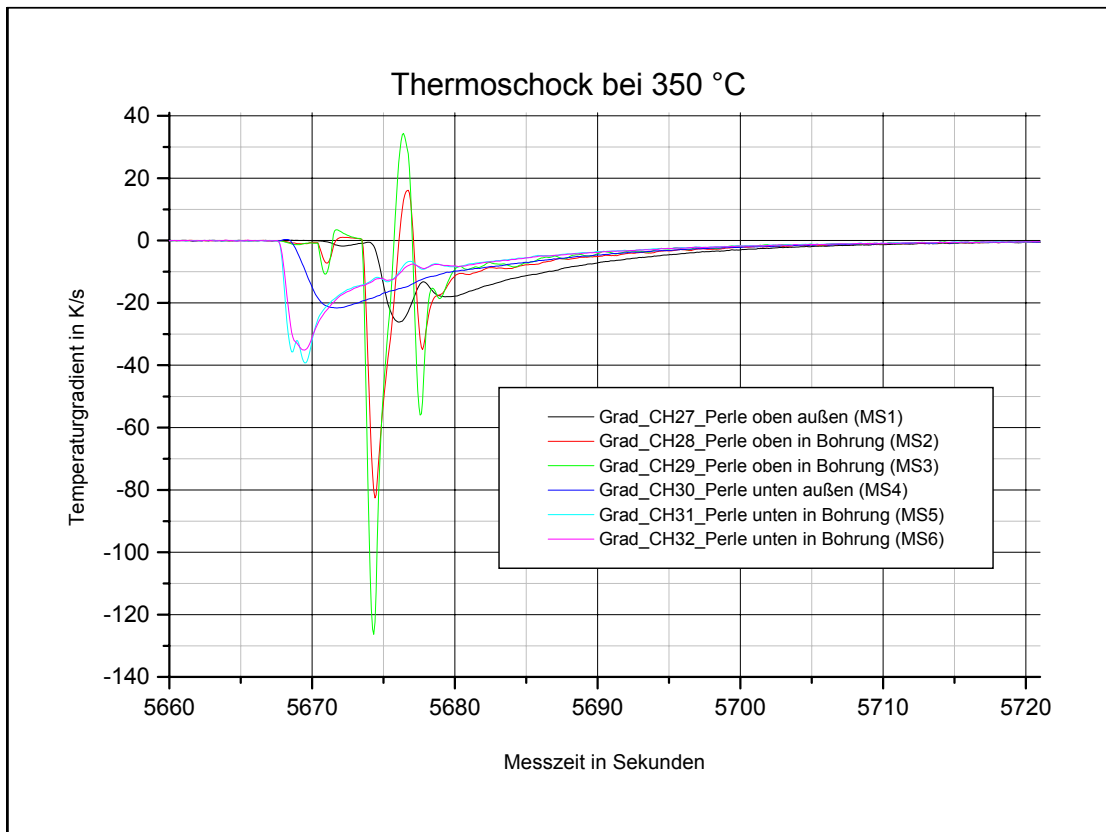
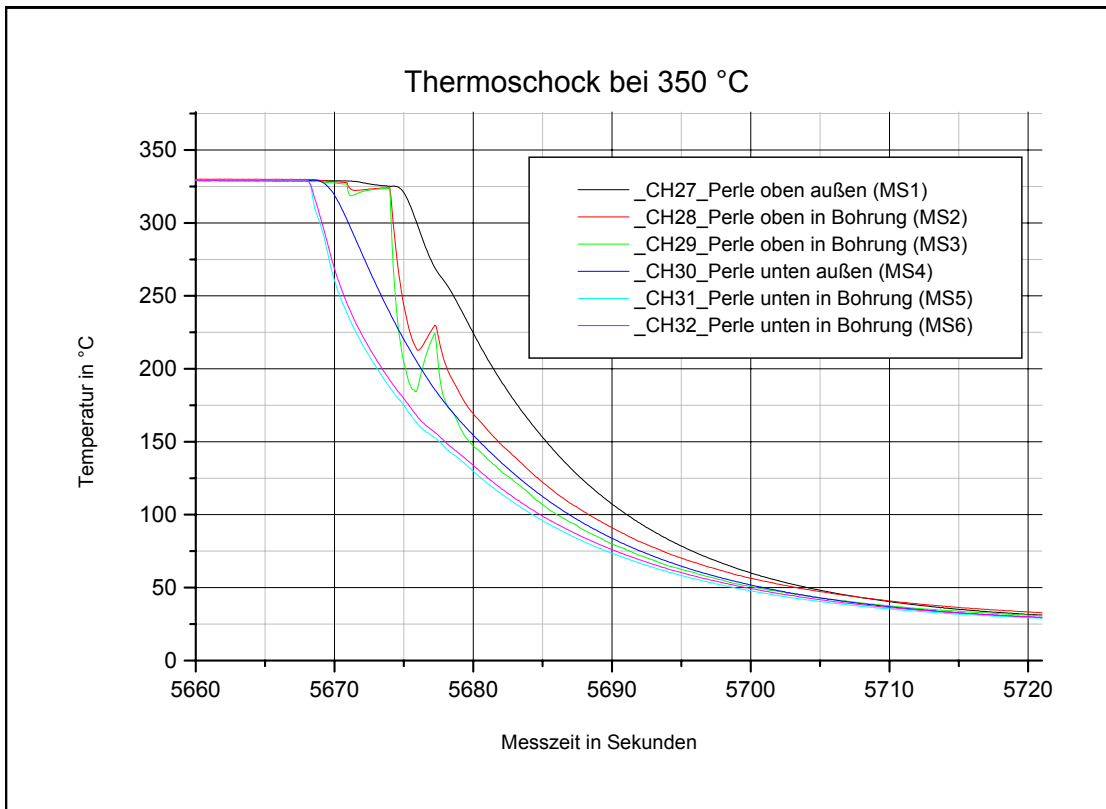
Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 04.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 350°C
Messebene 5 "TÜV Schelle"

Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.5.5



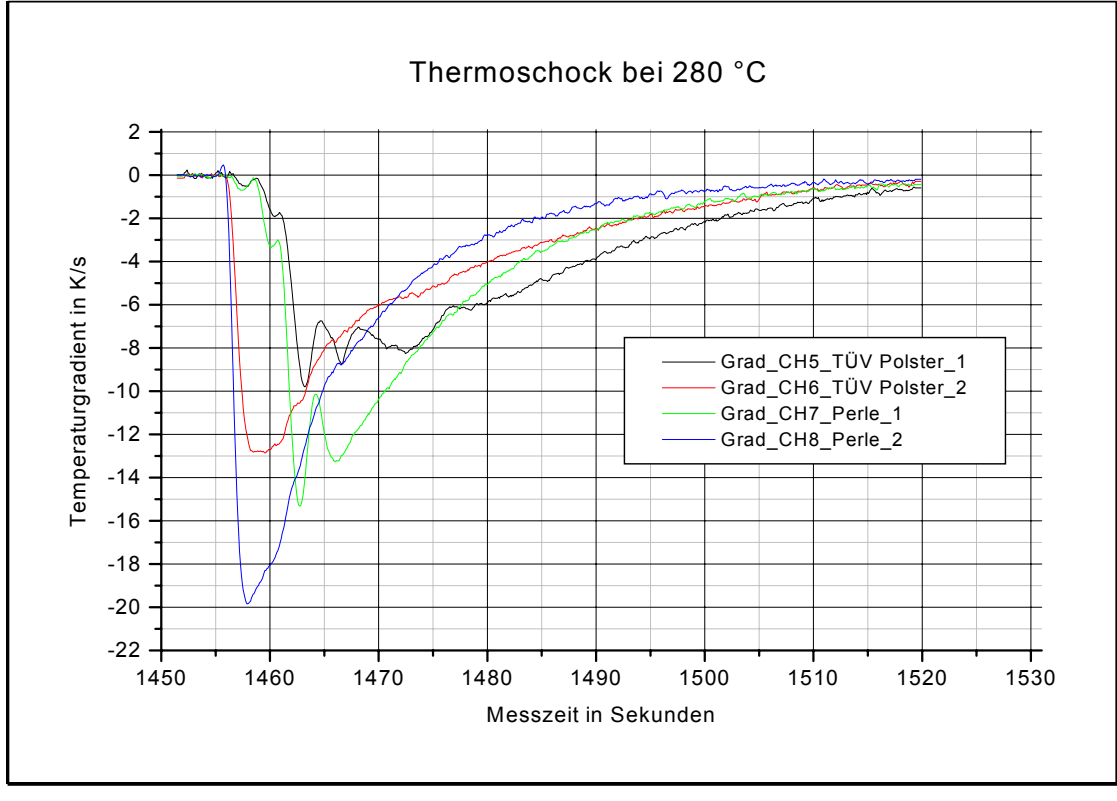
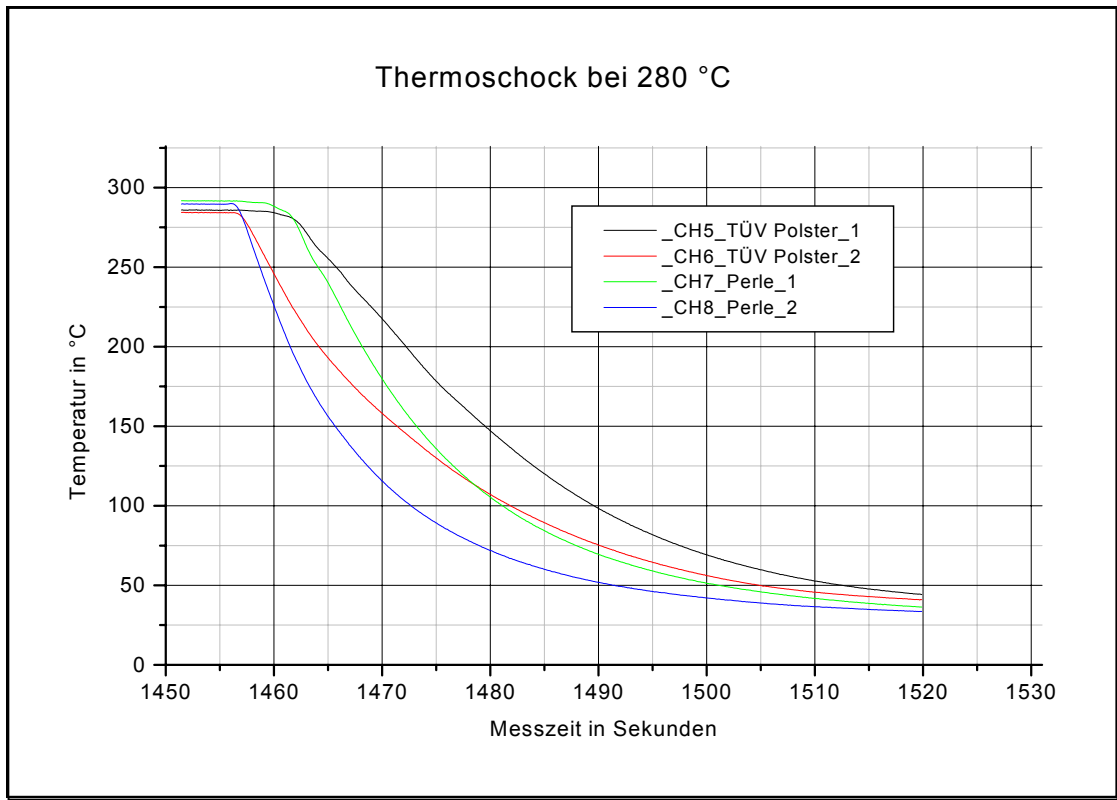
	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock aus 350°C Messebene 6 "TÜV Polster 2"	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.5.6
	Datum: 04.03.02		




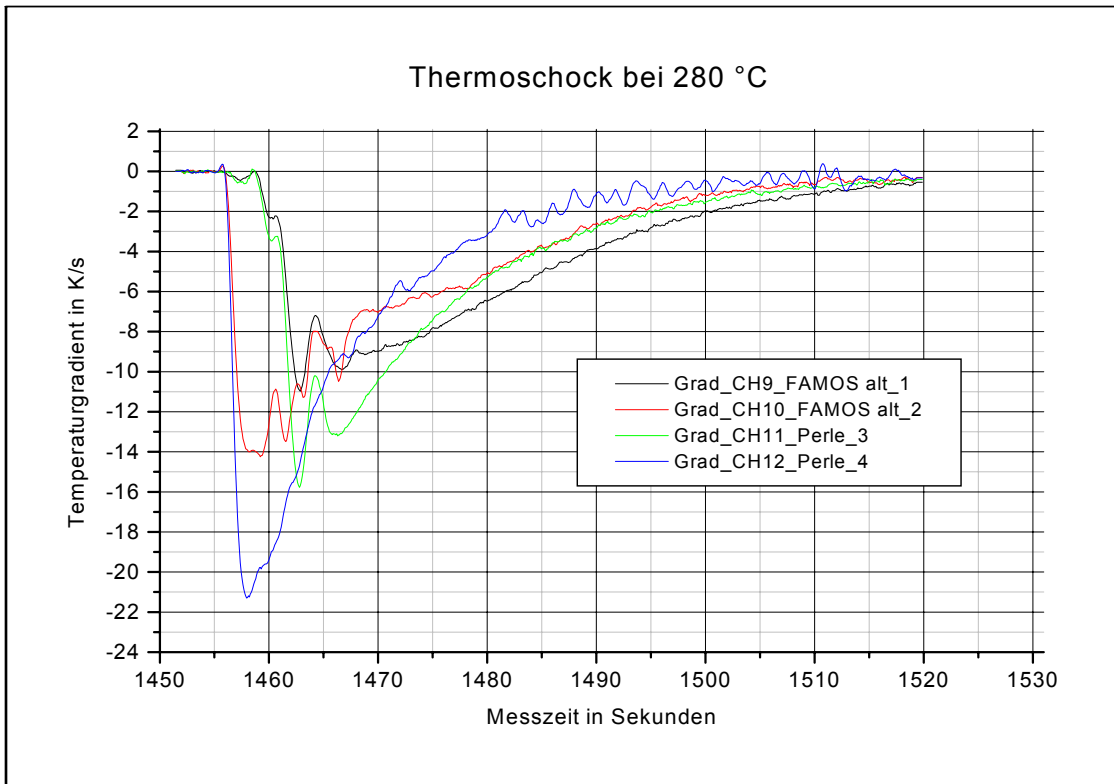
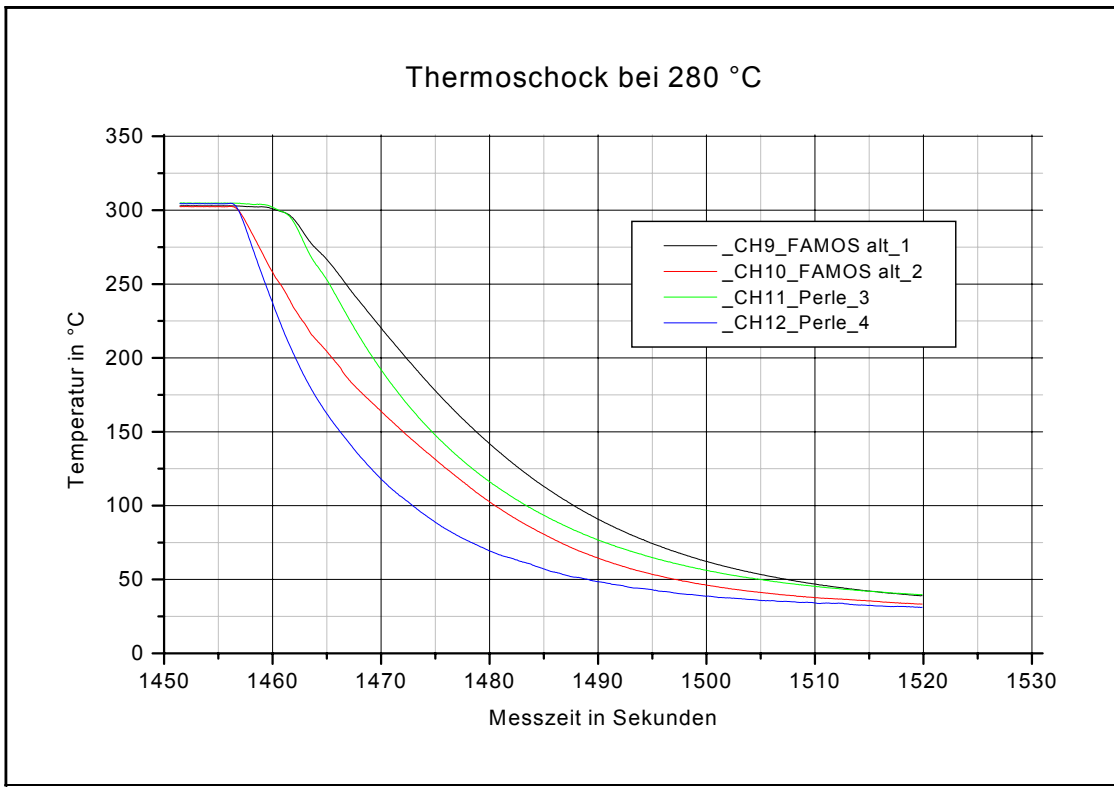
Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 04.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 350°C
Messebene 7 "Siempelkamp"

Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.5.7



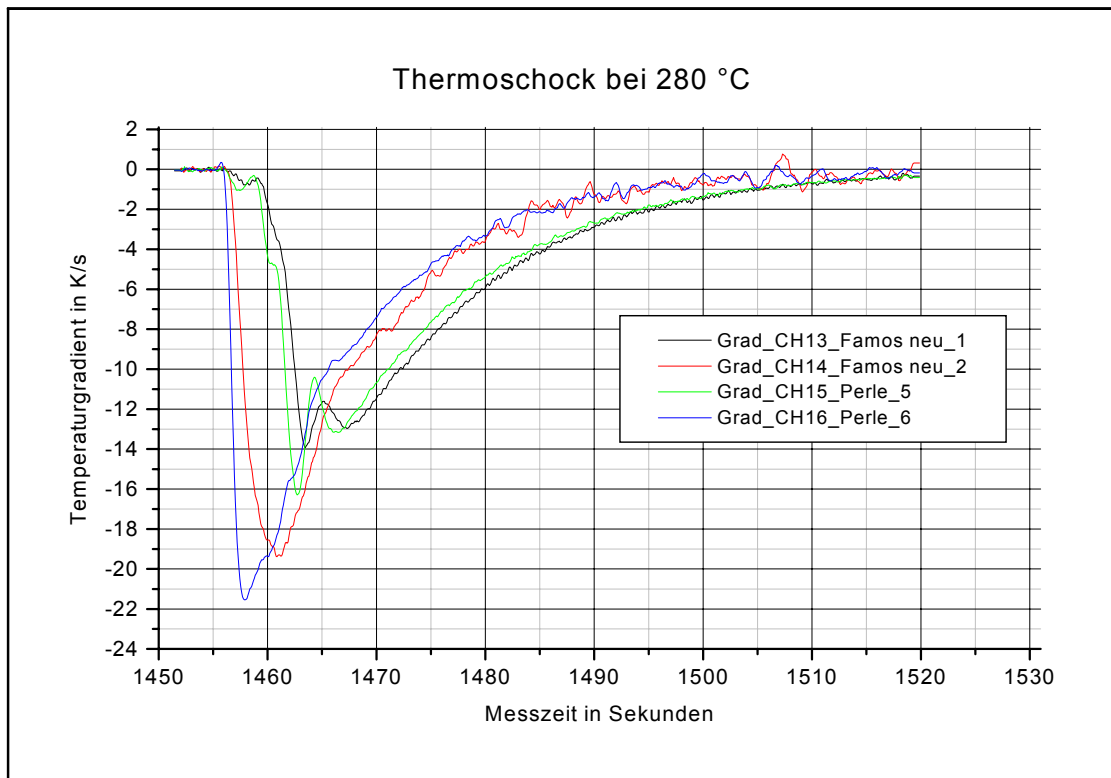
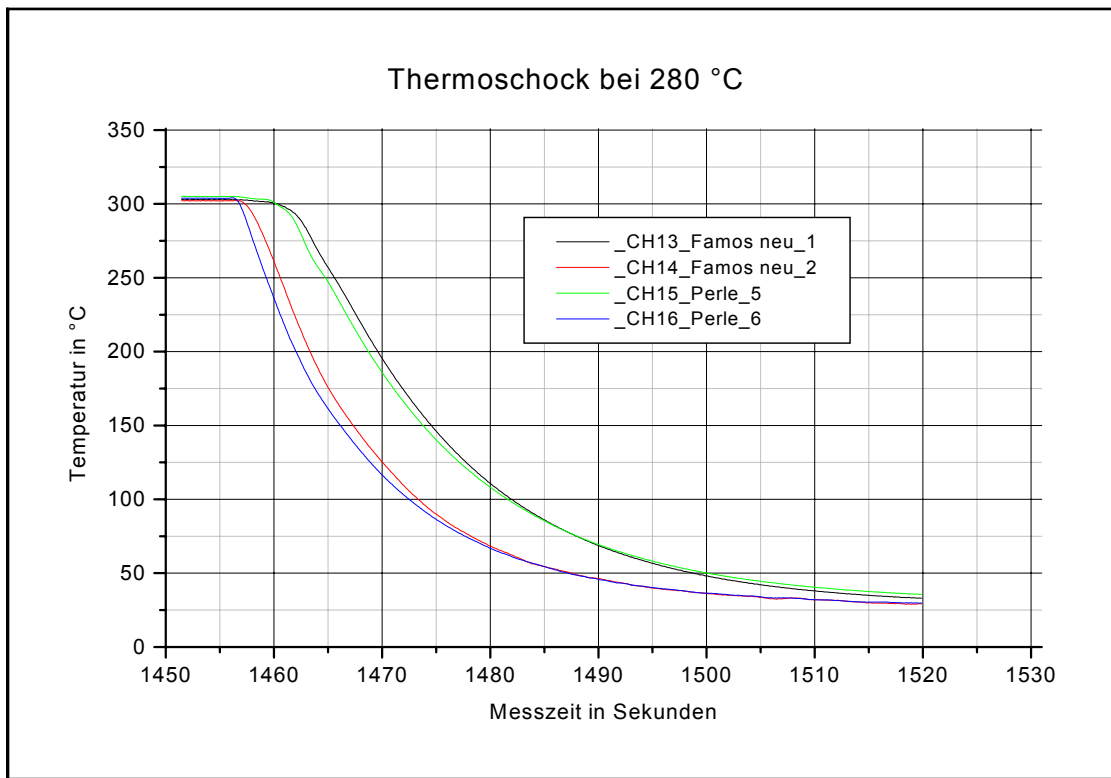
	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock aus 280°C Messebene 1 "TÜV Polster"	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.6.1
	Datum: 06.03.02		



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 280°C
 Messebene 2 "FAMOS alt"

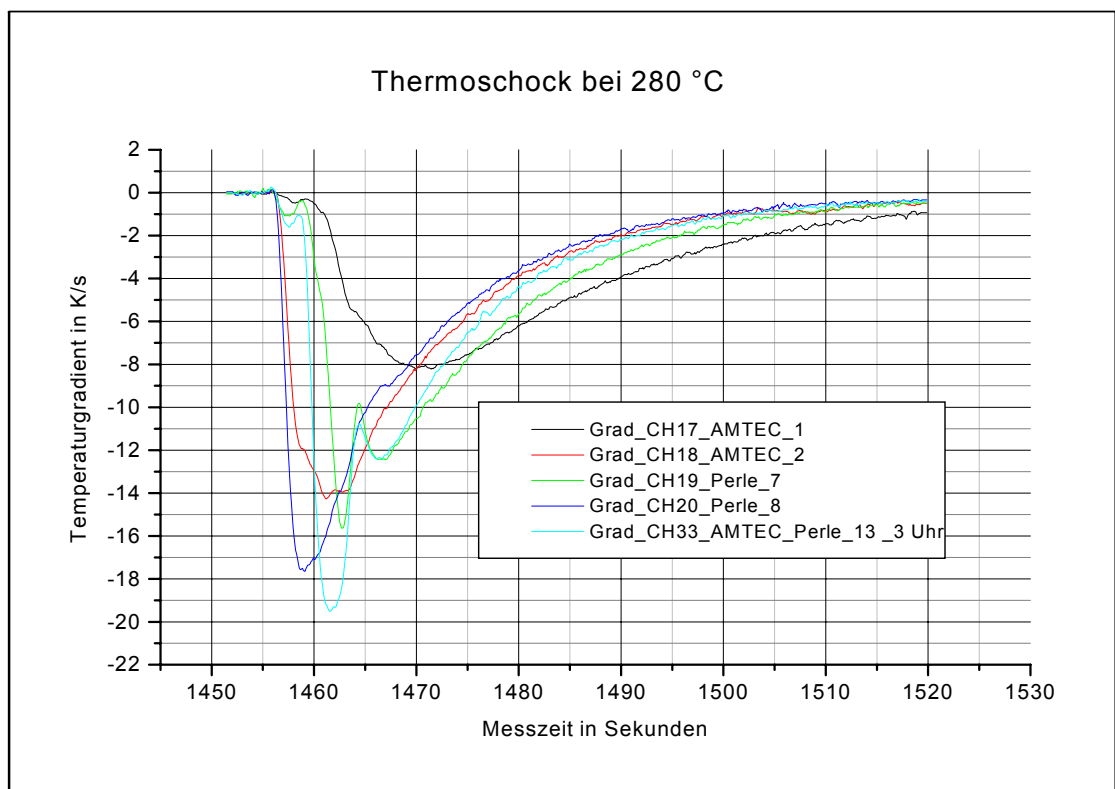
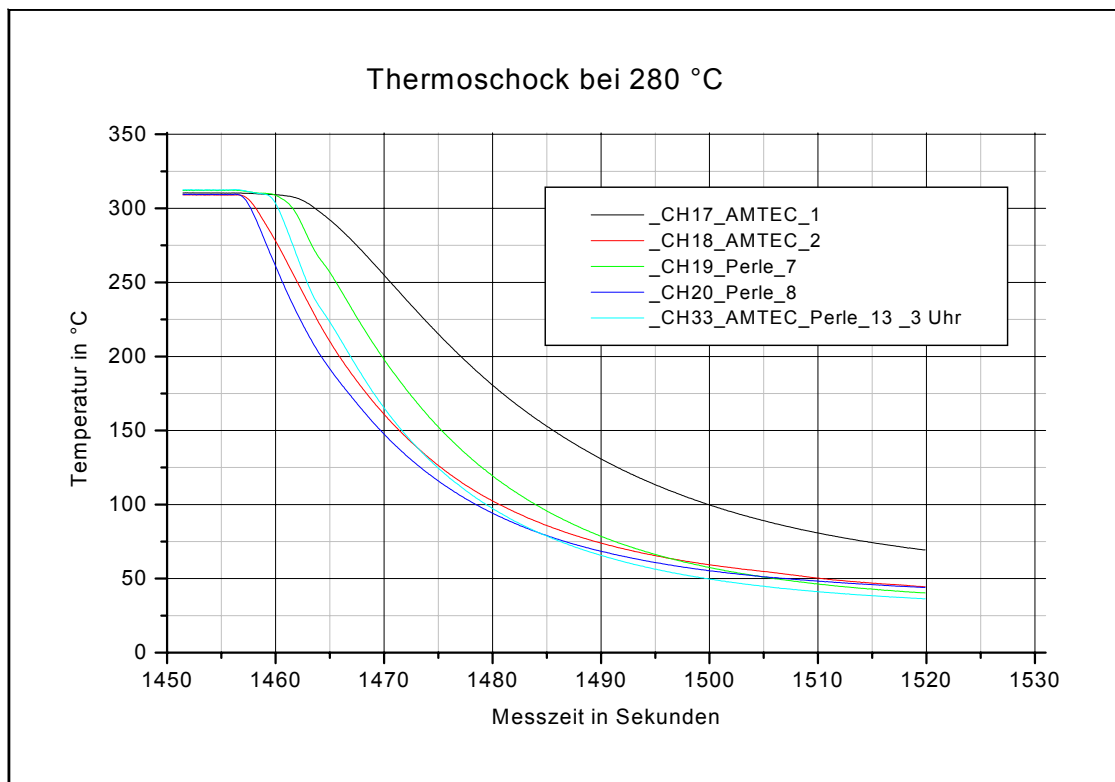
Auftr.: SB 335/01
 Bild: 3.6.2

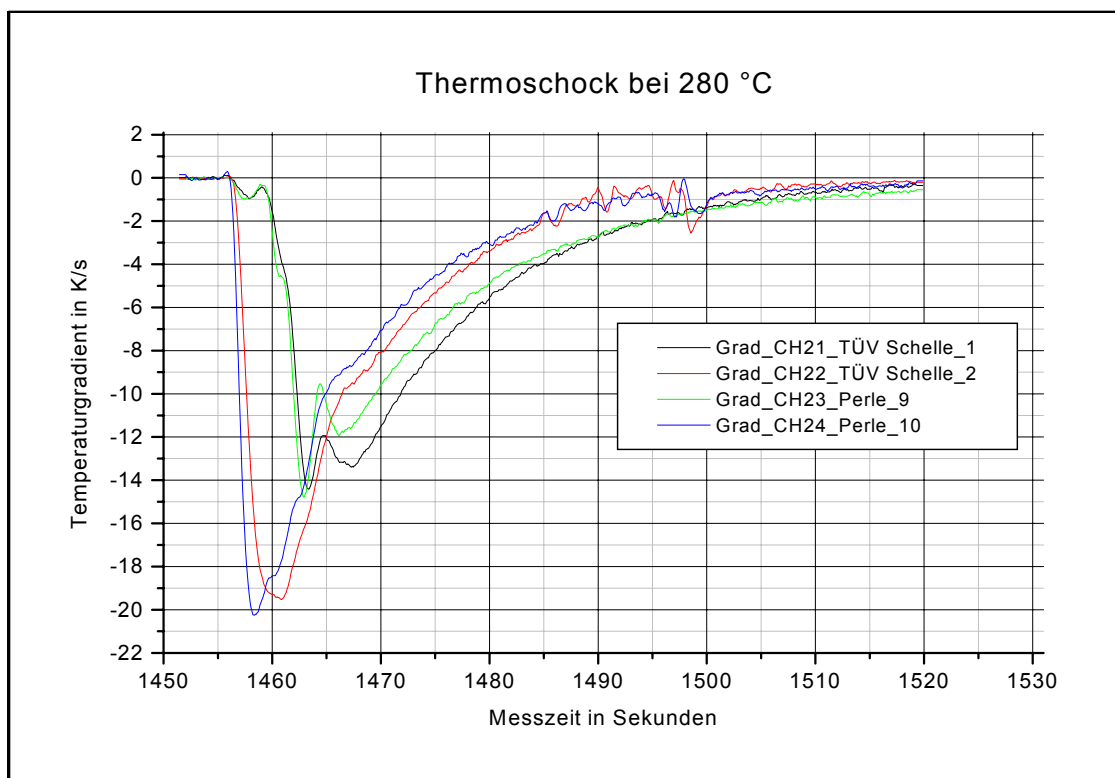
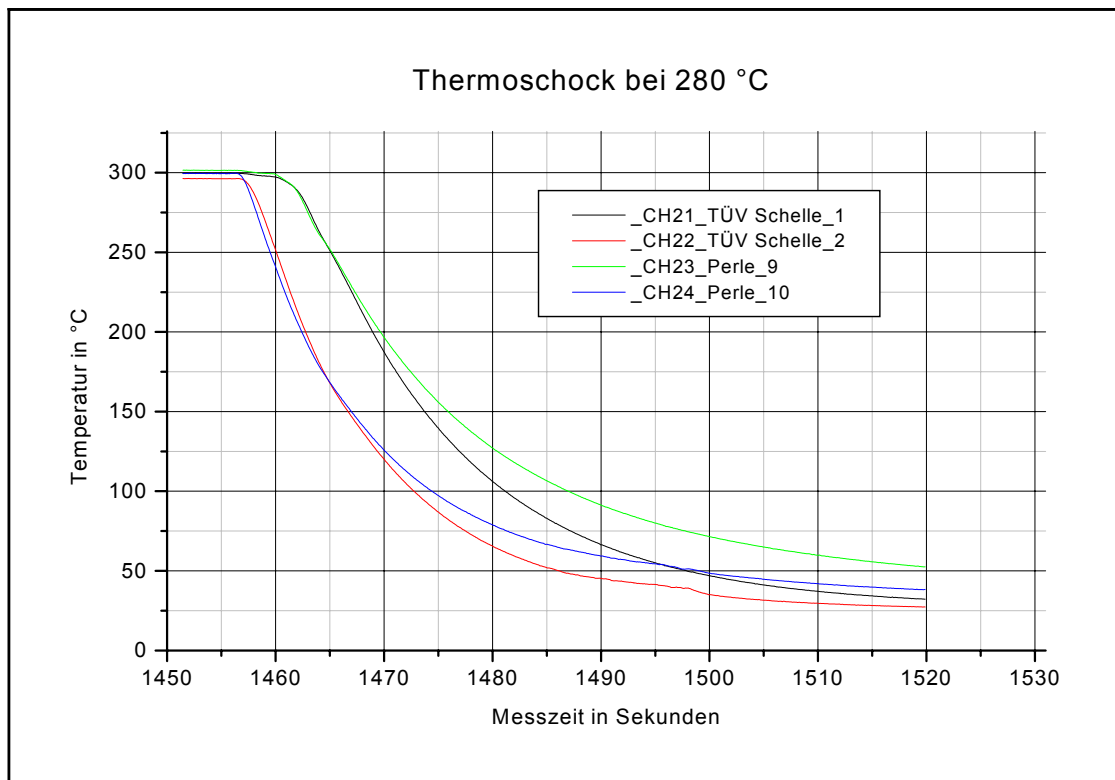


Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 280°C
 Messebene 3 "FAMOS neu"

Auftr.: SB 335/01
 Bild: 3.6.3



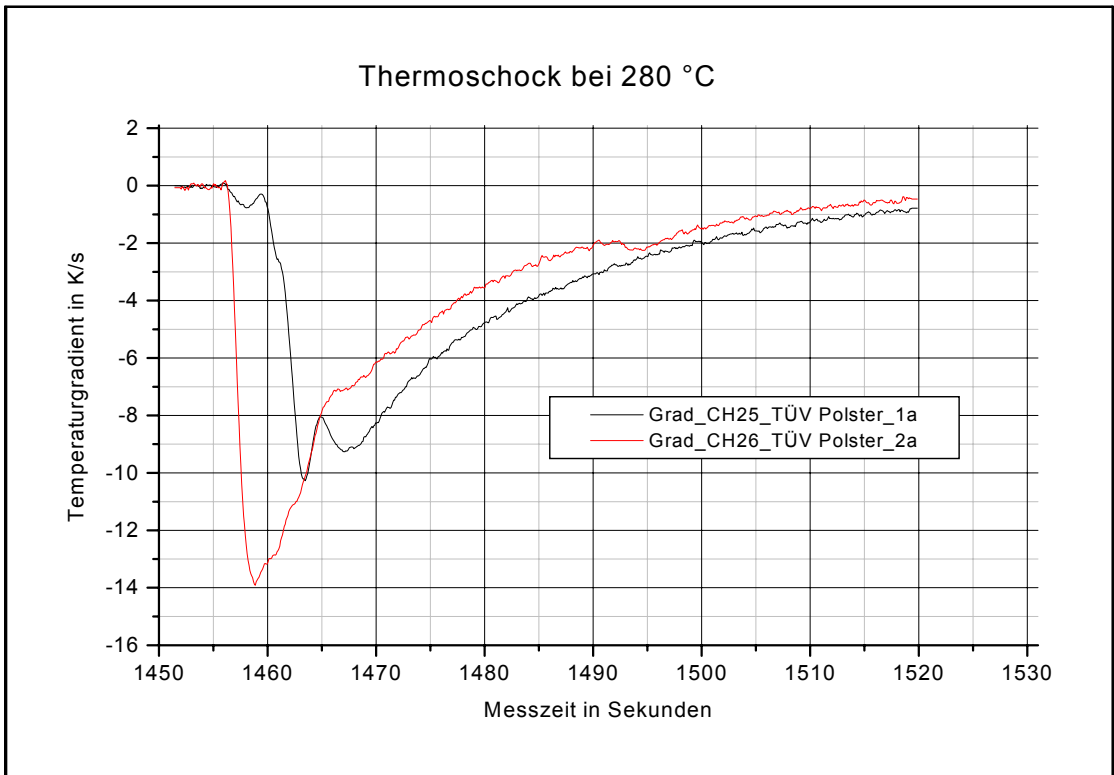
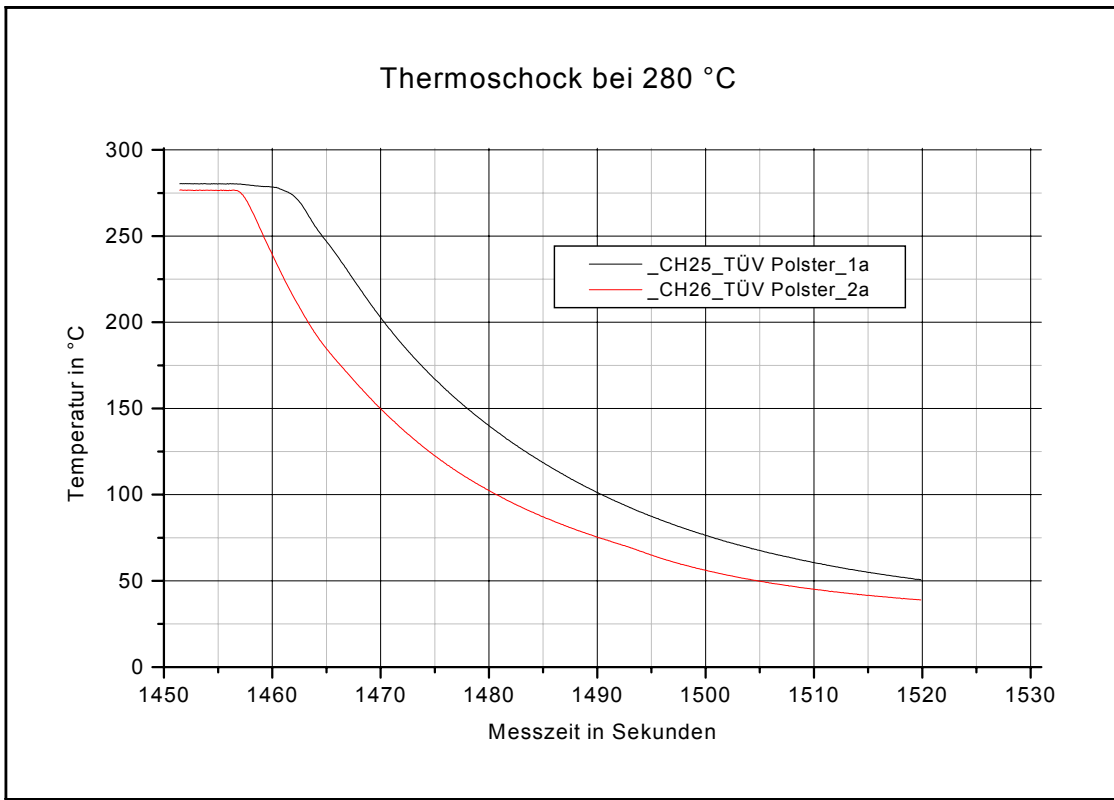


Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 280°C
 Messebene 5 "TÜV Schelle"

Auftr.: SB 335/01

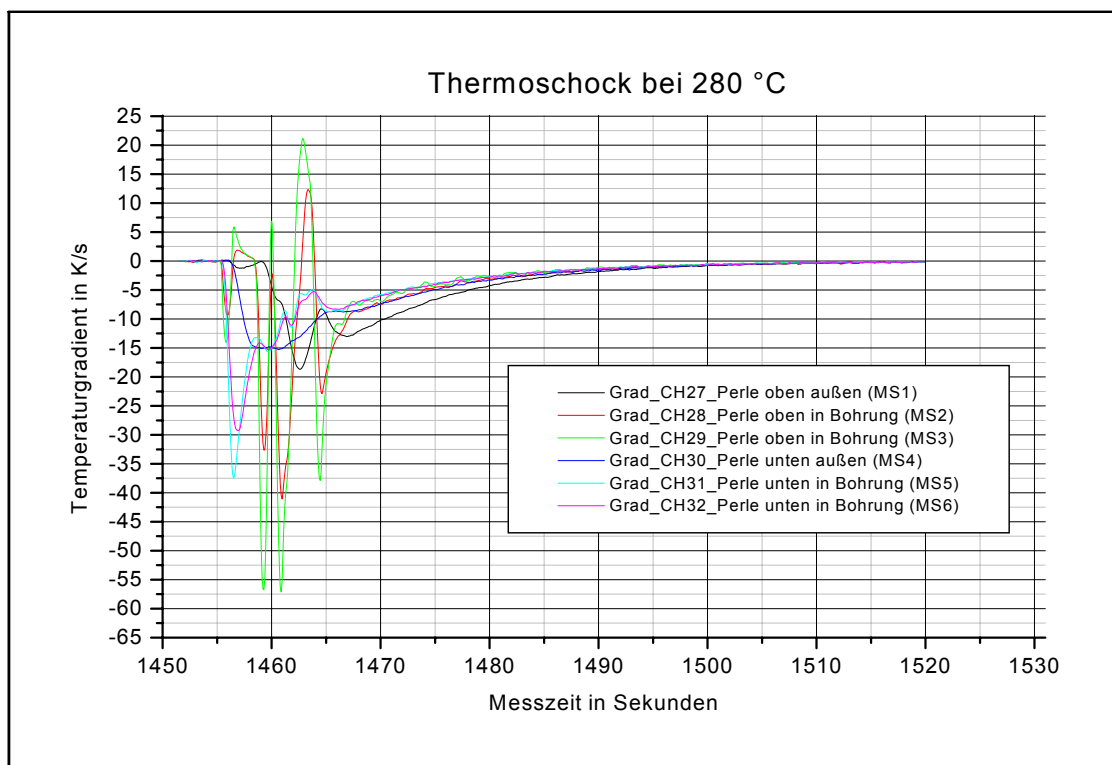
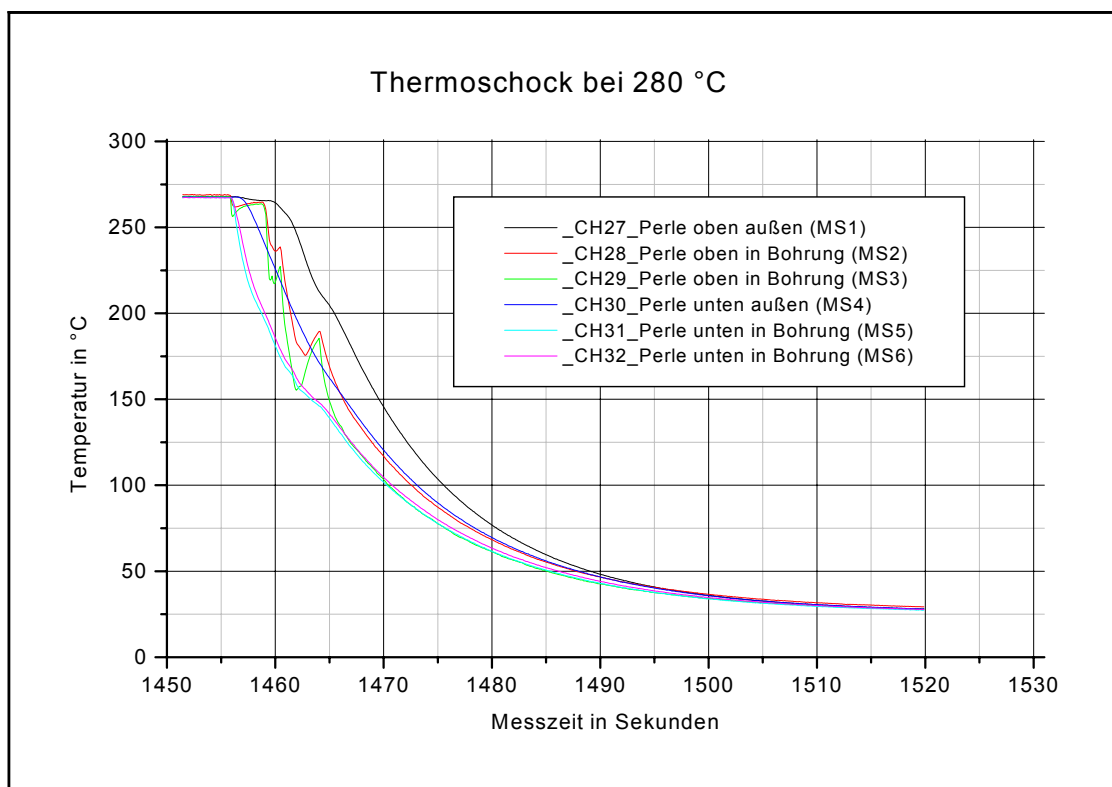
Bild: 3.6.5

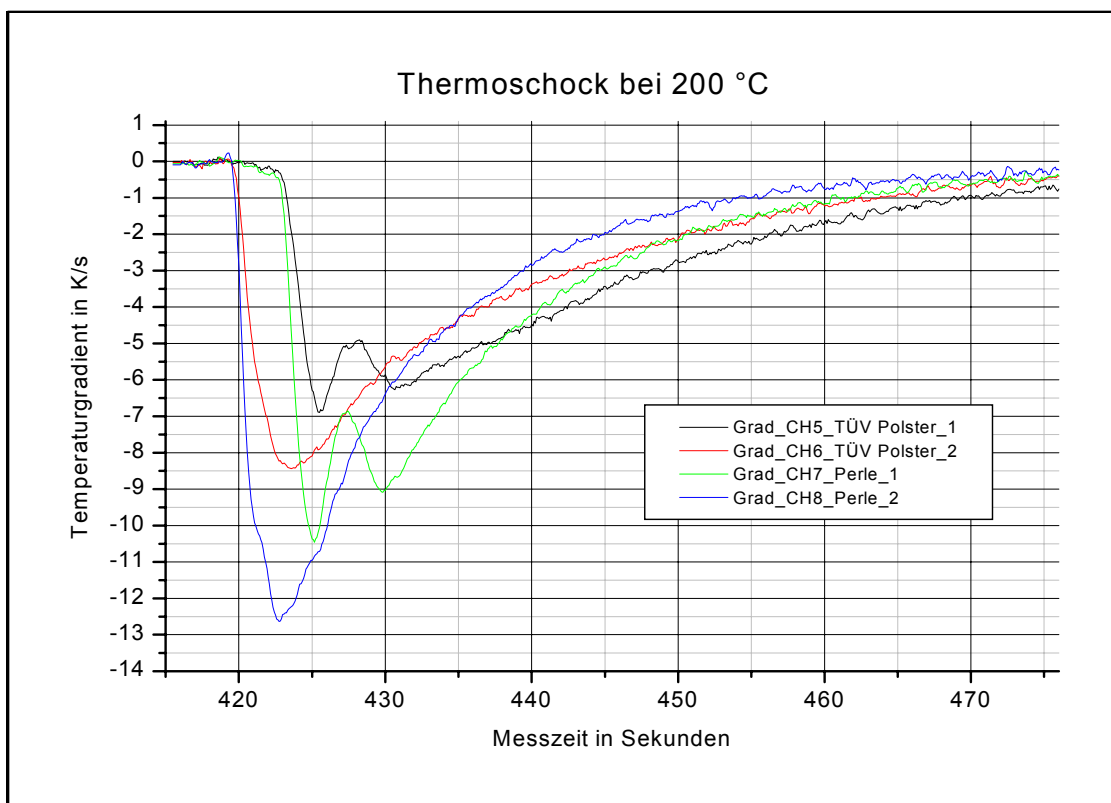
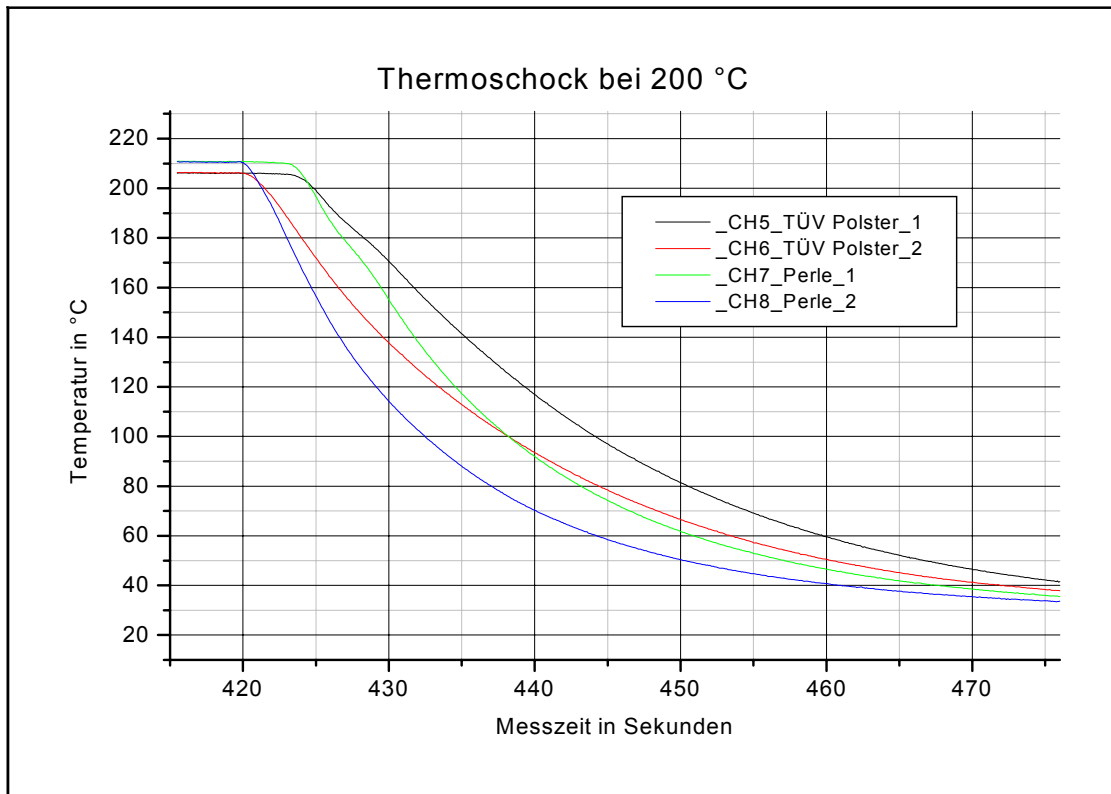


Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 280°C
 Messebene 6 "TÜV Polster 2"

Auftr.: SB 335/01
 Bild: 3.6.6



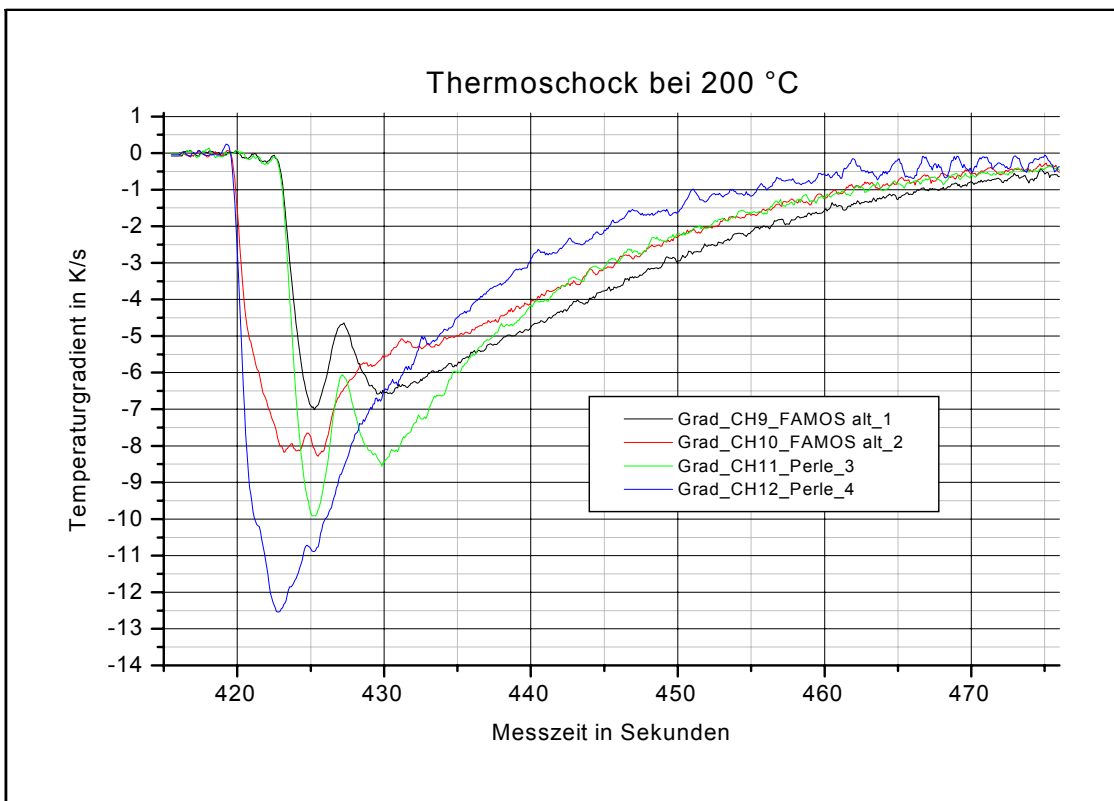
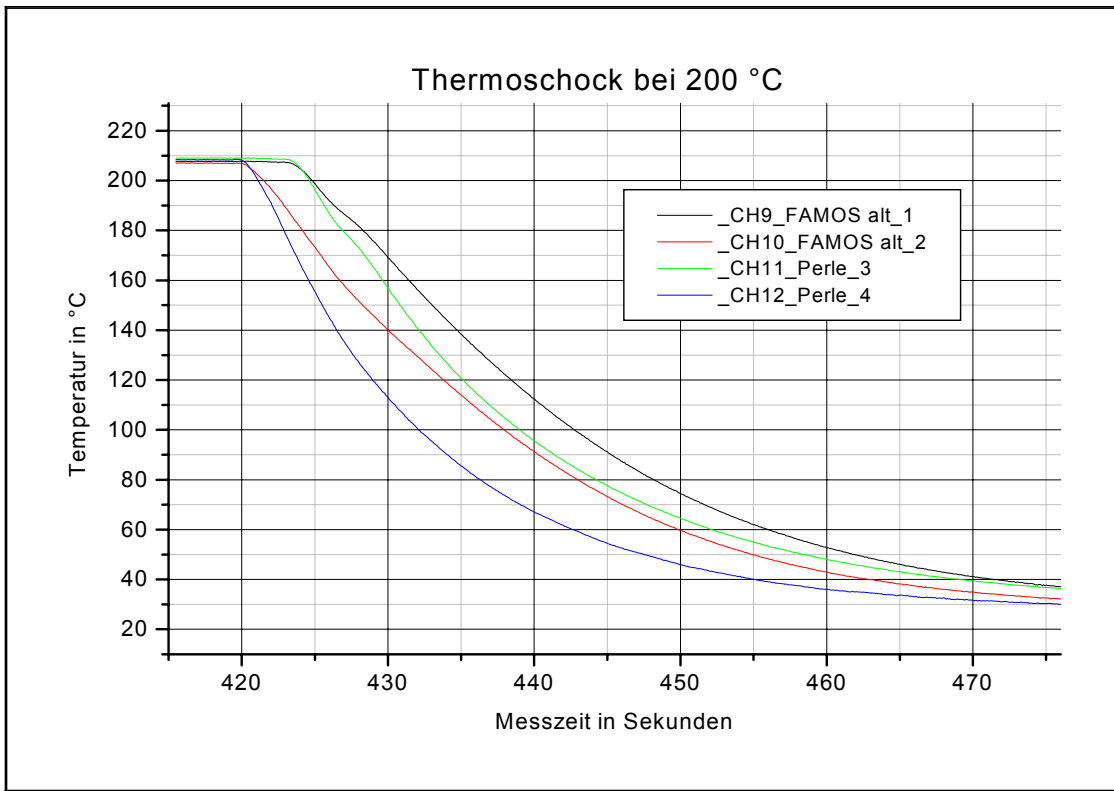


Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 200°C
 Messebene 1 "TÜV Polster"

Auftr.: SB 335/01

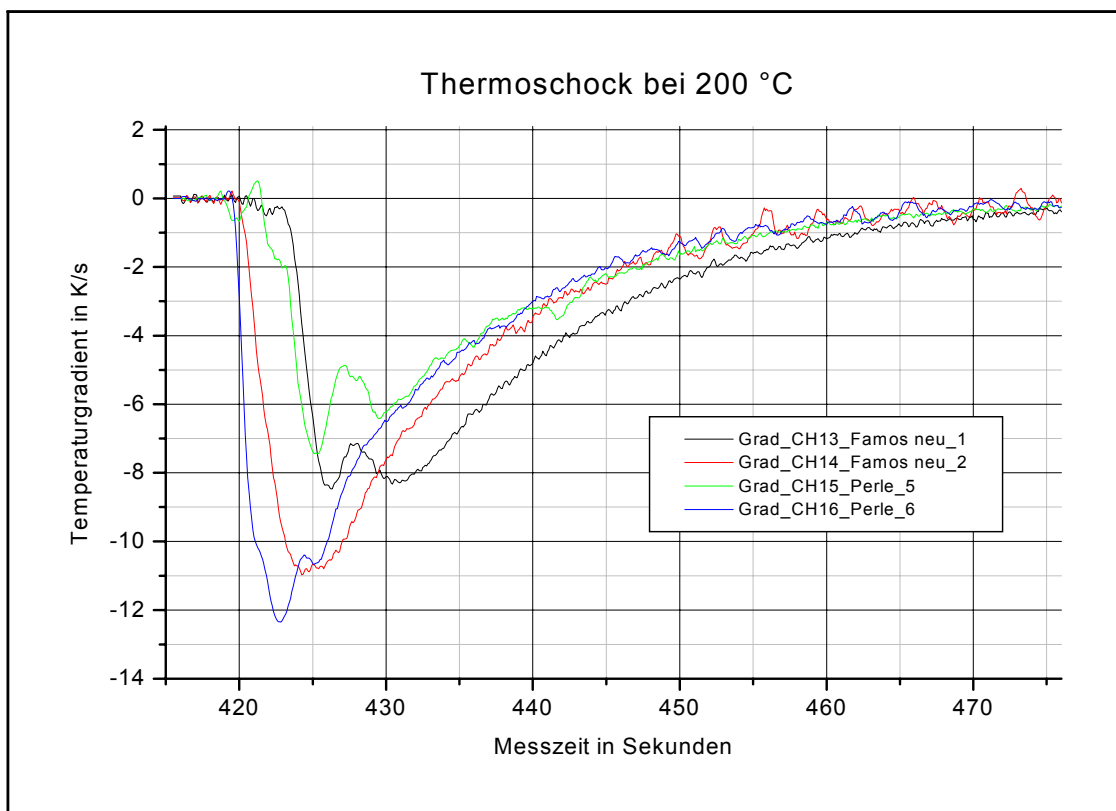
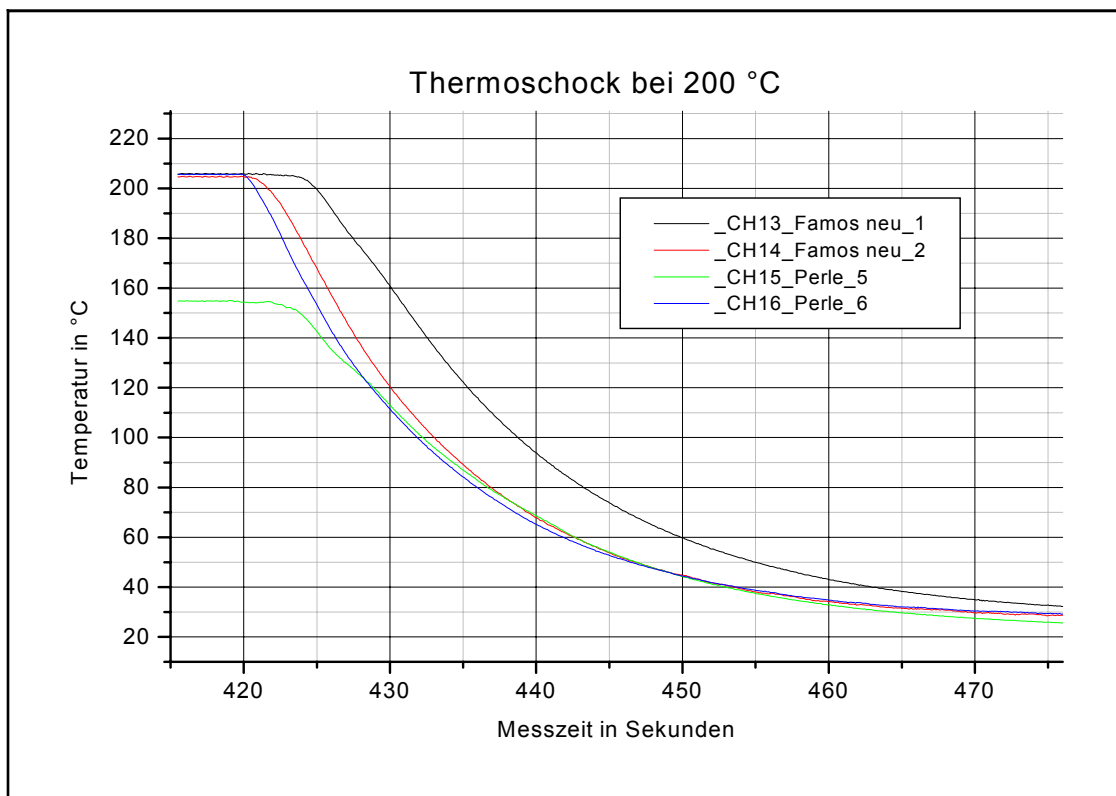
Bild: 3.7.1



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 200°C
Messebene 2 "FAMOS alt"

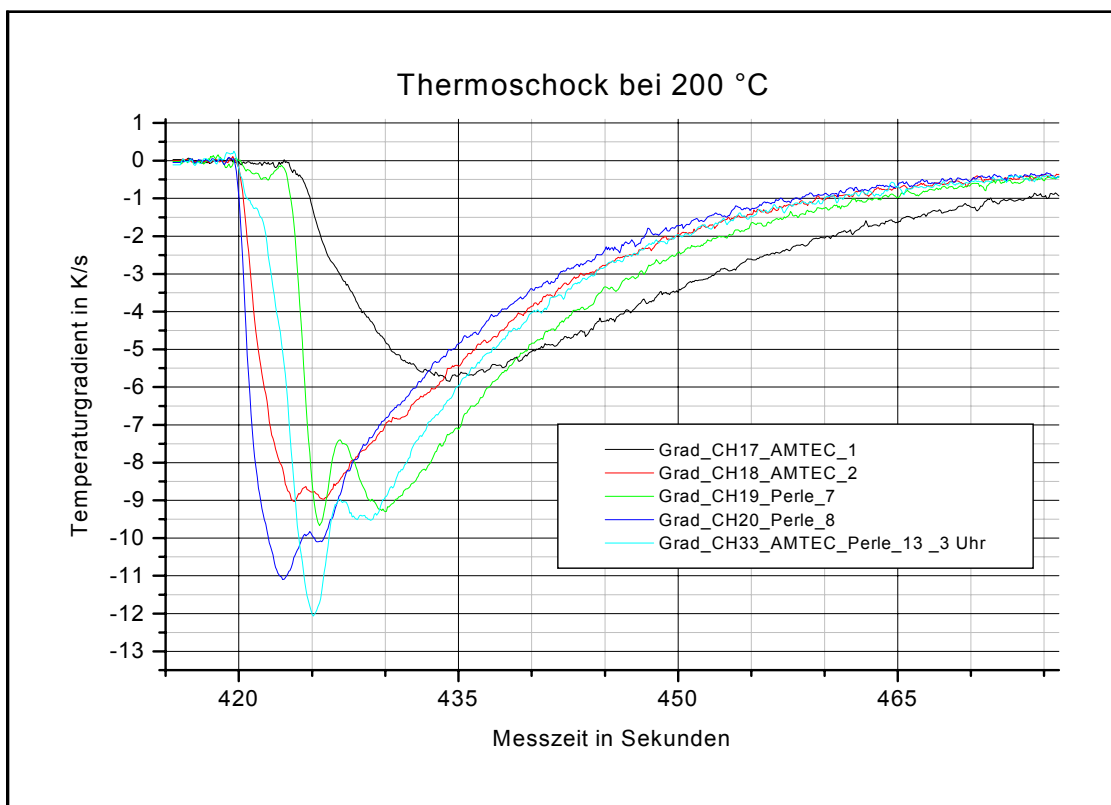
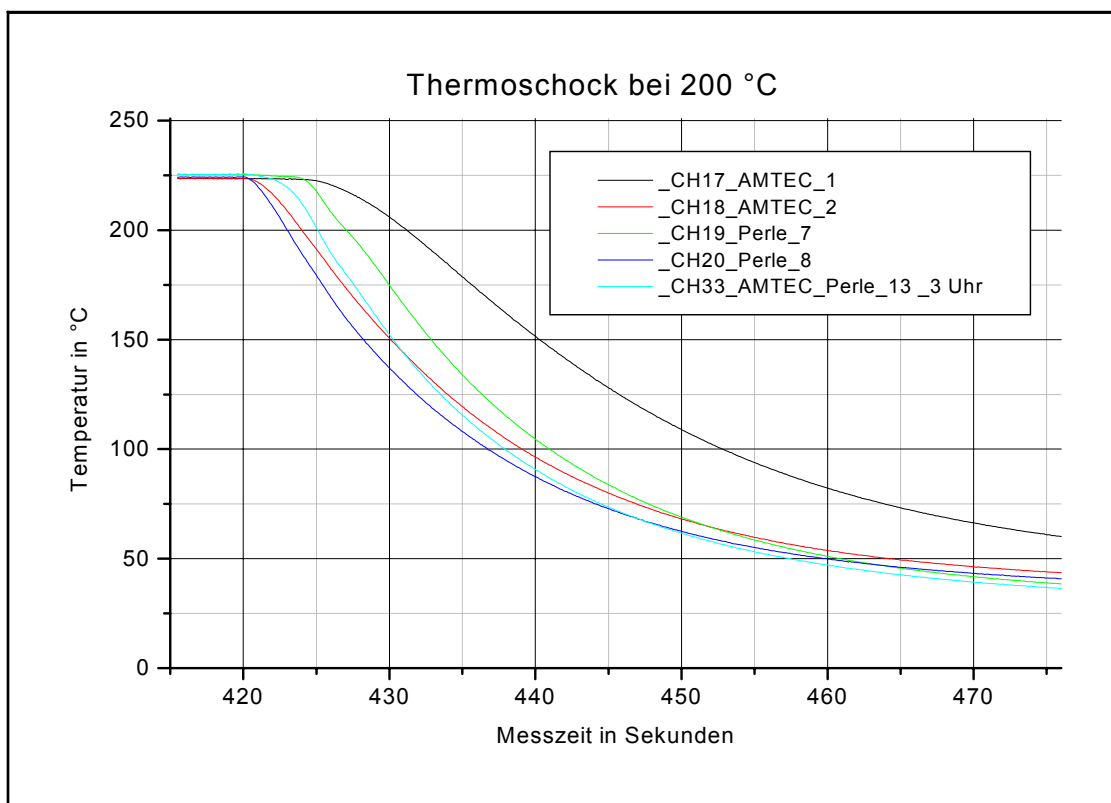
Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.7.2



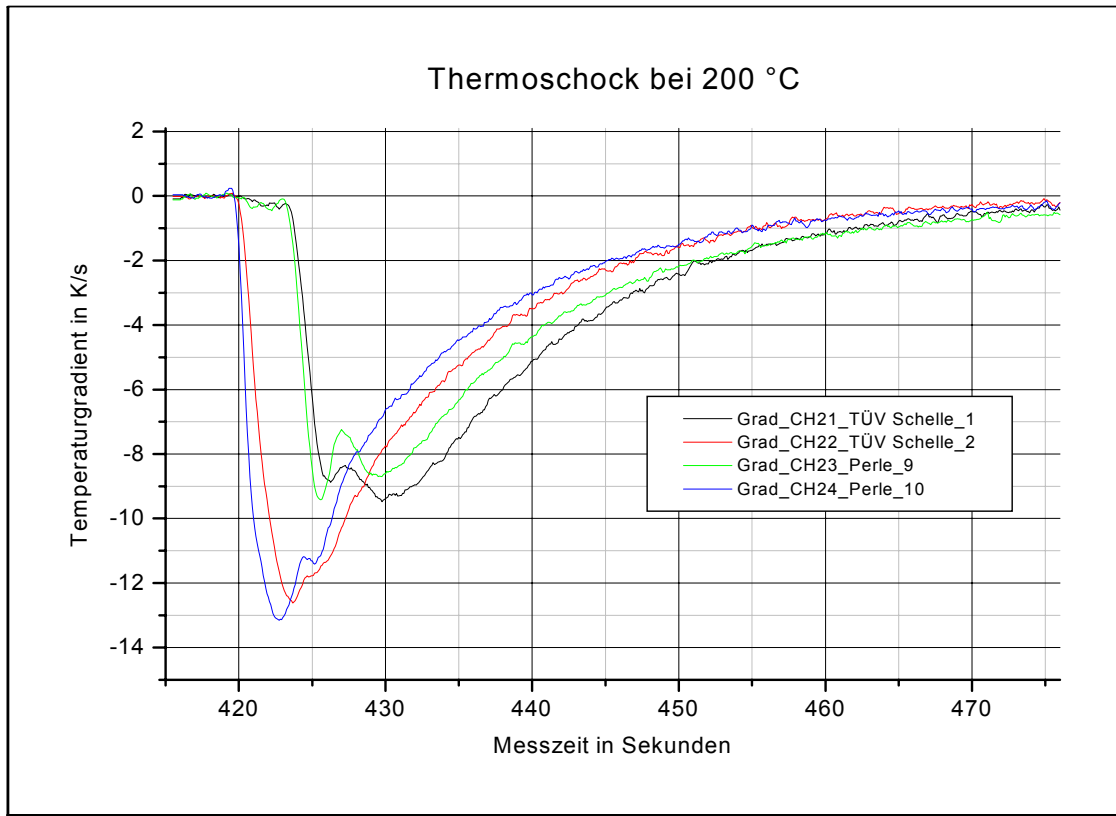
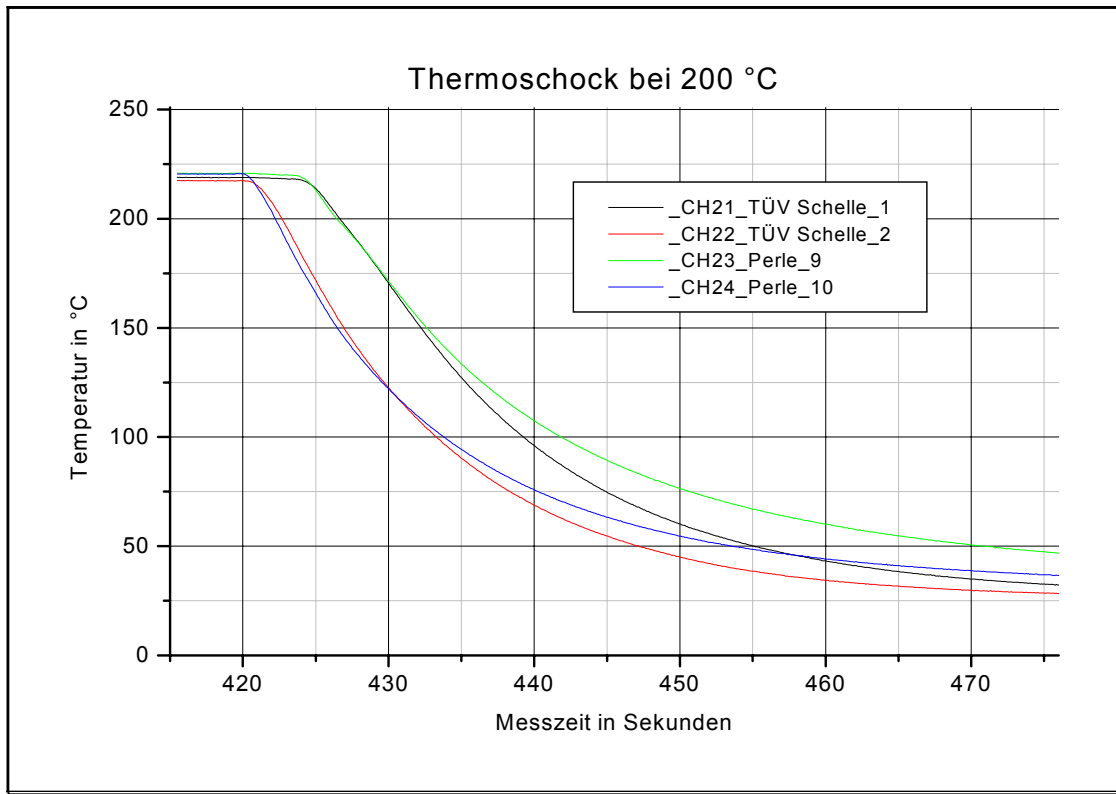
Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock aus 200°C
 Messebene 3 "FAMOS neu"

Auftr.: SB 335/01
 Bild: 3.7.3



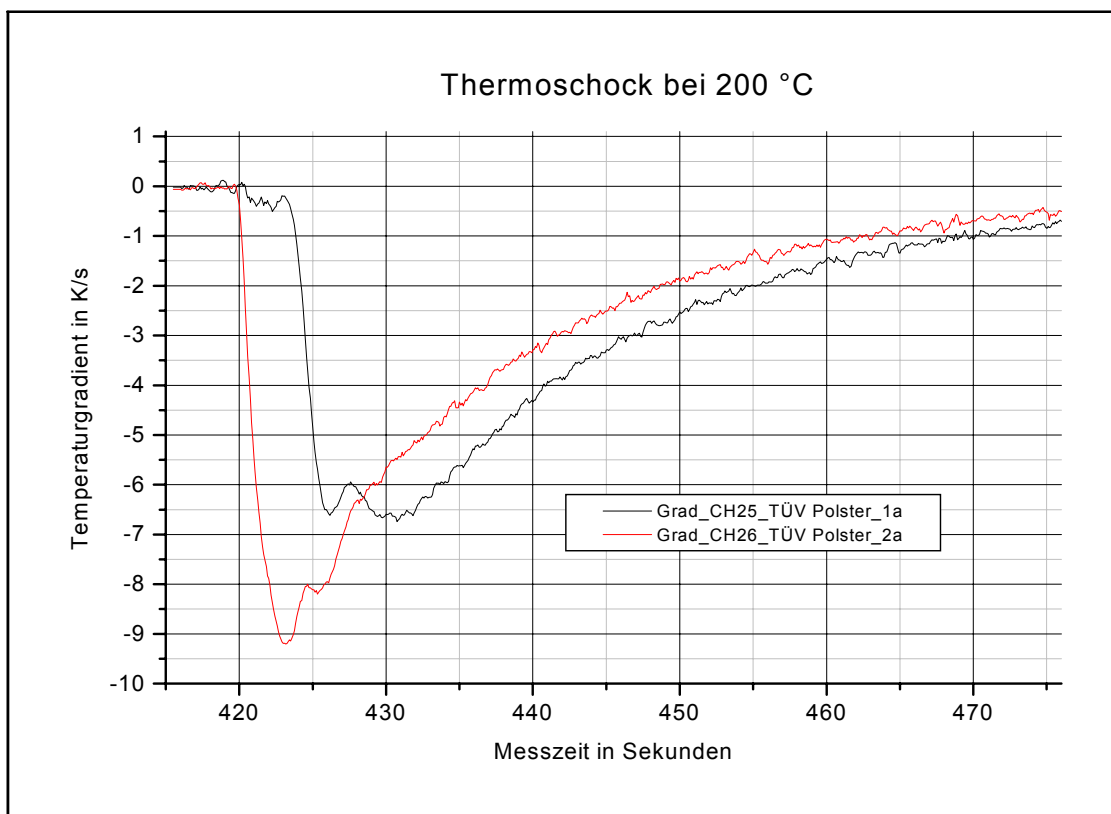
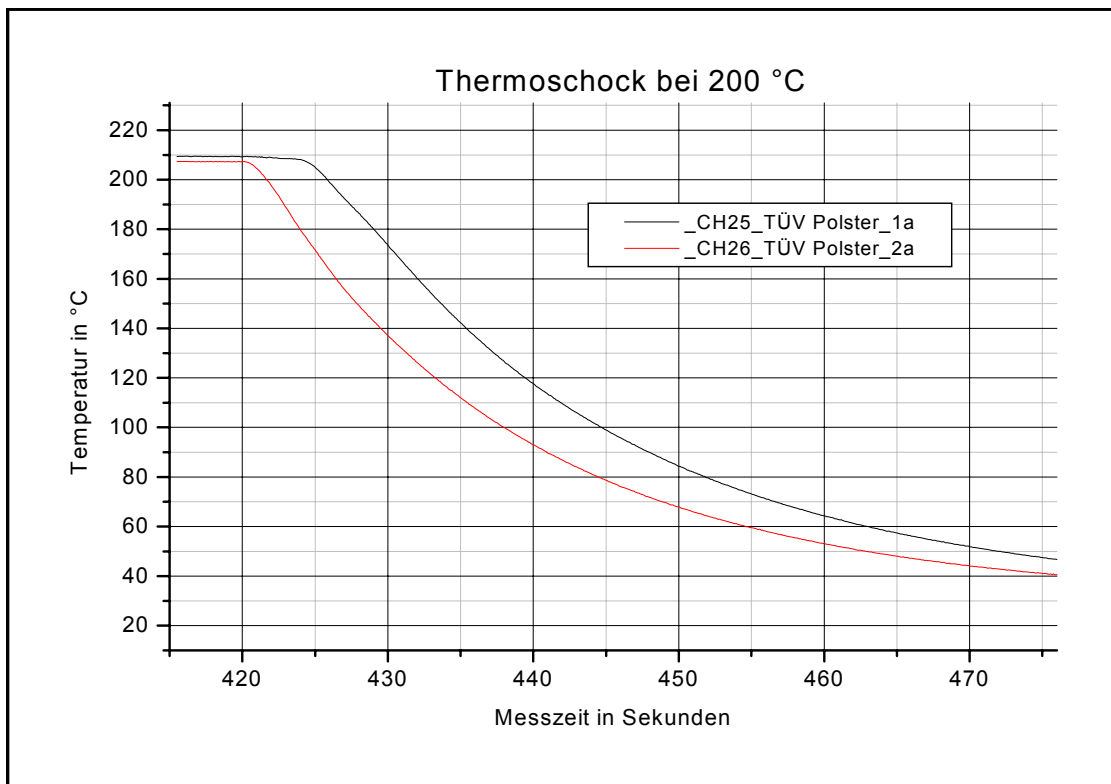
	Abt. : TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock aus 200°C Messebene 4 "AMTEC"	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Bild: 3.7.4
	Datum: 06.03.02		



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 200°C
Messebene 5 "TÜV Schelle"

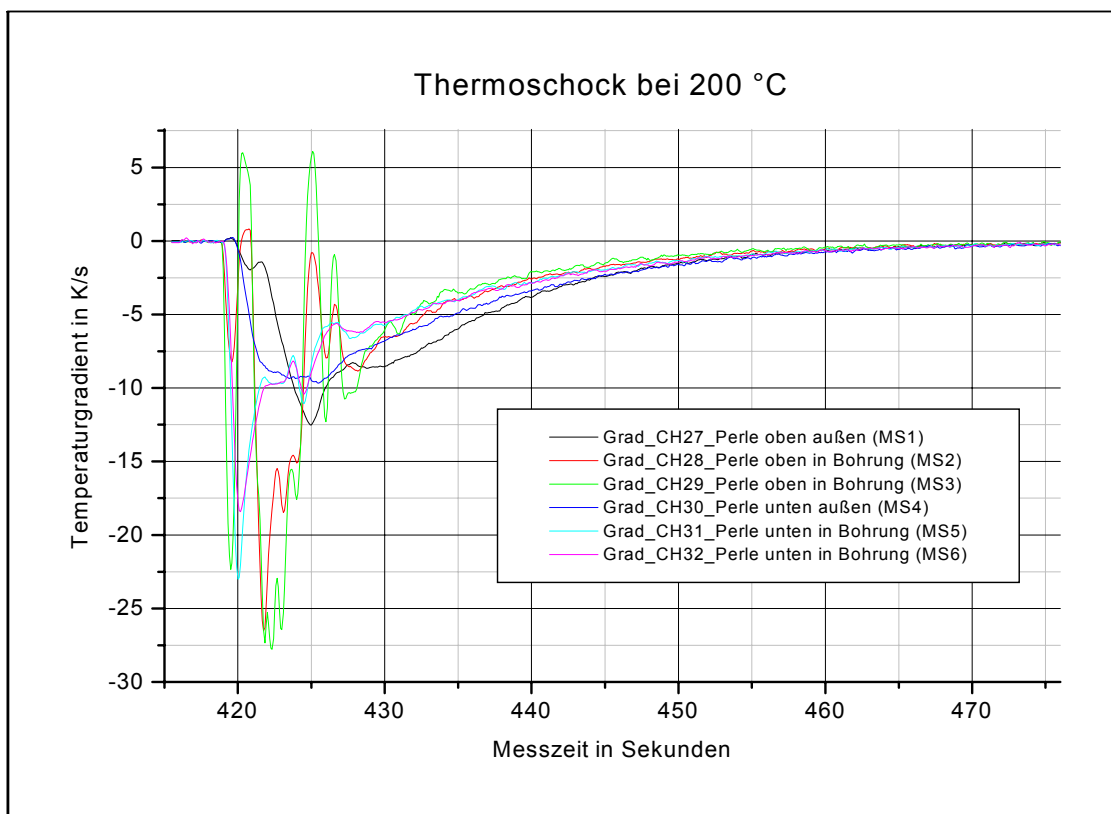
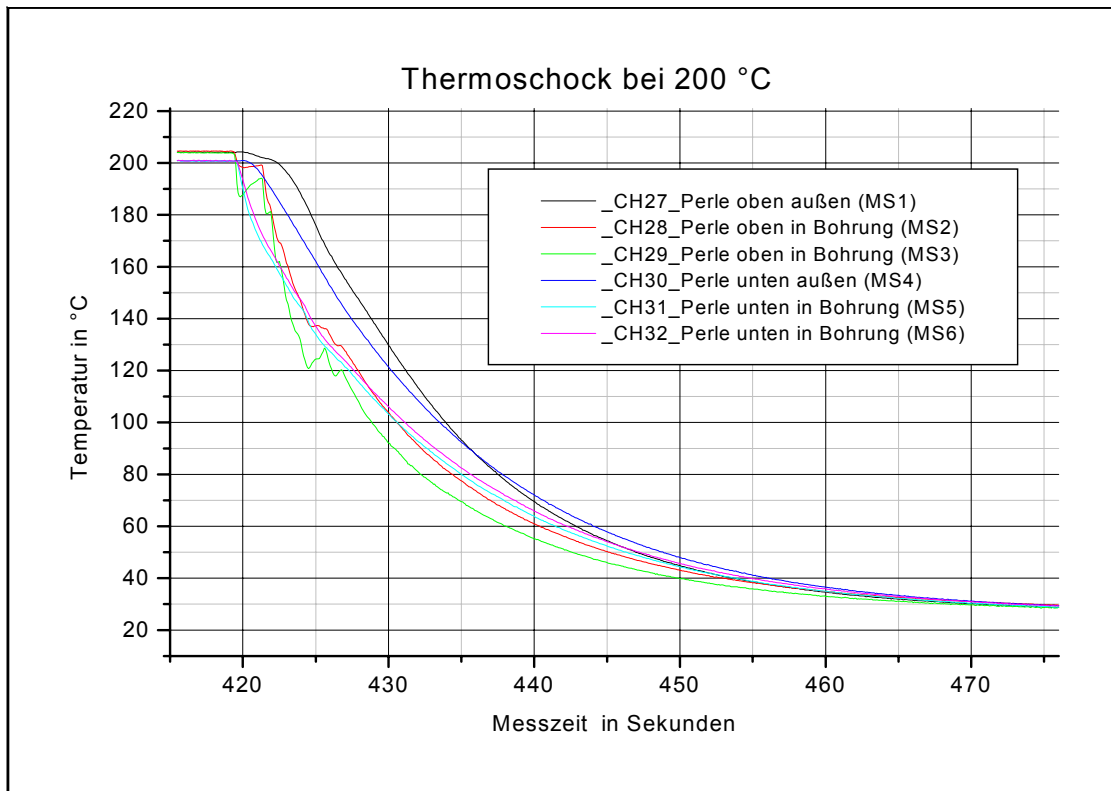
Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.7.5



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 200°C
Messebene 6 "TÜV Polster 2"

Auftr.: SB 335/01
Bild: 3.7.6



Abt. : TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

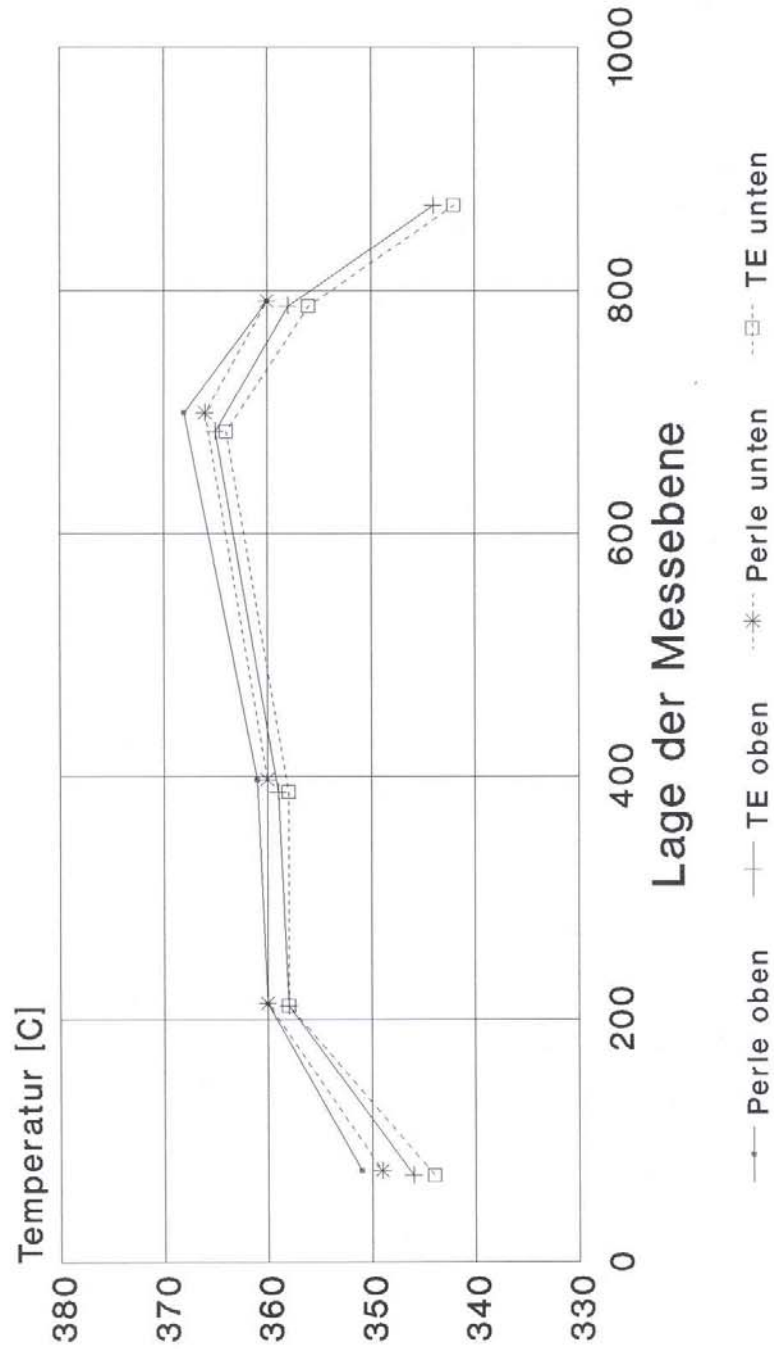
Forschungsvorhaben SR 2392
Thermoschock aus 200°C
Messebene 7 "Siempelkamp"

Auftr.: SB 335/01

Bild: 3.7.7

SR 2392 Temperaturmessung

Ausgangstemperatur 350C

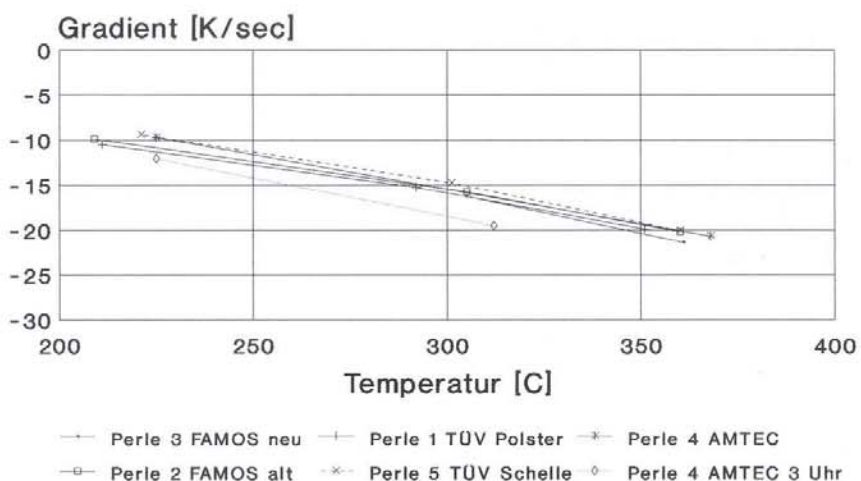


Abt.: TAT 973
 gez.: Hofstötter
 Datum: 06.03.02

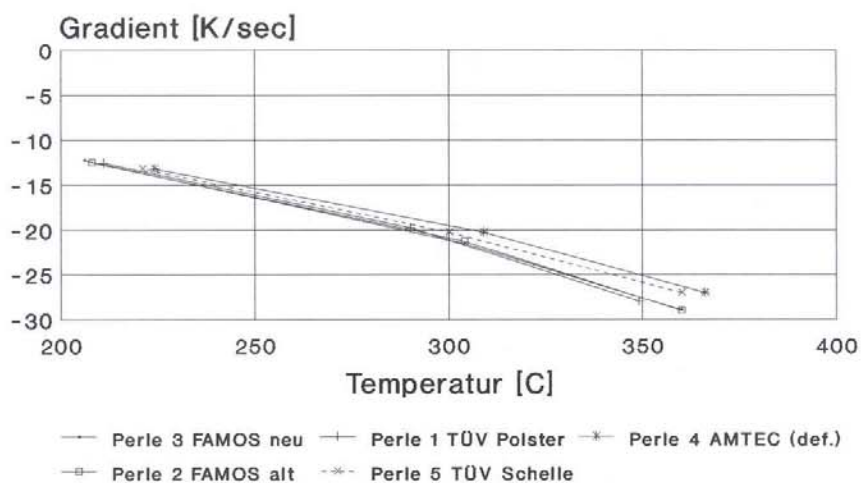
Forschungsvorhaben SR 2392
 Thermoschock-Versuch
 Verteilung der Ausgangstemperatur bei 350°C

Auftr.: SB 335/01
 Bild: 3.8

SR 2392 Temperaturmessung Vergleich Perlen 1-5 oben

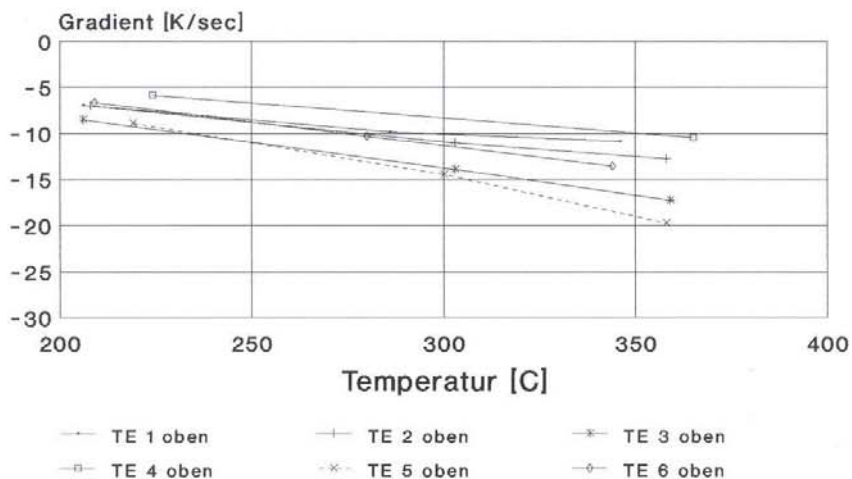


SR 2392 Temperaturmessung Vergleich Perlen 1-5 unten

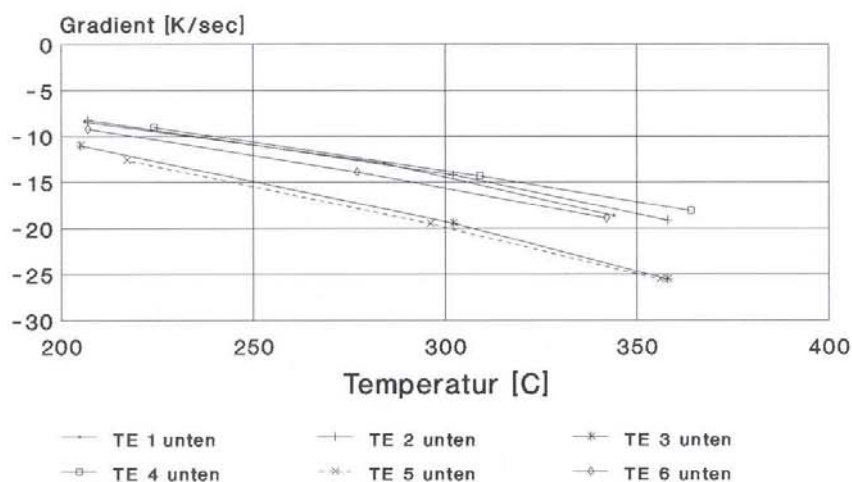


	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter	Thermoschock-Versuch	
	Datum: 06.03.02	Gradienten an den Perlen über der Temperatur	

SR 2392 Temperaturmessung Vergleich TE 1-6 oben

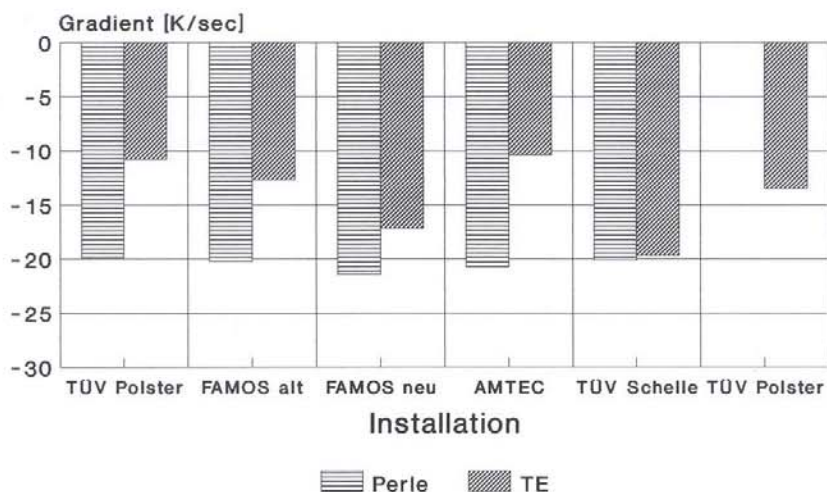


SR 2392 Temperaturmessung Vergleich TE 1-6 unten

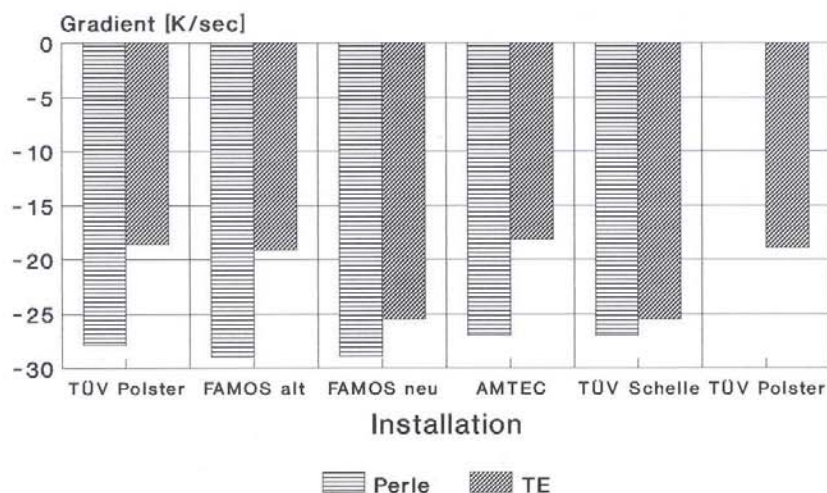


	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter	Thermoschock-Versuch	Bild: 3.10
	Datum: 06.03.02	Gradienten an den Installationen über der Temperatur	

SR 2392 Temperaturmessung Installation oben, Schock 350C

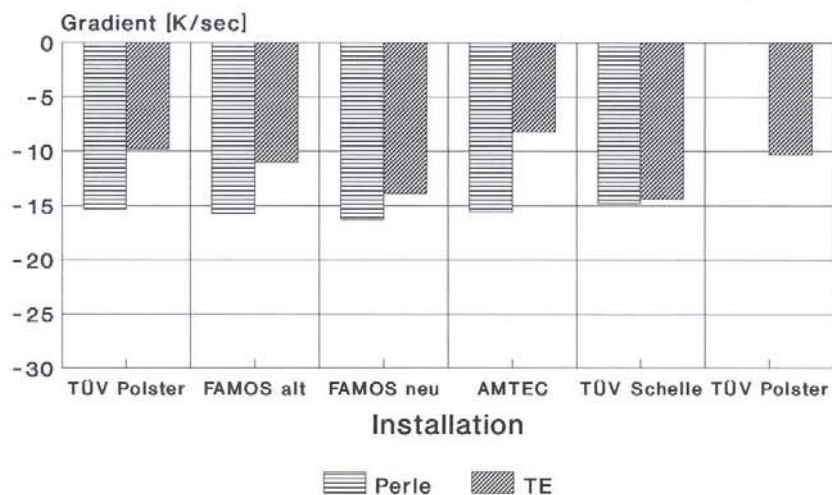


SR 2392 Temperaturmessung Installation unten, Schock 350C

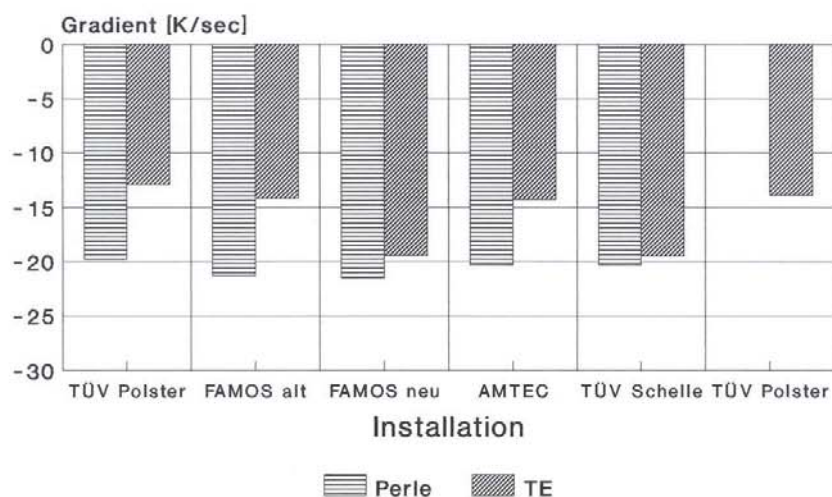


	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter	Thermoschock-Versuch	
	Datum: 06.03.02	Vergleich der Gradienten bei Thermoschock aus 350°C	

SR 2392 Temperaturmessung Installation oben, Schock 280C

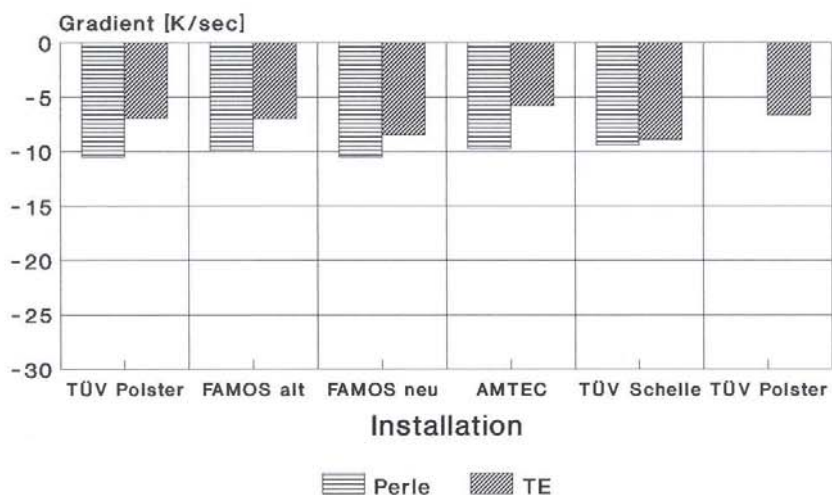


SR 2392 Temperaturmessung Installation unten, Schock 280C

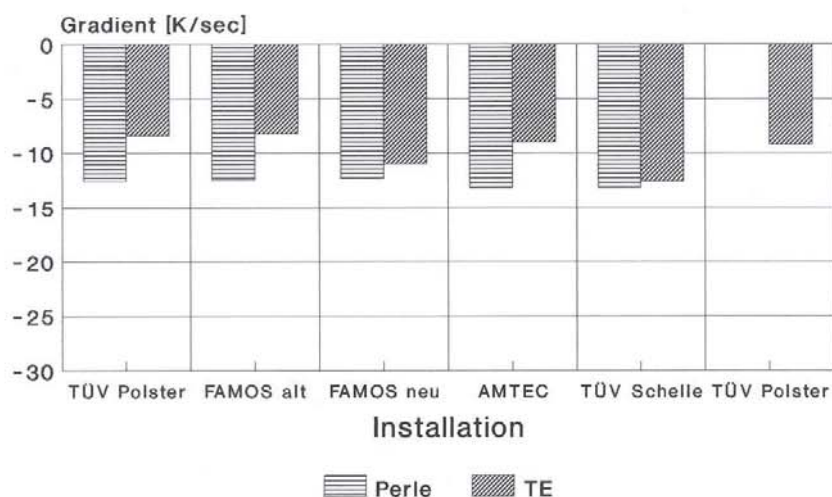


	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392 Thermoschock-Versuch	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter		Vergleich der Gradienten bei Thermoschock aus 280°C
	Datum: 06.03.02		

SR 2392 Temperaturmessung Installation oben, Schock 200C

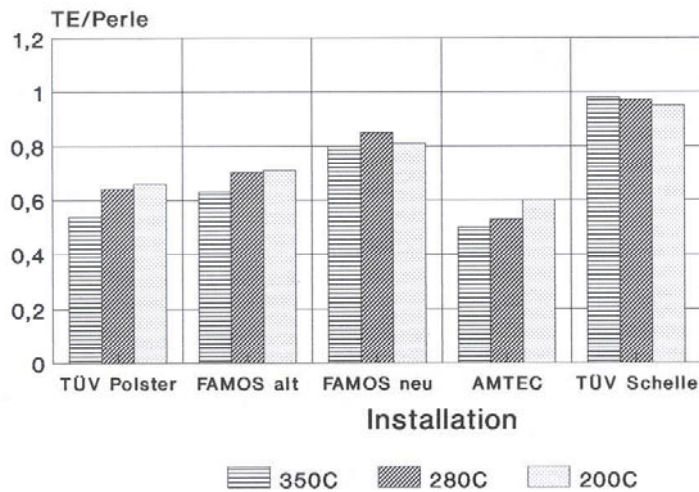


SR 2392 Temperaturmessung Installation unten, Schock 200C

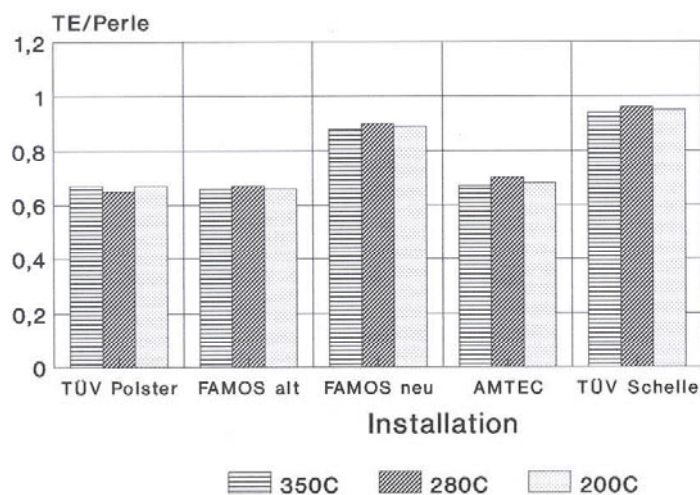


	Abt.: TAT 973	Forschungsvorhaben SR 2392	Auftr.: SB 335/01
	gez.: Hofstötter	Thermoschock-Versuch	
	Datum: 06.03.02	Vergleich der Gradienten bei Thermoschock aus 200°C	

SR 2392 Temperaturmessung TE/Perle Installation oben



SR 2392 Temperaturmessung TE/Perle Installation unten



Abt.: TAT 973

gez.: Hofstötter

Datum: 06.03.02

Forschungsvorhaben SR 2392

Thermoschock-Versuch

Vergleich der Gradienten Installation zu Perle

Auftr.: SB 335/01

Bild: 3.12

3.7 Ergänzungsversuche

3.7.1 Anlass

Die in den Kapiteln 3.1 bis 3.6 zusammengestellten Ergebnisse der Laborversuche zum Vergleich der verschiedenen Installationen zur Temperaturmessungen unter Bezug auf Referenz-Thermoelement-Perlen wurden von SPG rechnerisch nachvollzogen.

Dabei ergab sich sowohl aus Hinweisen aus der Messung als auch aus der Berechnung, dass auch die Referenzperlen noch nicht die wirklichen Gradienten der Rohroberfläche erfassen.

Da bei Siempelkamp aus anderem Anlass nochmals vergleichbare Versuche an demselben Testrohr, auf dem noch die Referenzperlen des ersten Versuches erhalten waren, durchgeführt wurden, wurden neben den unteren Referenzperlen die Gradienten der Rohroberfläche mit speziellen, allerdings nur bis 260°C einsetzbaren Temperatursensoren auf Widerstandsbasis erfasst.

3.7.2 Zusatzinstallationen

Um die Gradienten der Rohroberfläche neben den Thermoperlen besser zu erfassen, wurden Temperatursensoren der Fa. Vishay Measurement Group Inc. angebracht, die aufgrund ihres Messprinzips Vorteile beim Ansprechverhalten erwarten lassen. Sie verändern wie Dehnungsmessstreifen bei sich ändernder Temperatur ihren elektrischen Widerstand und werden wie Dehnungsmessstreifen auf die Bauteiloberfläche aufgeklebt, sind daher aber nach Herstellerangaben nur bis zu einer Temperatur von 260°C einsetzbar.

Die eingesetzten Temperatursensoren WTG-50A mit integrierten Anschlußdrähten haben folgende Abmessungen (Länge x Breite in mm):

Sensor 1,52 x 2,54

Gesamt 3,76 x 2,54

Träger 7,0 x 4,8.

Der Geber ist in **Bild 3.13** neben einer Referenzperle dargestellt.

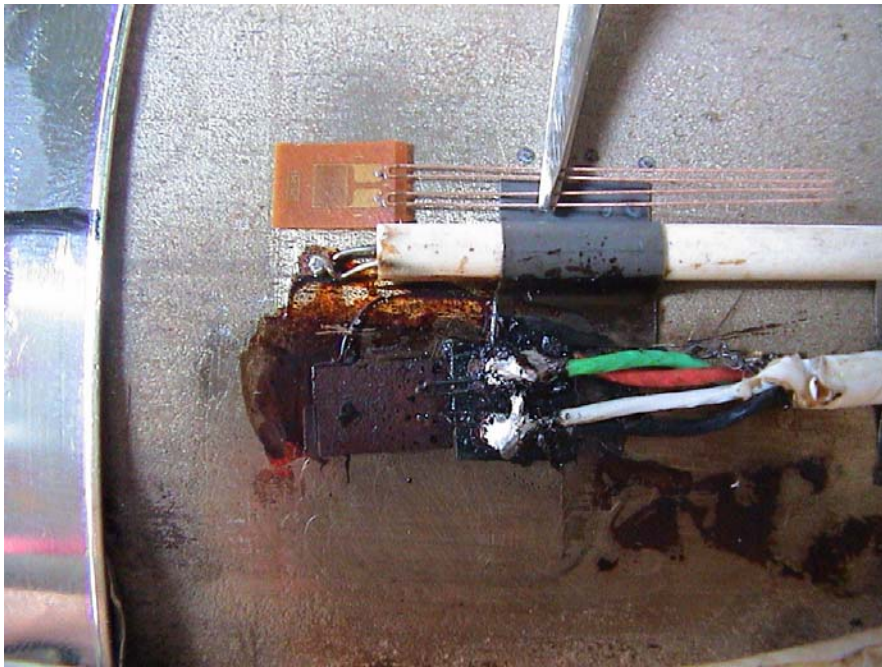


Bild 3.13: Thermoelement-Perle (Mitte) und Widerstandsfolie (unten aufgeklebt und durch Temperatur geschwärzt, oben lose)

3.7.3 Zusatzversuche

Die Versuche wurden, wie bereits beschrieben, durchgeführt mit Erhitzung der Versuchsstrecke auf eine Ausgangstemperatur und Abkühlung mittels kaltem Wasser. In einer ersten Serie wurden Thermoschocks aus 250°C, 200°C und 100°C aufgebracht, in einer zweiten Serie aus 250°C und 200°C.

Die dabei ermittelten maximalen Gradienten sind in **Tabelle 3.8** zusammengestellt.

Messebene:		1	2	3	4	5	mittel
Schock	Installation:	TÜV	FAMOS	FAMOS	AMTEC	TÜV	
		Polster	alt	neu		Schelle	
1. Vergleich Perle/Folie unten aus Zusatz-Versuch 1							
250°C	Perle unten	-16,7	-16,6	-16,7	-16,0	-14,6	-16,1
	Folie unten	-17,5	-19,3	-19,2	defekt	-17,2	-18,3
	Perle/Folie unten	0,95	0,86	0,87		0,85	0,88
200°C	Perle unten	-12,9	-13,2	-13,3	-13,1	-12,2	-12,9
	Folie unten	-13,4	-14,5	-14,7	defekt	-13,7	-14,1
	Perle/Folie unten	0,96	0,91	0,90		0,89	0,92
Mittel	Perle/Folie unten	0,96	0,89	0,89		0,87	0,90
2. Vergleich Perle/Folie unten aus Zusatz-Versuch 2							
250°C	Perle unten	-13,7	-15,7	-15,8	-14,7	-13,6	-14,7
	Folie unten	-16,4	defekt	-18,1	-16,1	-16,0	-16,7
	Perle/Folie unten	0,84		0,87	0,91	0,85	0,87
200°C	Perle unten	-11,9	-14,1	-14,4	-13,5	-12,0	-13,2
	Folie unten	-14,3	defekt	-16,5	-15,3	-14,2	-15,1
	Perle/Folie unten	0,83		0,87	0,88	0,85	0,86
Mittel	Perle/Folie unten	0,83		0,87	0,90	0,85	0,86
3. Mittelwerte Perle/Folie unten aus beiden Zusatzversuchen							
250°C	Perle unten	-15,2	-16,6	-16,3	-14,7	-14,1	-15,4
	Folie unten	-17,0	-19,3	-18,7	-16,1	-16,6	-17,5
	Perle/Folie unten	0,90	0,86	0,87	0,91	0,85	0,88
200°C	Perle unten	-12,4	-13,2	-13,9	-13,5	-12,1	-13,0
	Folie unten	-13,9	-14,5	-15,6	-15,3	-14,0	-11,6
	Perle/Folie unten	0,90	0,91	0,89	0,88	0,87	0,89
Mittel	Perle/Folie unten	0,90	0,89	0,88	0,90	0,86	0,88

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Zusatzversuche

Messebene:		1	2	3	4	5	mittel
Schock	Installation:	TÜV	FAMOS	FAMOS	AMTEC	TÜV	
		Polster	alt	neu		Schelle	
1. Vergleich TE-Installation/Perle unten aus Hauptversuch:							
280°C	TE-Installation	-12,9	-14,2	-19,4	-14,3	-19,5	
	Perle	-19,8	-21,3	-21,5	-20,3	-20,3	-20,6
	TE-Inst./Perle	0,65	0,67	0,90	0,70	0,96	
200°C	TE-Installation	-8,4	-8,2	-11,0	-9,0	-12,6	
	Perle	-12,6	-12,5	-12,3	-13,2	-13,2	-12,8
	TE-Inst./Perle	0,67	0,66	0,89	0,68	0,95	
Mittel	TE-Inst./Perle	0,66	0,66	0,90	0,69	0,96	
2. Vergleich TE-Installation/Berechnung (Rohroberfläche) unten aus Hauptversuch:							
280°C	TE-Installation	-12,9	-14,2	-19,4	-14,3	-19,5	
	Berechnung unten	-22,6	-25,6	-26,5	-24,0	-24,0	-24,5
	TE-Inst./Ber.	0,57	0,55	0,73	0,60	0,81	
200°C	TE-Installation	-8,4	-8,2	-11,0	-9,0	-12,6	
	Berechnung unten	-13,0	-13,6	-13,9	-14,0	-14,0	-13,7
	TE-Inst./Ber.	0,65	0,60	0,79	0,64	0,90	
Mittel	TE-Inst./Ber.	0,61	0,58	0,76	0,62	0,86	
3. Vergleich Perle/Folie unten aus Zusatz-Versuchen (Mittelwert aus 2 Versuchen):							
250°C	Perle unten	-15,2	-16,6	-16,3	-14,7	-14,1	-15,4
	Folie unten	-17,0	-19,3	-18,7	-16,1	-16,6	-17,5
	Perle/Folie unten	0,90	0,86	0,87	0,91	0,85	0,88
200°C	Perle unten	-12,4	-13,2	-13,9	-13,5	-12,1	-13,0
	Folie unten	-13,9	-14,5	-15,6	-15,3	-14,0	-14,6
	Perle/Folie unten	0,90	0,91	0,89	0,88	0,87	0,89
Mittel	Perle/Folie	0,90	0,89	0,88	0,90	0,86	0,88
4. Ermittlung TE zu Folie durch Multiplikation TE/Perle mit Perle/Folie:							
Mittel	Perle/Folie 250+200	0,90	0,89	0,88	0,90	0,86	0,88
Mittel	TE/Perle 280+200	0,66	0,66	0,90	0,69	0,96	
	TE/Folie	0,59	0,59	0,79	0,62	0,82	
5. Vergleich der Mittelwerte aus der Berechnung (Rohroberfläche) mit der Folie:							
Mittel	Berechnung/Folie	0,97	1,02	1,04	1,00	0,96	1,00

Tabelle 3.9: Versuchs- und Berechnungsergebnisse (Gradienten in K/s)

3.7.4 Ergebnisse

In **Tabelle 3.9** sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen in einen Gesamtüberblick aufgenommen. Dabei wurden aus den früheren Versuchen nur die Thermochocks aus 280°C und 200°C, aus den Ergänzungsversuchen die Thermochocks aus 250°C und 200°C übernommen. Die letzteren Ergebnisse wurden aus den je zwei Versuchen bei gleicher Temperatur gemittelt.

Die Tabelle zeigt damit unter

1. den Vergleich der mit den Installationen und den zugehörigen Referenzperlen beim Hauptversuch SR 2392 für Schocks aus 280°C und 200°C (ohne 350°C) ermittelten Gradienten sowie die jeweiligen Verhältnisse

TE-Installation/TE Perle

2. den Vergleich Gradient der TE-Installation zum für die Oberfläche berechneten Wert, ebenfalls für 280°C und 200°C sowie die Verhältnisse

TE-Installation/Berechnung

3. den Vergleich der mit den Referenzperlen und den Folien bei den Zusatzversuchen gemessenen Gradienten aus 250°C und 200°C und die Verhältnisse

Perle/Folie

4. den aus den Mittelwerten (Mittel 1 x Mittel 3) errechneten Vergleich

TE-Installation/Folie

und schließlich

5. den Vergleich der Mittelwerte aus der Berechnung mit denen der Folie (Mittel 4/Mittel 2) als Verhältnis

Berechnung/Folie.

3.7.5 Bewertung

Die für die untersuchten fünf Installationsarten ermittelten Verhältnisse sind in **Tabelle 3.10** entsprechend Tabelle 7 aus Kapitel 3.6 ergänzt. Angegeben ist das Verhältnis der Gradienten der einzelnen Installationen zu dem der entsprechenden Referenzperlen, zur Berechnung für die Rohroberfläche und zur Folie.

Damit zeigen die Installation „TÜV Schelle“ 82%, die Installation „FAMOS neu“ 79% und die Installationen „FAMOS alt“, „AMTEC“ und „TÜV-Polster“ 59 bis 62% der mit der Folie gemessenen Gradienten.

Die Referenzperlen zeigen im Mittel 88% der Folie.

Die für die Rohroberfläche errechneten Gradienten entsprechen gemäß Tabelle 3.9 im Mittel exakt den mit den Folien gemessenen Werten.

Zur Überprüfung des Gültigkeitsbereiches dieser Verhältnisse wurden in **Bild 3.14** die Verhältnisse Gradient TE-Installation zu Gradient Referenzperle über den Gradienten der TE-Installation aufgetragen und um den Wert Gradient Perle zu Gradient Folie über dem Gradienten Perle ergänzt.

Die Darstellung zeigt, dass die Verhältnisse im Rahmen einer versuchstechnischen Streuung unabhängig von den Gradienten (bzw. der entsprechenden Ausgangstemperatur) sind. Die ermittelten Verhältniszahlen gelten damit auch für geringere Gradienten und nicht nur für die hier bei den Versuchen bewußt sehr hoch gewählten, solange es sich um Thermoschocks mit hohen Wärmeübergangszahlen in Rohrleitungen der untersuchten Wanddicke handelt.





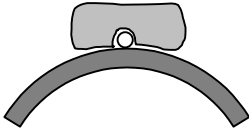
Installation	Skizze	Gradient Installation unten zu		
		Perle	Berechnung	Folie
TÜV Schelle		96%	86%	82%
FAMOS neu		90%	76%	79%
FAMOS alt		66%	58%	59%
TÜV Polster		66%	61%	59%
AMTEC		69%	62%	62%

Tabelle 3.10: Vergleich der Gradienten Installation unten (aus den Versuchen aus 280°C und 200°C - ohne 350°C) zu Referenzperle, zu Berechnung und zu Temperaturmessfolie

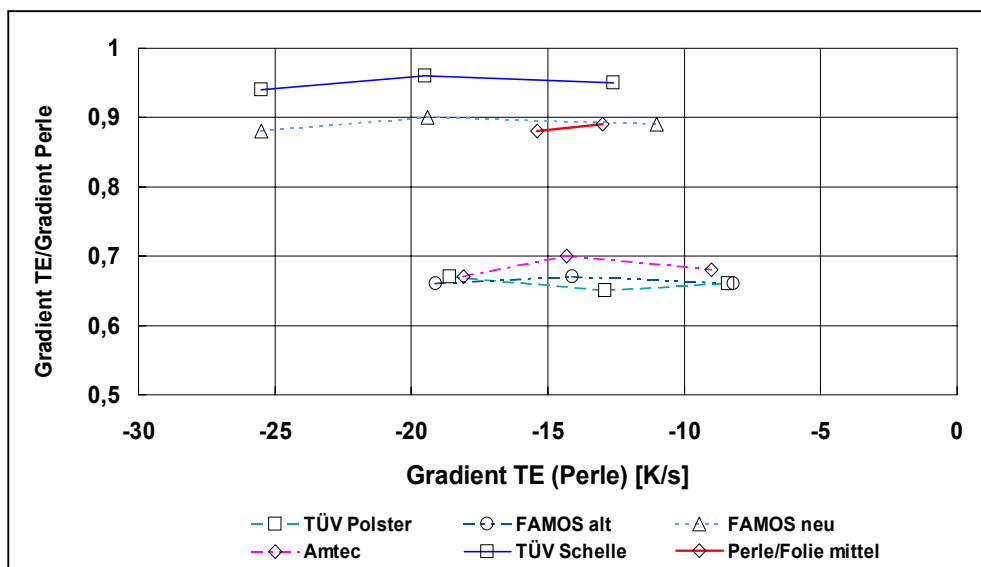


Bild 3.14: Verhältnis der Gradienten Thermoelement-Installation zu Referenzperle über den Gradienten der TE-Installation

3.7.6 Zusammenfassung

Aufgrund der Nachrechnung der in den Kapiteln 3.1 bis 3.6 beschriebenen Versuche zum Vergleich des Ansprechverhaltens der verschiedenen Installationen sowie einzelner Versuchsergebnisse ergaben sich Hinweise darauf, dass die verwendeten Referenzperlen die Gradienten der Rohroberfläche nicht voll erfassen. Die Nachmessung mit Temperaturmessfolien der Fa. Vishay, die allerdings nur bis 260°C eingesetzt werden können, neben den Referenzperlen bestätigte die errechneten Gradienten.

Die sich daraus ergebenden Korrekturfaktoren für Thermoschocks mit hohen Wärmeübergangszahlen in Rohrleitungen der untersuchten Wanddicke sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

4. Berechnungen

4.1 FEM-Modellierung der Installationen

Mit Hilfe des Programmsystems ANSYS wurden für alle 5 Installationen FEM-Berechnungsmodelle erstellt, die sowohl eine Nachrechnung der Versuche (siehe Arbeitspaket 3) als auch eine Auswertung von Kraftwerks-Messdaten ermöglichen. Dazu wurden jeweils die Rohrwand, das darauf befestigte Thermoelement mit den dazugehörigen Schellen, Spannbändern und Isolierkissen (soweit zutreffend) sowie die Rohr-Isolierung aus Mineralwolle als zweidimensionales Modell erstellt. Zwischen diesen Bestandteilen der Installation wurden jeweils Luftspalte eingeführt, deren Breite als Parameter zur Anpassung des thermischen Verhaltens an die Messungen diente. Der innere Aufbau der Mantel-Thermoelemente aus Mantel, MgO-Isolation und der eigentlichen Thermoperle wurde ebenfalls erfasst. Die Anzahl der am Umfang in einer Messebene angebrachten Thermoelemente konnte mit diesen FEM-Modellen jeweils an die Gegebenheiten angepasst werden. Aus Symmetriegründen wird (auch bei Temperaturschichtung) nur ein halbes Modell benötigt. Das folgende **Bild 4.1** zeigt als Beispiel die Gesamtansicht eines solchen Rohrmodells mit einer Mess-Installation aus 7 Thermoelementen am halben Umfang.

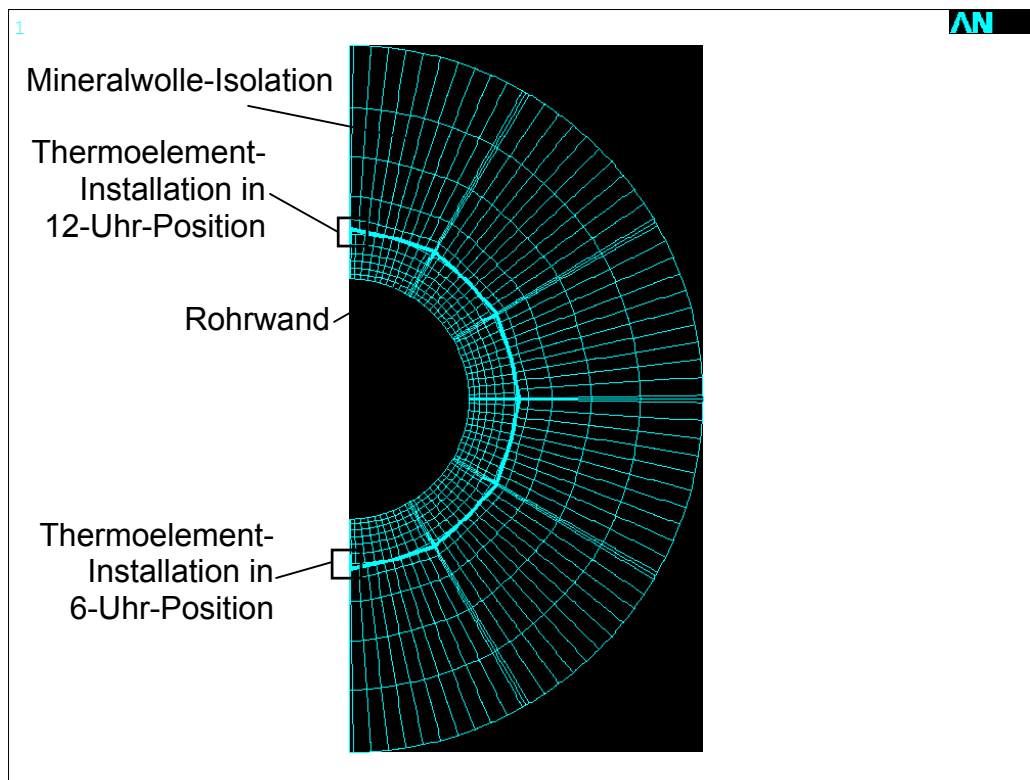


Bild 4.1: Gesamtansicht eines Rohrmodells mit 7 Thermoelementen am halben Umfang

Abbildungen der Installationen befinden sich in den Anlagen 2.1 bis 2.5.

Von entscheidender Bedeutung für den Außenwand-Temperaturverlauf bei schnellen Temperatur-Änderungen ist die Rohrwanddicke im Bereich der Installation. Auf der Grundlage der Ultraschall-Wanddickenmessungen wurden für die Modellierung des Versuchsrohrs angesetzt:

Umfangsposition	Installation	TÜV Polster ¹	FAMOS alt	FAMOS neu	AMTEC	TÜV Schelle
12 Uhr	Wanddicke lt. US-Messung	8,0 mm	8,1 mm	8,1 mm	8,1 mm	8,0 mm
	Wanddicke im Berechnungsmodell	8,0 mm	8,1 mm	8,1 mm	8,1 mm	8,0 mm
6 Uhr	Wanddicke lt. US-Messung	7,3 mm	7,2 mm	7,1 mm	7,2 mm	7,3 mm
	Wanddicke im Berechnungsmodell	7,3 mm	7,2 mm	7,0 mm	7,2 mm	7,4 mm

Bei den Installationen „FAMOS neu“ und „TÜV Schelle“ musste jeweils die Wanddicke in der 6-Uhr-Position korrigiert werden, um eine befriedigende Genauigkeit bei der Nachrechnung der Messwerte zu erzielen. Die Korrekturen lagen im Bereich der zu erwartenden Messfehler der US-Wanddickenmessung.

Im Folgenden werden die Besonderheiten der Modelle der einzelnen Installationen näher beschrieben.

4.1.1 FAMOS alt

Da sich bei der Installation „FAMOS alt“ über der eigentlichen Thermoelement-Spannband-Anordnung noch eine massive Schutzschelle befindet, entsteht zwischen dieser und dem Spannband ein abgeschlossener Luftspalt, der (sowohl im Versuch als auch im Kraftwerk) nicht durch Isolationsmaterial (Mineralwolle) ausgefüllt wird. Daraus resultiert eine Verstärkung der Isolationswirkung, was im Modell mit hinreichender Genauigkeit durch einen das Spannband umhüllenden nach außen hin adiabaten Luftspalt berücksichtigt wird. Gesonderte Elemente für die Mineralwolle-Isolation erübrigen sich damit (**Bild 4.2**). Weiterhin wird das Mantel-

¹ Es wurde nur die erste Installation in Durchflussrichtung betrachtet, da an der letzten Installation in Durchflussrichtung keine Referenzperle angebracht war.

Thermoelement durch die Anpresskraft des Spannbandes etwas abgeflacht, was den Wärmeübergang zum Rohr verbessert. Dieser Effekt wird im Berechnungsmodell durch eine Verbreiterung der ursprünglich nur punkt- bzw. linienförmigen Auflagefläche des Thermoelement-Mantels erfasst. Das Modell (12-Uhr-Position) ist im Bild 4.2 dargestellt.

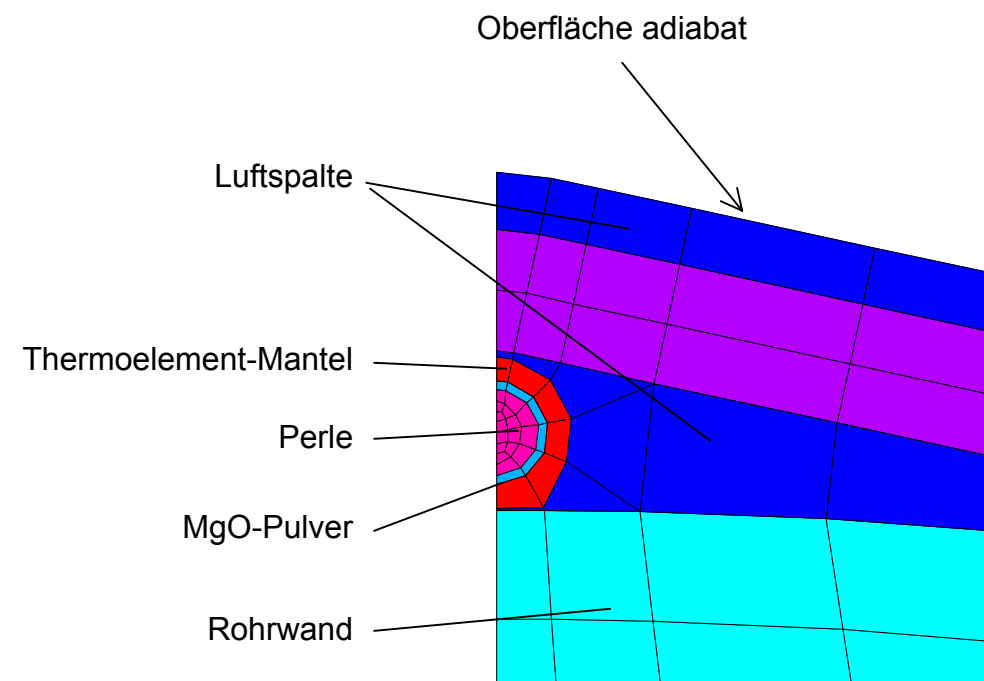


Bild 4.2: Detailansicht Berechnungsmodell „FAMOS alt“

4.1.2 FAMOS neu

Auch über der Installation „FAMOS neu“ befindet sich eine massive Schutzschelle. Daher bildet auch in diesem Fall ein nach außen hin adiabater Luftspalt die äußere Begrenzung des Modells (**Bild 4.3**).

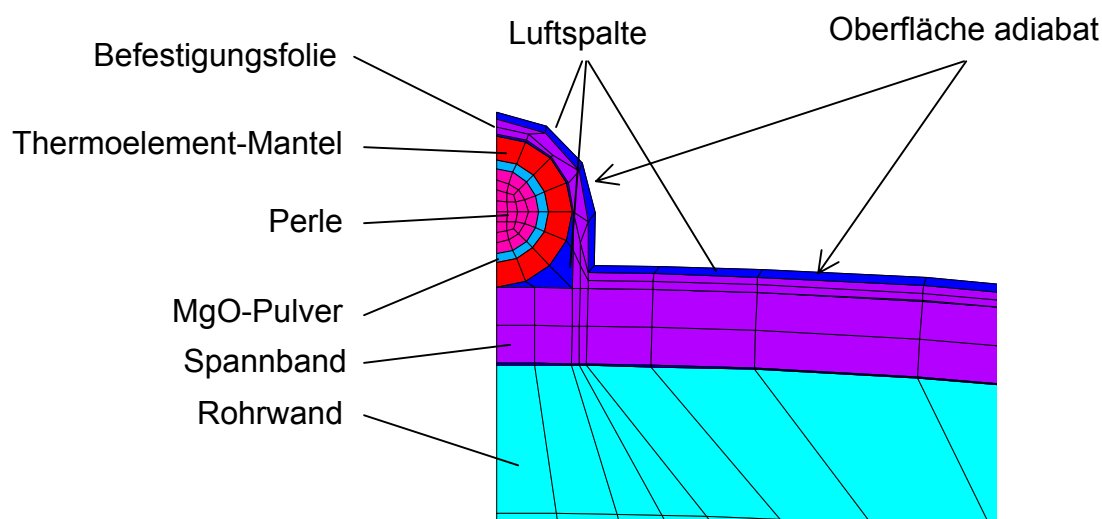


Bild 4.3: Detailansicht Berechnungsmodell FAMOS neu

4.1.3 AMTEC

Die Besonderheit der AMTEC-Installation besteht in dem relativ großen Isolationskissen, das mit 2 Spannbändern befestigt wird und unter dem die Fühlerspitze des Mantel-Thermoelementes klemmt². Auf Grund der Dicke des Isolationskissens kann man die Beeinflussung des Thermoelementes durch das Spannbänder vernachlässigen. Daher umfasst das Berechnungsmodell auch kein Spannbänder (**Bild 4.4**). Außerhalb des Kissens befindet sich die Mineralwolle-Isolation.

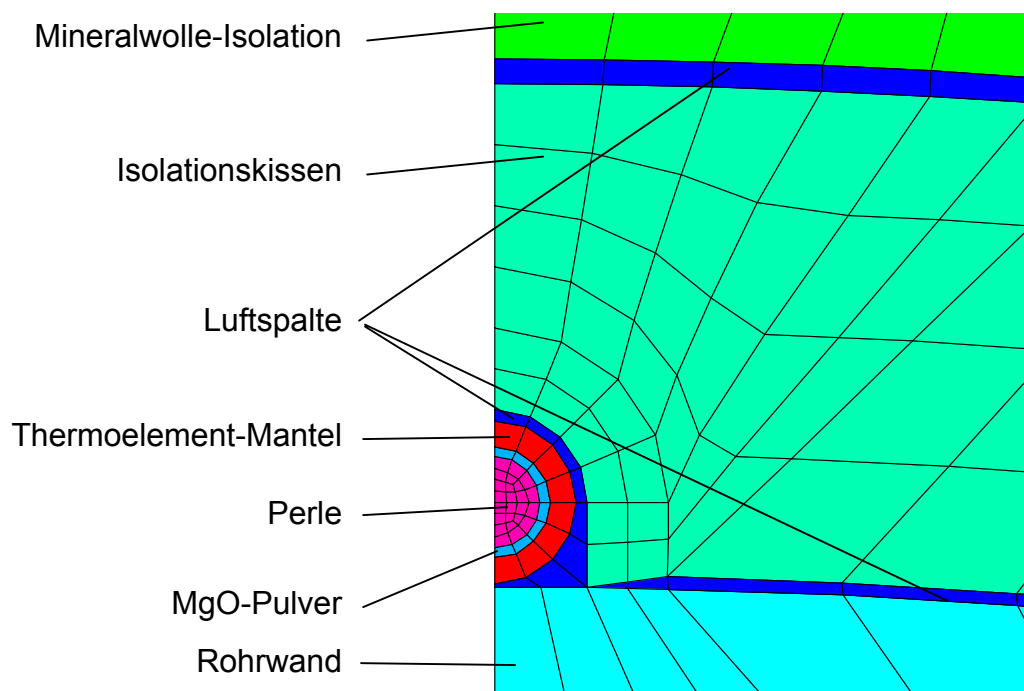


Bild 4.4: Detailansicht Berechnungsmodell AMTEC

² Von den beiden Messstellen der AMTEC-Messebene lieferte nur die in der 6-Uhr-Position befindliche gültige Werte. Der in 12-Uhr-Position befindliche Messfühler war nicht korrekt angebracht (mangelhaftes Anliegen der Fühlerspitze des Thermoelementes an der Rohroberfläche), so dass die damit erfassten Messergebnisse im Rahmen dieses Projektes nicht weiter ausgewertet werden.

4.1.4 TÜV Schelle

Bei der Installation „TÜV Schelle“ wird das Thermoelement mit Hilfe einer kleinen direkt auf die Rohroberfläche aufgepunkteten Schelle befestigt (**Bild 4.5**). Diese Installation kommt also im Bereich des Messfühlers ohne Spannband aus. Außerhalb der Schelle befindet sich unmittelbar die Mineralwolle-Isolation.

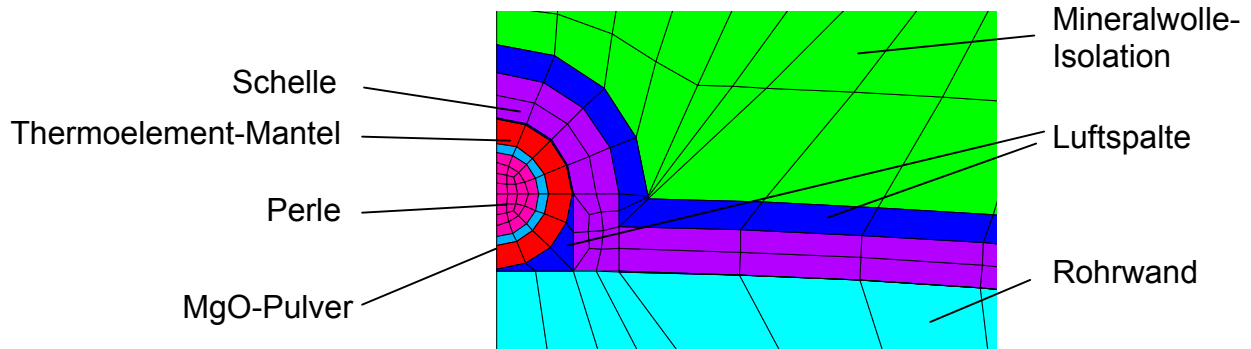


Bild 4.5: Detailansicht Berechnungsmodell TÜV Schelle

4.1.5 TÜV Polster

Die Installation „TÜV Polster“ verwendet ein Spannband, unter das die Thermoelementspitze geklemmt wird. Zwischen Spannband und Mantel-Thermoelement befindet sich dabei ein Glasfaserpolster.

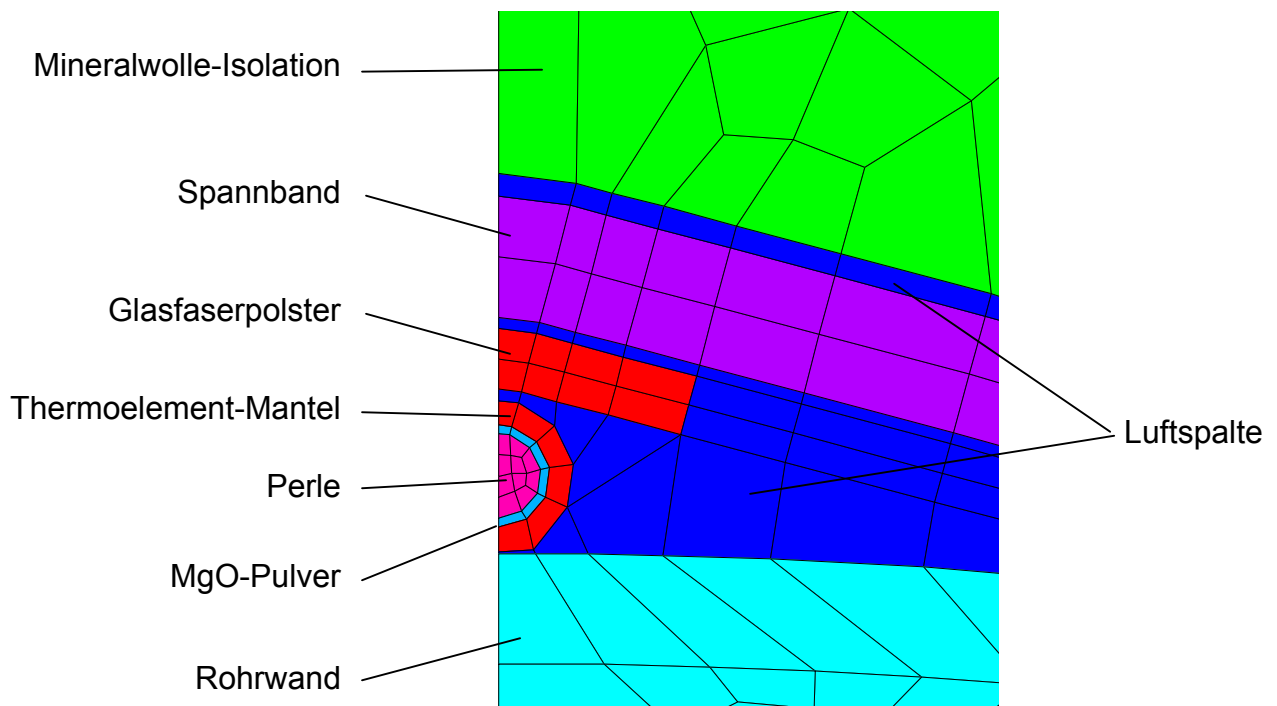


Bild 4.6: Detailansicht Berechnungsmodell TÜV Polster

Die Anpresskraft des Spannbandes bewirkt eine Abflachung des Thermoelementes, was den Wärmeübergang zum Rohr hin verbessert. Dieser Effekt wird im Be-

rechnungsmodell durch eine Verbreiterung der ursprünglich nur punkt- bzw. linienförmigen Auflagefläche des Thermoelement-Mantels erfasst (vgl. auch Abschnitt 4.1.1). Das Modell der Installation ist im **Bild 4.6** dargestellt.

4.1.6 Referenzperlen

Für die Laborversuche wurde als Referenzmessstelle zur Erfassung der „wahren Außenwandtemperatur des Rohres“ neben jeder Installation eine Ni-Cr/Ni-Thermoelement-Perle aus 0,35 mm dickem Thermodraht direkt auf der Rohrwand durch Punktschweißung angebracht (vgl. auch Abschnitt 3). Die Thermodrähte dieser Perlen wurden in Keramikröhrchen isoliert. Bei der Montage wurden die Keramik-Röhrchen so weit an die bereits angeschweißte Perle herangeschoben, dass ca. 2-3 mm dieser Drähte frei lagen (**Bild 4.7**).



Bild 4.7: Foto einer Referenzperle mit Keramikröhrchen

Je nach Zugkraft im Draht während der Montage ergaben sich so unterschiedliche Andruckverhältnisse der Thermodrähte in den Röhrchen (Ort des „ersten Anliegens im Röhrchen“, Anpresskraft). Dadurch wirkte sich die „thermische Trägheit“ der Keramikröhrchen in unterschiedlicher Weise auf die einzelnen Referenzperlen-Signale aus, so dass auch die Referenzperlen-Temperatur Abweichungen von der „wahren Außenwandtemperatur des Rohres“ zeigte. Da die Versuche mit einheitlichen thermischen Randbedingungen für alle Installationen und Referenzperlen nachgerechnet werden sollten und die Referenzperlen-Temperatur teilweise von

der Temperatur der Installation unterschritten wurde, musste auch dieser Effekt in den Berechnungsmodellen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.3).

Daher wurde für jede Installation auch ein Ersatzmodell für die Referenzperlen in das Berechnungsmodell einbezogen. **Bild 4.8** zeigt das zweidimensionale Ersatzmodell, das über die Breite des Luftspaltes an die Messergebnisse angepasst werden kann.

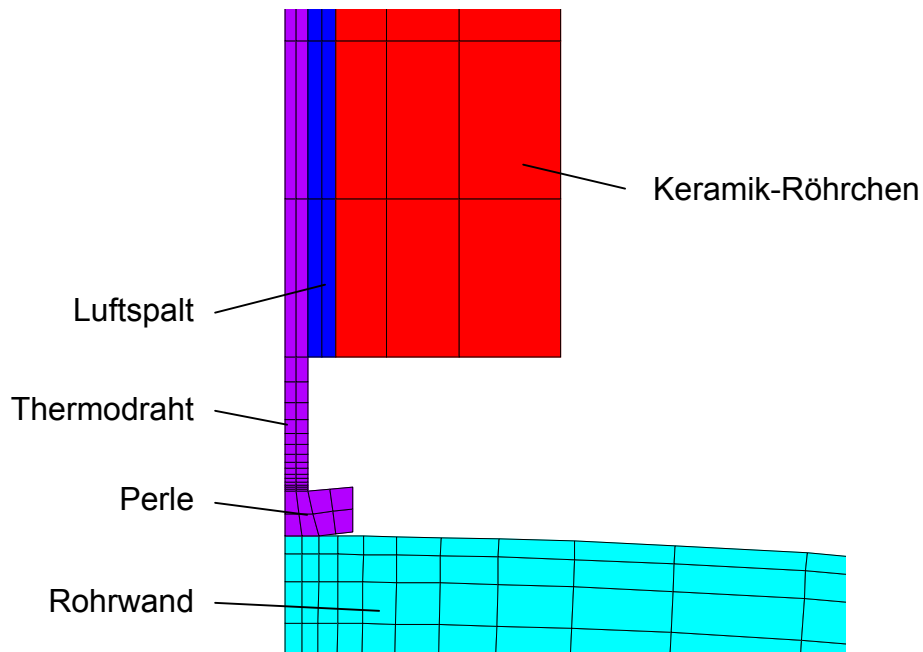


Bild 4.8: Ersatzmodell für die Referenzperle

4.2 Verifizierung der FEM-Modelle anhand der Laborversuche

4.2.1 Auswahl der nachzurechnenden Laborversuche

Ein Vergleich der in den Laborversuchen gewonnenen Messwerte zeigt, dass in Übereinstimmung mit den Erwartungen die niedrigsten Temperaturgradienten beim Versuch 3 (Thermoschock von 200°C) und die maximalen Gradienten beim Versuch 1 (Thermoschock von 350°C) auftreten. Die Gradienten der Versuche 2a (Thermoschock von 280°C) und 4a (Thermoschock von 280°C mit abgesenktem Durchsatz und Ausbildung einer Temperaturschichtung) ordnen sich dazwischen ein. Da der Versuch 4a das durch Messwerte abgedeckte Gradienten-Spektrum nicht erweitert hat, wurde er zur rechnerischen Verifizierung der Berechnungsmodelle nicht herangezogen.

Die größeren Gradienten traten in allen Fällen an der Messstelle in der 6-Uhr-Position auf. Außerdem stellte sich heraus, dass der Messfühler der AMTEC-Installation in 12-Uhr-Position nicht ordnungsgemäß angebracht war (vgl. Fußnote auf Seite 90). Deshalb wurde die rechnerische Verifizierung der Berechnungsmodelle aller Installationen anhand der 6-Uhr-Position durchgeführt. Zusätzlich wurde an einem Beispiel gezeigt, dass auch für die 12-Uhr-Position mit diesen Modellen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erreicht werden kann.

4.2.2 Thermische Randbedingungen

Zur Verifizierung und Kalibrierung der im Abschnitt 4.1 beschriebenen FEM-Modelle wurden die Temperaturverläufe der Thermoschocks von 350°C (Versuch 1), von 280°C (Versuch 2a) und von 200°C (Versuch 3) mit jeweils für alle Installationen einheitlichen thermischen Randbedingungen 3. Art (Vorgabe von Mediumtemperatur und Wärmeübergangszahl) nachgerechnet.

Ausgangspunkt war die theoretische Ermittlung der Wärmeübergangszahl für den stationären Zustand am Ende des Thermoschocks, wenn das Rohr von kaltem Wasser durchströmt wird. In **Anlage 4.1** wird diese Berechnung in Abhängigkeit vom Wasserdurchsatz, der in den Versuchen zwischen 6 und 8 kg/s betrug, aufgezeigt. Daraus ergibt sich ein Bereich für die Wärmeübergangszahl im stationären Zustand von 6000 bis 7500 W/m²K.

Zu Beginn des Thermoschocks bewegt sich die Kaltwasserfront als „Keil“ in dem heißen Rohr vorwärts. Die 6-Uhr-Position wird daher immer vor der 12-Uhr-Position abgekühlt. Dabei erwärmt sich das Wasser zunächst bis zum Siedepunkt. Anschließend tritt sogenanntes Blasensieden auf, was mit sehr hohen Wärmeübergangszahlen verbunden ist. **Bild 4.9** zeigt dieses Phänomen am Beispiel eines stationär beheizten Rohres (nach VDI-Wärmeatlas 1991, Hba 2). Für die Berechnung wurde daher angesetzt, dass sich die Mediumstemperatur stets ausgehend von einer stationären Anfangstemperatur³ zunächst auf 100°C (siedendes Wasser) absenkt und erst später die Temperatur des Behälterwassers von 30°C erreicht.

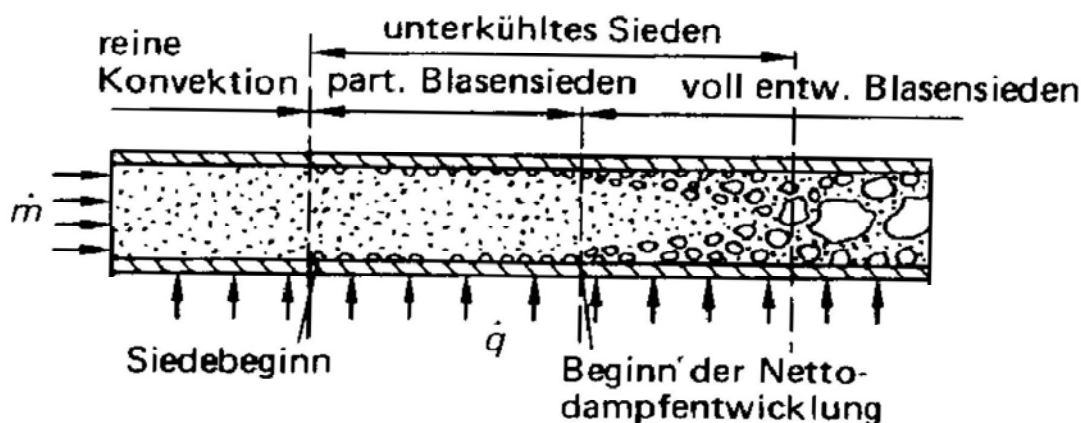


Bild 4.9: Stationäre Phänomene in einem beheizten Rohr

Außerdem kommt es zwischen der heißen Rohrwand und dem kalten Wasser erst nach einer gewissen Anlaufzeit zur Ausbildung einer stabilen Temperaturgrenzschicht. Auch dieser instationäre Vorgang geht kurzzeitig mit sehr hohen Wärmeübergangszahlen einher.

In dem Zeitraum, in dem die Kaltwasserfront bereits die 6-Uhr-Position passiert hat, aber die 12-Uhr-Position noch nicht erreicht wurde, kommt es in der 12-Uhr-Position zu zufälligen Effekten z. B. durch „Wasserspritzer“ und „Dampfwolken“, die von unten (aus der bereits benetzten 6-Uhr-Position) beim Sieden nach oben geschleudert werden. Dabei entstehen auch Benetzungslücken, in denen der

³ Durch die über die Länge des Versuchsrohres veränderliche stationäre Temperaturverteilung wurde eine Anpassung der stationären Anfangstemperatur an die jeweilige Installation erforderlich.

Wärmetransport (Kühlung) fast zusammenbricht, so dass die Rohrrinnenoberfläche durch Wärmeströme innerhalb der noch heißen Wand wieder erwärmt wird.

Tabelle 4.1 gibt den Verlauf der thermischen Randbedingungen in der 6-Uhr-Position für die einzelnen Versuche wieder, mit denen iterativ eine optimale Anpassung der Berechnungsergebnisse an die Messwerte gefunden wurde. Die zugehörigen Diagramme zeigt **Anlage 4.2**.

Thermoschock von 350°C

Thermoschock von 280°C

Thermoschock von 200°C

Zeit in s	Mediums-Temperatur in °C	Wärmeübergangszahl in 10 ³ W/m ² K	Zeit in s	Mediums-Temperatur in °C	Wärmeübergangszahl in 10 ³ W/m ² K	Zeit in s	Mediums-Temperatur in °C	Wärmeübergangszahl in 10 ³ W/m ² K
0	350	6	0	280	15	0	200	20
0,1	100	6	0,1	100	15	0,1	100	20
0,2	100	6	1	100	20	0,8	100	20
0,25	100	20	1,05	100	20	0,85	100	7,5
0,4	30	20	1,1	100	20	0,9	100	7
1	30	25	1,2	30	20	1	30	7
1,4	30	18	1,8	30	20	30	30	7
5	30	13	4	30	7,5			
7	30	11	30	30	7,5			
8,5	30	10						
10	30	9						
12	30	6						
30	30	6						

* siehe Anmerkung neben Tabelle 4.2 und Fußnote auf Seite 95

Tabelle 4.1: Thermische Randbedingungen für die Nachrechnung der Laborversuche in der 6-Uhr-Position

Die für die 12-Uhr-Position während des Versuches 3 (Thermoschock von 200°C) angesetzten Randbedingungen sind in **Tabelle 4.2** und **Anlage 4.3** dargestellt. Mit diesen Werten ergab sich für die Installation „FAMOS alt“ eine plausible Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

Thermoschock von 200°C

Zeit in s	Mediums-Temperatur in °C	Wärmeübergangszahl in 10 ³ W/m ² K
0	200	40
0,1	100	40
1,8	100	40
1,9	30	40
2	30	6
2,5	30	6
2,7	30	0,3
5	30	0,3
5,5	30	10
10	30	6
30	30	6

Anmerkung:

Für die Temperaturfeldberechnung wurde stets ein Anfangszeitpunkt 0 s gewählt, obwohl die Messergebnisse einen zeitlich versetzten Belastungsbeginn ausweisen. Für den Vergleich Messung-Rechnung erfolgte eine entsprechende Anpassung der Zeitskala.

* siehe Fußnote auf Seite 95

Tabelle 4.2: Thermische Randbedingungen für die Nachrechnung des Versuchs 3 für „FAMOS alt“ in der 12-Uhr-Position

Aus Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 geht hervor, dass die Mediumstemperatur im Rohrinnebereich maximale Änderungsgeschwindigkeiten (Gradienten) von 2500 K/s bei Versuch 1, von 1800 K/s bei Versuch 2 bzw. von 1000 K/s bei Versuch 3 aufweist.

4.2.3 Ergebnisse der Verifikation

Im Folgenden werden die Messergebnisse den berechneten Thermoelement-Temperaturen gegenübergestellt, die mit den in den Kapiteln 0 und 0 beschriebenen FEM-Modellen und thermischen Randbedingungen ermittelt wurden. Dieser Vergleich wird für jede Installation und jeden der betrachteten Versuche sowohl für das Thermoelement der jeweiligen Installation als auch für die Referenzperle in Form je eines Diagramms durchgeführt. Jedes Diagramm enthält dabei 5 Kurven, jeweils 2 (Messung und Rechnung) für das Thermoelement der jeweiligen Installation, 2 für die Referenzperle und eine für die berechnete Temperatur der Rohraußenoberfläche. Die gemessenen Kurven werden dabei schwarz, die berechneten farbig dargestellt. Bei idealer Anpassung von Messung und Rechnung wären also jeweils 2 Kurven deckungsgleich. Die Diagramme sind in folgenden Anlagen zusammengestellt:

Für die 6-Uhr-Position:

- FAMOS alt **Anlage 4.4**
- FAMOS neu **Anlage 4.5**
- AMTEC **Anlage 4.6**
- TÜV Schelle **Anlage 4.7**
- TÜV Polster **Anlage 4.8**

Beispielhaft für die 12-Uhr-Position:

- FAMOS alt (für den Versuch 3) **Anlage 4.9**

Bei der iterativen Anpassung wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass

- die größten zeitlichen Temperaturgradienten durch die Berechnung gut wiedergegeben werden und
- Messung und Rechnung im Zeitbereich zwischen 0 s und 3 s, in dem die größten radialen Temperaturdifferenzen in der Rohrwand entstehen, gut übereinstimmen.

Aus den Bildern in den o. g. Anlagen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

1. Während des Versuchs 1 (Thermoschock von 350°C) traten Undichtigkeiten an einem der Flansche auf, wodurch besonders die Messwerte an den nächstgelegenen Installationen „TÜV Polster“ und „FAMOS alt“ beeinflusst wurden. Diese Störungen wurden bei der Nachrechnung nicht berücksichtigt.
2. Beim Versuch 1 (Thermoschock von 350°C) kam es bei den Installationen „FAMOS alt“ und „TÜV Polster“ zum Abheben des Thermoelementes von der Rohroberfläche, weil sich das Rohr wesentlich schneller abkühlte als das Spannband. Dadurch verschlechterte sich der Wärmeübergang. Über eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Luftspaltes gelang es, auch diesen Effekt rechnerisch nachzuvollziehen.⁴
3. Bei den Installationen „FAMOS neu“ und „TÜV Schelle“ unterschritt die Temperatur des (Installations-) Thermoelementes die der auf die Rohroberfläche aufgepunkteten Referenzperle. Dieser Effekt ist nur mit einer Beeinflussung des Signals der Referenzperle durch das thermisch trägere Keramikröhrchen erklärbar (siehe auch Kapitel 4.1.6) und mit deren Einbeziehung in das Berechnungsmodell auch berücksichtigt worden. Das bedeutet aber gleichzeitig, dass auch die verwendeten Referenzperlen nicht in Lage waren, die Außenwandtemperaturverläufe trägheitsfrei wiederzugeben.
4. Bei der Installation „TÜV Polster“ wird der Thermodraht direkt neben dem Glasfaserpolster mit einer kleinen Schelle an dem Spannband befestigt (vgl. Anlage 2.5 zum Arbeitspaket 2). Dadurch kommt es zu einer „Wärmebrücke“ zwischen dem thermisch trägen Spannband und dem Thermodraht. Bei allen Versuchen ist daher ein deutlich flacherer Verlauf der gemessenen Kurve ab etwa 7 s nach Beginn des Schocks zu beobachten, was auf diesen zusätzlichen Wärmeeintrag zurückzuführen ist (beim Versuch 1 erfolgt zusätzlich Abheben, s. o.). Dieser „3D-Effekt“ ist mit dem zweidimensionalen Berechnungsmodell nicht erfassbar. In dem für die maximalen Beanspruchungen relevanten Zeitbereich bis 3 s gibt das Berechnungsmodell aber die Messwerte hinreichend genau wieder.
5. An der 12-Uhr-Position traten während der Versuche deutlich komplexere Vorgänge als an der 6-Uhr-Position auf (vgl. Kapitel 3). Am Beispiel der Installation „FAMOS alt“ wurde für den Versuch 3 (Thermoschock von 200°C) gezeigt,

⁴ Die in den Versuchen 1 und 2 realisierten Temperaturdifferenzen und -änderungsgeschwindigkeiten liegen deutlich über den im Kraftwerk üblicherweise auftretenden. S. a. Fußnote zum Abschnitt 4.3

dass die Modelle auch zur Analyse derartiger Vorgänge geeignet sind (Anlage 4.9).

Die mit den FEM-Modellen berechneten maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten an der Rohr-Außenoberfläche sind in der folgenden **Tabelle 4.3** für alle ausgewerteten Versuche dargestellt. Ein Vergleich mit den Mess-Ergebnissen der Folie-Messstreifen in den Zusatzversuchen (vgl. Kapitel 3) zeigt sehr gute Übereinstimmung.

Messebene	1	2	3	4	5
Versuch	TÜVPolster	FAMOS alt	FAMOS neu	AMTEC	TÜV Schelle
1 (350 °C)	-32,9	-32,2	-34,1	-29,9	-29,9
2 (280 °C)	-22,6	-25,6	-26,5	-24,0	-24,0
3 (200 °C)	-13,0	-13,6	-13,9	-14,0	-14,0

Tabelle 4.3: Maximale berechnete Temperaturänderungsgeschwindigkeiten an der Außenoberfläche des Rohres (in K/s)

Der große Unterschied zwischen den Temperaturänderungsgeschwindigkeiten des Mediums (Abschnitt 4.2.2), an der Außenoberfläche (Tabelle 4.3) und an den Installationen (Kapitel 3) bestätigt, dass alle durchgeführten Versuche weit entfernt von einer quasistationären Temperaturänderung waren (Am Beispiel des Versuches 3: Medium: 1000 K/s, Oberfläche: 13 bis 14 K/s und Installation: 8,2 bis 12,6 K/s, siehe auch **Anlage 4.10**).

Insgesamt zeigen die durchgeführten Berechnungen, dass die FEM-Modelle geeignet sind, um mit den Installationen erfasste Temperaturmessungen nachzuvollziehen.

4.3 FEM-Berechnung und Auswertung vorliegender Messdaten

Um zu zeigen, dass die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen FEM-Modelle nicht nur zur Auswertung von Laborversuchen geeignet sind, werden im Folgenden beispielhaft einige Vorgänge ausgewertet, die in verschiedenen deutschen Kernkraftwerken mit jeweils zwei zeitweise parallel angebrachten Installationen gleichzeitig gemessen wurden. Dieser Vergleich erfolgt an je einem Beispiel, wobei die am häufigsten verwendete Installation „FAMOS alt“ jeweils einer weiteren in unmittelbarer räumlicher Nähe angebrachten temporären Installation gegenübergestellt wird.

Anlage 4.11 zeigt den Vergleich von „FAMOS alt“ und „FAMOS neu“ am Beispiel des Dampfeinströmens in eine Hilfssprühleitung am Ende eines Hilfssprühvorgangs. Während „FAMOS neu“ ca. 96% der maximalen Temperatur-Änderungsgeschwindigkeit der Oberfläche (Oberflächengradient) erfasst, gibt „FAMOS alt“ unter diesen Bedingungen ca. 87% dieses Wertes wieder. Der berechnete Oberflächengradient beträgt 4,6 K/s.

In **Anlage 4.12** ist der Beginn eines Hilfssprühvorgangs mit einem Durchsatz von etwa 3 kg/s dargestellt, der von den Installationen „FAMOS alt“ und „AMTEC“ gleichzeitig erfasst wurde. Beim Vergleich der mit den Installationen erfassten maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten muss die deutlich unterschiedliche Wanddicke berücksichtigt werden. Während „FAMOS alt“ ca. 91% der maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeit der Oberfläche erfasst, gibt „AMTEC“ ca. 82% des zugehörigen Oberflächenwertes wieder. Im Kurvenverlauf der Installation „AMTEC“ ist deutlich eine Krümmungsänderung zu erkennen, die zeigt, dass das Thermoelement von der Wand abhebt, da sich das Rohr schneller abkühlt als die Befestigungsbänder. In der Berechnung wird dies durch einen deutlich schlechteren Wärmeübergang zwischen Rohr und Thermoelement von diesem Zeitpunkt an berücksichtigt.⁵

Anlage 4.13 zeigt die Gegenüberstellung von „FAMOS alt“ und „TÜV Schelle“ am Beispiel eines Sprühvorganges mit einem Durchsatz von etwa 12 kg/s. „TÜV Schelle“ erfasst etwa 93% der maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeit

⁵ Anmerkung: Das Abheben geschieht zu einem Zeitpunkt, zu dem die radialen Temperaturdifferenzen und damit die Wärmespannungen bereits ihr Maximum überschritten haben (s. a. Abschnitt 0).

der Oberfläche, von „FAMOS alt“ werden dagegen nur etwa 40% dieses Wertes wiedergegeben, was in diesem Fall wesentlich durch den Aufzeichnungstakt von 10s (0,1 Hz) verursacht wird. Die Berechnung zeigt, dass bei höherer Aufzeichnungsfrequenz bis zu 3,7 K/s (= 67%) hätten erfasst werden können (siehe auch Abschnitt 4.6.3).

In **Anlage 4.14** werden die Installationen „FAMOS alt“ und „TÜV Polster“ am Beispiel des Dampfeinströmens in eine Sprühleitung zum Ende eines TW-Sprühvorgangs mit einem maximalen Oberflächengradienten von 2,3 K/s miteinander verglichen. Die gemessenen Kurven und ihre maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich nur wenig (2,1 K/s bzw. 2,2 K/s) in diesem Gradientenbereich.

Im Rahmen dieses Projektes können nur einige Beispiele vermessener Vorgänge ausgewertet werden. Die Auswahlmöglichkeiten wurden weiter dadurch eingeschränkt, dass es nur wenige Stellen in deutschen Kernkraftwerken gibt, wo Messebenen unterschiedlicher Installationen an derselben Rohrleitung gleichzeitig so in räumlicher Nähe angebracht sind, dass man die Messwerte direkt vergleichen kann. So befanden sich alle Vergleichspaare an Sprüh- bzw. Hilfssprühleitungen. Daher umfasst der abgedeckte Oberflächen-Gradientenbereich nur den oberen und damit ermüdungsrelevanten Teil des in der Praxis auftretenden Spektrums. Die in den Versuchen ermittelten prozentualen Verhältnisse von mit den Installationen gemessenem Temperaturgradienten und Oberflächengradienten (siehe Versuchsauswertung im Kapitel 3) werden durch die Kraftwerks-Messdaten als abdeckende Grenzwerte bestätigt, die für schockartige Temperaturänderungen mit sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten in 8 bis 10 mm dicken austenitischen Rohrleitungen gelten. Aus der physikalischen Theorie der Wärmeübertragung folgt, dass für im Vergleich zu den Versuchen deutlich langsamer ablaufende Vorgänge, für kleinere Wärmeübergangskoeffizienten, größere Wanddicken und für Rohrmaterialien mit stärker die Wärmeleitung dämpfenden Eigenschaften (geringere Temperaturleitzahl) das Gradientenverhältnis zwischen Messung und Oberfläche näher an 100% liegt als diese Grenzwerte. Im Extremfall der quasistationären Temperaturänderung (z. B. beim Aufheizen des Primärkreises mit 25 K/h während des Anfahrens der Anlage) zeigen die Temperaturänderungsgeschwindigkeiten von Medium, Außenoberfläche und Thermoelement für jede beliebige Installation den selben Wert, was einem Gradientenverhältnis von 100% entspricht (siehe auch Anlage 4.10).

4.4 Vergleich der Installationen anhand der inversen Temperaturberechnung

4.4.1 Messwerte der Installationen

Mit Hilfe der inversen Temperaturfeldberechnung (ITB) ist es möglich, aus einem bekannten Temperaturverlauf an der Außenwand den Temperaturverlauf an der Innenwand zu berechnen. Bei der ITB kann verfahrensbedingt keine Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften berücksichtigt werden⁶. Weiterhin ist bei der Bestimmung des Außenwand-Temperaturverlaufs (d. h. vor Anwendung der ITB) der Trägheitseinfluss der jeweiligen Messtechnik, z. B. mit einer FEM-Berechnung, zu berücksichtigen.

Mit einem Berechnungsmodul, der diese ITB mit Hilfe der Schnellen Fourier-Transformation (FFT) realisiert, wurden für die Laborversuche jeweils 2 Berechnungen durchgeführt:

1. Die im Laborversuch an den Installationen in der 6-Uhr-Position gemessenen Temperaturverläufe wurden ohne Berücksichtigung der jeweiligen Übertragungsverluste „als Außenwand-Temperaturen interpretiert“ und mit Hilfe der ITB daraus Innenwand-Temperaturen berechnet.
2. Die mit den FEM-Modellen (unter Berücksichtigung der Trägheit der Messtechnik) ermittelten Außenwandtemperaturen wurden als Grundlage für die Berechnung der Innenwand-Temperaturen mittels ITB benutzt.

Versuch	Bezeichnung	AMTEC	FAMOS ALT	FAMOS NEU	TÜV POLSTER	TÜV SCHELLE
1 (350°C)	ΔT_{MI} aus $T_{au\ddot{a}u\text{en}}$ (FEM)	142	140	138	135	141
	ΔT_{MI} aus $T_{Installation}$ (Messung)	81	75	106	88	119
2 (280°C)	ΔT_{MI} aus $T_{au\ddot{a}u\text{en}}$ (FEM)	112	109	108	102	108
	ΔT_{MI} aus $T_{Installation}$ (Messung)	64	60	81	59	93
3 (200°C)	ΔT_{MI} aus $T_{au\ddot{a}u\text{en}}$ (FEM)	64	58	56	58	63
	ΔT_{MI} aus $T_{Installation}$ (Messung)	40	37	46	39	58

Tabelle 4.4: Vergleich der maßgebenden Wandtemperatur-Differenzen (in K)

⁶ Die geschlossene Lösung der Differentialgleichung der Wärmeleitung im Rohr erfordert konstante Koeffizienten, d. h. konstante Materialeigenschaften.

In **Tabelle 4.4** werden die so ermittelten maximalen Differenzen (ΔT_{MI}) zwischen Innenwand-Temperatur und mittlerer Wandtemperatur gegenübergestellt, da diese Differenzen maßgebend sind für die in der Rohrwand auftretenden Wärmespannungen.

Der Vergleich zeigt, dass auch bei dieser Betrachtungsweise in allen Fällen die Installation „TÜV Schelle“ dem tatsächlichen Maximum der Temperaturdifferenz am nächsten kommt. Es folgt die Installation „FAMOS neu“. Danach kommen in wechselnder Reihenfolge relativ dicht beieinander die Installationen „AMTEC“, „FAMOS alt“ und „TÜV Polster“.

4.4.2 Messwerte der Siempelkamp-Messebene

Wie im Kapitel 3 beschrieben, wurden in der Messebene 7 Thermoelement-Perlen sowohl an der Außenoberfläche (MS1 und MS4) als auch in Bohrungen nahe der Innenoberfläche (MS2/MS3 und MS5/MS6) angepunktet. Dabei wurden glasfaserumspinnene Thermoelement-Drähte mit 0,35 mm Durchmesser verwendet. Diese Aufnehmer erwiesen sich als deutlich trägheitsärmer im Vergleich zu den Referenzperlen. Bild 3.4.7 auf Seite 50 zeigt die Bohrungen der Messstellen MS2/MS3 und MS5/MS6 nach Ende der Versuche. Man erkennt, dass die Bohrungen in der 12-Uhr- und der 6-Uhr-Position unterschiedlich ausgeführt wurden, was dazu führte, dass die Messstellen MS2 und MS3 (oben) tatsächlich eine Temperatur nahe der Innenoberfläche gemessen haben (Entfernung der Perle zur Innenoberfläche ca. 0,4 mm), während die Messstellen MS5 und MS6 (unten) Temperaturen deutlich mehr zur Wandmitte hin erfasst haben.

Mit Hilfe der inversen Temperaturfeldberechnung wurde daher an Hand der 12-Uhr-Position für den Versuch 3 ein Vergleich zwischen Rechnung und Messung nahe der Innenwand durchgeführt. Die an der Außenwand gemessenen Perlen-Temperaturen (glasfaserumspinnene Thermoelement-Drähte, s.o.) wurden dabei als Oberflächentemperaturen (d. h. ohne Berücksichtigung ihrer Trägheit) angesetzt. **Anlage 4.15** zeigt sowohl die an MS1 (außen), MS2 und MS3 (in den Bohrungen) gemessenen als auch die für die Innenwand und für die Messstellen-Position mit Hilfe der ITB berechneten Temperaturverläufe. Man erkennt, dass

- die Temperaturen der Messstellen MS2 und MS3 voneinander abweichende Verläufe zeigen, was auf unterschiedlich guten Kontakt zwischen Thermoelement und Bohrungswand bzw. auf verschiedene Positionen der Thermoelemente innerhalb der Rohrwand hindeutet (Beim Aufsägen des Rohres wurden leider 3 der 4 Bohrungsperlen zerstört, so dass man hinsichtlich dieser Unterschiede auf Vermutungen angewiesen ist)
- aus dem an der Außenwand gemessenen Temperaturverlauf, der nur eine leichte Krümmungsänderung zeigt, an der Innenwand eine deutliche Temperaturschwankung ermittelt wird, die auch die Messwerte nahe der Innenwand bestätigen, und
- die größte Differenz zwischen Außenwandtemperatur und der 0,4 mm von der Innenwand entfernten Temperatur etwa 85% der maximalen Differenz zwischen Innen- und Außenwandtemperatur beträgt.

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung für die Position 0,4 mm von der Innenwand ist in Anbetracht der beschriebenen Annahmen (außen gemessene Perlentemperatur MS1 ohne Trägheitseinfluss als Außenwandtemperatur angesetzt, Unsicherheit bzgl. der genauen Position der Perlen MS2 und MS3 in der Bohrung, konstante Werkstoffeigenschaften in der gesamten Rohrwand und über die gesamte Zeit) zufriedenstellend. Die Annahme, die aus glasfaserumspunnenen Thermoelement-Drähten mit 0,35 mm Durchmesser bestehenden Thermoperlen an der Außenwand als sehr trägheitsarm zu betrachten und die damit gemessenen Temperaturverläufe als Außenwandtemperaturen anzusetzen, erwies sich als praktikabel.

Folgende maximale Gradienten wurden kurzzeitig (Zeitraum < 1 s) gemessen (vgl. Kapitel 3): 12,5 K/s an der Außenwand-Perle (MS1) und 26,5 K/s (MS2) bzw. 27,8 K/s (MS3)⁷ in der Bohrung. Die Berechnung mit der ITB ergab 34,7 K/s in 0,4 mm Entfernung von der Innenoberfläche und 40,6 K/s an der Innenwand. Dabei ist zu beachten, dass die sehr „unruhigen“ Messkurven zur Gradientenauswertung eine starke Filterung erforderten, so dass die angegebenen gemessenen Gradienten zeitliche Mittelwerte darstellen.

⁷ Der in Tabelle 3.5 im Kapitel 3 dokumentierte Wert betrifft den ersten Extremwert, nicht das absolute Maximum.

4.5 Spannungs- und Ermüdungsberechnung

4.5.1 Auswertung der Versuche

Auf der Grundlage der FEM-Berechnungen und der sich daraus ergebenden maßgebenden Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Wandtemperatur und Innenwandtemperatur (siehe Kapitel 4.4) lassen sich über die Beziehung

$$\sigma_T = \frac{1}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T_{MI}$$

α - Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K
 ν - Querkontraktionszahl
 E - Elastizitätsmodul in N/mm²

die maßgebenden Umfangsspannungen an der Innenwand des Rohres berechnen. Die Gegenüberstellung in **Tabelle 4.5** zeigt die so berechneten Wärmespannungen für die einzelnen Installationen auf der Basis der Temperaturdifferenzen aus Tabelle 4.4 (Kapitel 4.4).

Versuch	Bezeichnung	AMTEC	FAMOS ALT	FAMOS NEU	TÜV POLSTER	TÜV SCHELLE
1 (350°C)	σ_{Tmax} aus $T_{au\ss en}$ (FEM)	624	615	605	591	617
	σ_{Tmax} aus $T_{Installation}$ (Messung)	353	331	466	387	523
2 (280°C)	σ_{Tmax} aus $T_{au\ss en}$ (FEM)	500	490	483	455	483
	σ_{Tmax} aus $T_{Installation}$ (Messung)	285	269	363	266	415
3 (200°C)	σ_{Tmax} aus $T_{au\ss en}$ (FEM)	288	263	253	263	283
	σ_{Tmax} aus $T_{Installation}$ (Messung)	180	168	207	174	262

Tabelle 4.5: Vergleich der berechneten Wärmespannungen (in N/mm²)

Die Berechnung des anteiligen Erschöpfungsgrades für das Versuchsrohr erfolgt unter folgenden Voraussetzungen:

- Die aus den Versuchen ermittelten maßgebenden Spannungsschwingbreiten für die Innenoberfläche werden Tabelle 4.5 entnommen.
- Als Häufigkeit für die Thermoschocks wird in allen Fällen ein Wert von 500 angesetzt, um damit den Einfluss auf die Gesamtermüdung des Rohres konservativ abzuschätzen.
- Es wird die Ermüdungskurve für Austenit nach KTA 3211.2 (aktueller Entwurf) bzw. ASME Boiler and Pressure Vessel Code III, NB (bis 10¹¹ Lastwechsel) zu Grunde gelegt.

Das Ergebnis ist in **Tabelle 4.6** zusammengestellt.

Versuch	Bezeichnung	AMTEC	FAMOS ALT	FAMOS NEU	TÜV POLSTER	TÜV SCHELLE
1 (350°C)	D (500 LW) aus $T_{\text{außen}}$ (FEM)	0,0149	0,0140	0,0129	0,0113	0,0140
	D (500 LW) aus $T_{\text{Installation}}$ (Messung)	0,0005	0,0004	0,0031	0,0010	0,0059
2 (280°C)	D (500 LW) aus $T_{\text{außen}}$ (FEM)	0,0039	0,0035	0,0032	0,0024	0,0032
	D (500 LW) aus $T_{\text{Installation}}$ (Messung)	0,0002	0,0002	0,0005	0,0002	0,0013
3 (200°C)	D (500 LW) aus $T_{\text{außen}}$ (FEM)	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
	D (500 LW) aus $T_{\text{Installation}}$ (Messung)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0001

Tabelle 4.6: Erschöpfungsgrade für je 500 Thermoschocks

In Tabelle 4.6 ist deutlich zu erkennen, wie sich die Unterschiede in der Erfassung der Temperaturen auf die berechneten Erschöpfungsgrade auswirken. Insgesamt ergeben sich für die konservativ angesetzte Häufigkeit von 500 Thermoschocks anteilige Erschöpfungsgrade von maximal 1,5% im Falle des Versuchs 1 (aus 350°C), von 0,4% für den Versuch 2 (aus 280°C) und von 0,02% für den Versuch 3 (aus 200°C). So berechnet man mit diesen im Versuch realisierten scharfen Thermoschock-Transienten und den angesetzten konservativen Lastwechselzahlen für das Rohr keine relevanten Erschöpfungsgrade, auch wenn der sehr flache Verlauf der Ermüdungskurven besonders für die Versuche mit den größten Temperaturdifferenzen und Gradienten (aus 350°C und aus 280°C) deutliche Unterschiede in den berechneten Werten bewirkt.

Wie z. B. in der in Anlage 4.10 angegebenen Literatur dargestellt, hängen die maximalen Spannungen in der Rohrwand und somit auch die resultierende Materialermüdung von der maximalen Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Wandtemperatur und Innenwandtemperatur ab. Ein direkter Zusammenhang zwischen dieser Temperaturdifferenz und dem Außenwandgradienten besteht aber nicht. Eine Abhängigkeit des Erschöpfungsgrades vom gemessenen Temperaturgradienten lässt sich nur qualitativ formulieren, da alle in Anlage 4.10 genannten Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Allgemein gilt, dass große gemessene Gradienten bei gleicher Rohrwanddicke eine größere Ermüdung bewirken als kleine. Andererseits bedeutet derselbe Außenwandgradient für ein dickwandiges Rohr größere thermische Spannungen (und Erschöpfungsgrade) als für ein dünnwandiges.

4.5.2 Bewertung der Berechnungsergebnisse

Eine Spannungs- und Ermüdungsanalyse muss stets im Gesamtzusammenhang der Bauteilbewertung gesehen werden und somit sowohl alle im Bauteil auftretenden betrieblichen Belastungen als auch die im Betrieb zu erwartenden Zyklenzahlen berücksichtigen. Daher ist für die Bewertung der im Kapitel 4.5.1 durchgeführten Spannungs- und Ermüdungsberechnung zu beachten,

- dass die Parameter der Versuche (Höhe der Temperaturänderung ΔT während des Thermoschocks und Temperaturänderungsgeschwindigkeit) bewusst konservativ gegenüber den betrieblichen Randbedingungen im Kraftwerk gewählt wurden (Temperaturtransienten mit $\Delta T > 200$ K sind postulierte Störfälle bzw. nicht vorgesehene Transienten, die Detailuntersuchungen erfordern),
- dass die im Kraftwerk bei betrieblichen Vorgängen in Systemen mit Ermüdungsrelevanz auftretenden Lastwechselzahlen ($\Delta T < 200$ K) im Allgemeinen weniger als 500 betragen und
- dass die ermüdungsmäßig führenden Beanspruchungen im Kraftwerk in den Bauteilen mit größerer Wanddicke (z. B. Stutzen) auftreten, während die Temperaturmessungen üblicherweise an der dünneren Wand der Rohrleitung durchgeführt werden.

Die im Kapitel 4.5.1 durchgeführte Auswertung der Versuche unterstreicht, dass in relativ dünnwandigen Rohrleitungen bei solchen schnellen Temperaturtransienten, wie sie in den Versuchen realisiert wurden, der Einfluss der Thermo-element-Installation auf das Messergebnis in die Messauswertung einzubeziehen ist, da sonst die berechneten Spannungen und Ermüdungsgrade unterschätzt werden. Für langsamere Mediums-Temperaturänderungen, geringere Mediums-Temperaturhübe, Rohrleitungen mit größeren Wanddicken und Rohrmaterialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit nimmt der Einfluss ab (siehe Beispiele in Kapitel 4.3, Kapitel 4.6.1 und Anlage 4.10).

4.6 Bewertung der Installationsarten im Hinblick auf schnelle Transienten

4.6.1 Gemessene Temperaturänderungsgeschwindigkeiten

Der Vergleich der untersuchten Installationsarten ergab für schnelle Transienten deutliche Unterschiede hinsichtlich der erfassten Temperaturänderungsgeschwindigkeiten (Gradienten). Wie bereits in den Kapiteln 3 sowie 4.4 aufgeführt, gibt die Installation „TÜV Schelle“ den Verlauf der Oberflächentemperatur sowohl hinsichtlich der erfassten Gradienten als auch der daraus ermittelten radialen Temperaturdifferenzen in der Wand sowie der mit Hilfe dieser Angaben berechneten thermischen Spannungen am besten wieder. Danach kommt die Installation „FAMOS neu“ und dieser folgen mit relativ dicht beieinanderliegenden Ergebnissen die Installationen „AMTEC“, „FAMOS alt“ und „TÜV Polster“.

Dabei stellen die im Kapitel 3 ausgewiesenen in den Versuchen ermittelten prozentualen Verhältnisse aus den mit den Installationen gemessenen Temperaturgradienten und den zugehörigen Oberflächengradienten bezüglich der im Kraftwerk vorhandenen Bedingungen konservative Grenzwerte dar (siehe auch Abschnitt 4.3).

Eine allgemeine Darstellung der Einflussgrößen auf die mit einer der Installationen gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten gibt Anlage 4.10. Wie dort ausgeführt, ist es nicht möglich, eine allgemeine Beziehung zwischen diesen Einflussgrößen und den mit den Installationen gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten in geschlossener Form anzugeben, da für jeden konkreten Fall das Lösen der Differentialgleichung der Wärmeleitung erforderlich ist.

Wie in den vorangehenden Abschnitten dieses Kapitels dokumentiert, ist es aber für jede der untersuchten Installationen prinzipiell möglich, mit Hilfe eines geeigneten Berechnungsmodells aus den Messwerten die thermischen Vorgänge im Rohr zu ermitteln, so dass eine Übertragung auf andere Bauteilbereiche, eine realistische Berechnung der auftretenden Spannungen und eine Ermüdungsbewertung mit hinreichender Genauigkeit erfolgen kann.

4.6.2 Abheben des Thermoelementes vom Rohr

Alle Installationen, die mit Spannbändern „oberhalb“ der Thermoelemente arbeiten, können im Prinzip bei „kalten Schocks“ abheben, da sich die Spannbänder in dem Bereich, in dem kein direkter Kontakt zum Rohr besteht, deutlich langsamer abkühlen als das Rohr. Entscheidend ist hier eine ausreichende Vorspannung der Bänder (die andererseits nur so groß sein darf, dass sie bei schnellen Erwärmungen, wenn

der umgekehrte Effekt eintritt, die Thermolemente nicht schädigt). Während der Laborversuche wurde im Versuch 1 bei den maximalen gefahrenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten (die in dieser Größe im Kraftwerk nicht auftreten) ein Abheben der Installationen „FAMOS alt“ und „TÜV Polster“ beobachtet, was sich durch einen „Knick“ im zeitlichen Temperaturverlauf bemerkbar macht. Auch das Verhalten der Installation „AMTEC“ deutet auf diesen Effekt hin (vgl. Fußnote zum Abschnitt 4.1.3). In der Vergangenheit wurden auch bei Kraftwerksmessungen vereinzelt solche Effekte beobachtet (vgl. z. B. Anlage 4.12). Das Abheben geschieht aber in solchen Fällen jeweils zu einem Zeitpunkt, zu dem die radialen Temperaturdifferenzen über der Wand (und somit die lokalen Wärmespannungen) ihr Maximum bereits überschritten haben, so dass trotz des Abhebe-Effektes bei ausreichender Abfragefrequenz (siehe Abschnitt 4.6.3) alle Informationen zur Erfassung der maximalen Wärmespannungen vorliegen. Die Wahrscheinlichkeit des Abhebens ist bei der Installation „FAMOS neu“ auf Grund des 360°-Kontaktes zwischen Spannband und Rohr (größere Spannkraft möglich und besserer Wärmeübergang) deutlich geringer. So wurde auch bei den Versuchen kein Abheben beobachtet. Auf Grund der Punktschweißverbindung zwischen Schelle und Rohr kann bei der Installation „TÜV Schelle“ kein Abheben auftreten (Allerdings hat die Installation Nachteile bei der Demontierbarkeit).

4.6.3 Abfragefrequenz

Bei schnellen Transienten spielt die Abfragefrequenz (Aufzeichnungstakt) bei der Temperaturmessung eine wichtige Rolle, um die Temperaturänderungen ausreichend gut erfassen zu können (siehe z. B. Anlage 4.13). Im **Bild 4.10** sind die Messergebnisse des Versuchs 3, dessen Änderungsgeschwindigkeiten etwa denen eines Sprühvorganges in einer Sprühleitung entsprechen, beispielhaft mit unterschiedlichen Aufzeichnungstakten dargestellt, der größeren Deutlichkeit halber mit zeitlichem Versatz. Es wird dieselbe gemessene Kurve dargestellt mit 12 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz und 0,1 Hz Abfragefrequenz. Man erkennt, dass eine Aufzeichnungsfrequenz von 0,5 Hz für solche Vorgänge einen sinnvollen Kompromiss zwischen erforderlicher Genauigkeit und begrenzter anfallender Datenmenge darstellt, während Aufzeichnungsfrequenzen größer als 1 Hz auch höherfrequente, aber nicht ermüdungsrelevante Effekte wiedergeben.

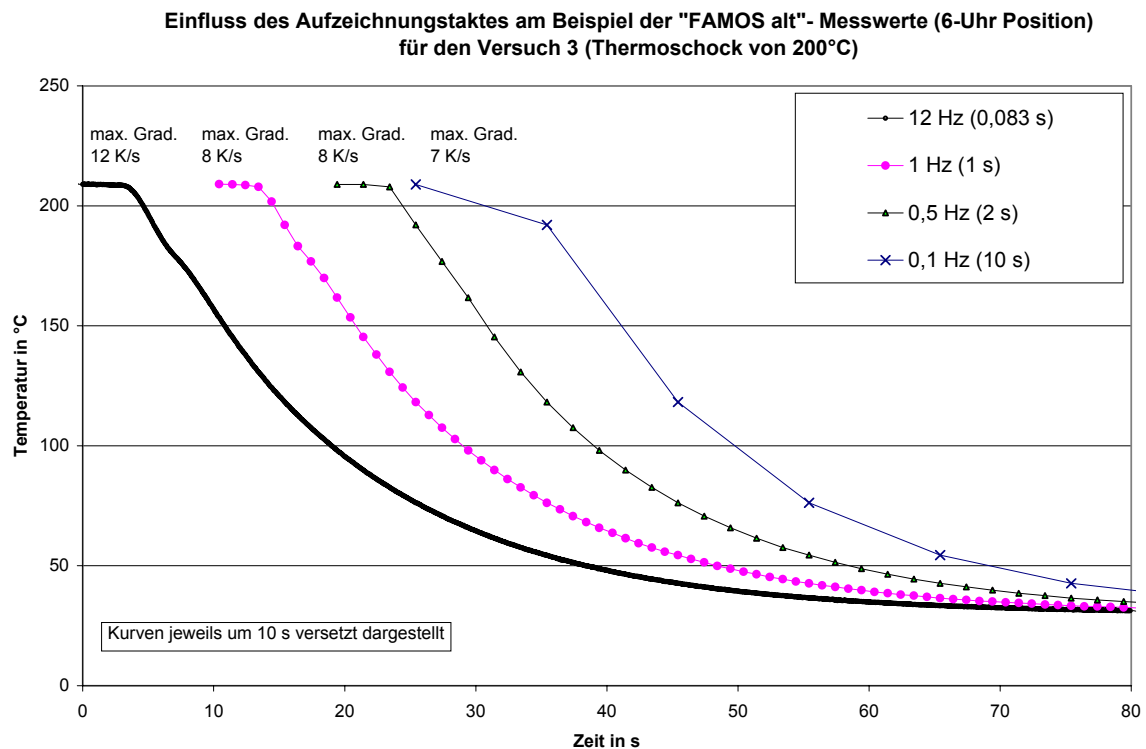


Bild 4.10: Abfragefrequenz und gemessener Temperaturgradient

Die Systeme in Kernkraftwerken, in denen ermüdungsrelevante Transienten auftreten und für die eine solche Abfragefrequenz von 0,5 Hz empfehlenswert ist, sind im Wesentlichen die Sprüh- und Hilfssprühleitungen in DWR-Anlagen sowie Teile des Speisewassersystems in DWR- und SWR-Anlagen. Für andere Systeme, in denen deutlich langsamere Temperaturänderungen auftreten, ist eine Aufzeichnungsfrequenz von 0,1 Hz ausreichend.

4.7 Anforderungen an die Anordnung der Temperaturmessstellen

4.7.1 Erfassung schneller Vorgänge

Um schnelle Vorgänge in Rohrleitungen zu erfassen, sollten die Messebenen an Stellen mit möglichst geringer Wanddicke angebracht werden.

4.7.2 Erfassung von Temperaturschichtungen

Im Hinblick auf die Erfassung von Temperaturschichtungen in Rohrleitungen ist die Anordnung der Thermoelemente am Umfang des Rohres von Bedeutung, da die Lage der Grenzschicht die Größe des Schichtungsmomentes (d.h. des Biegemomentes, das eine Temperaturschichtung in einer dehnungsbehinderten Rohr-

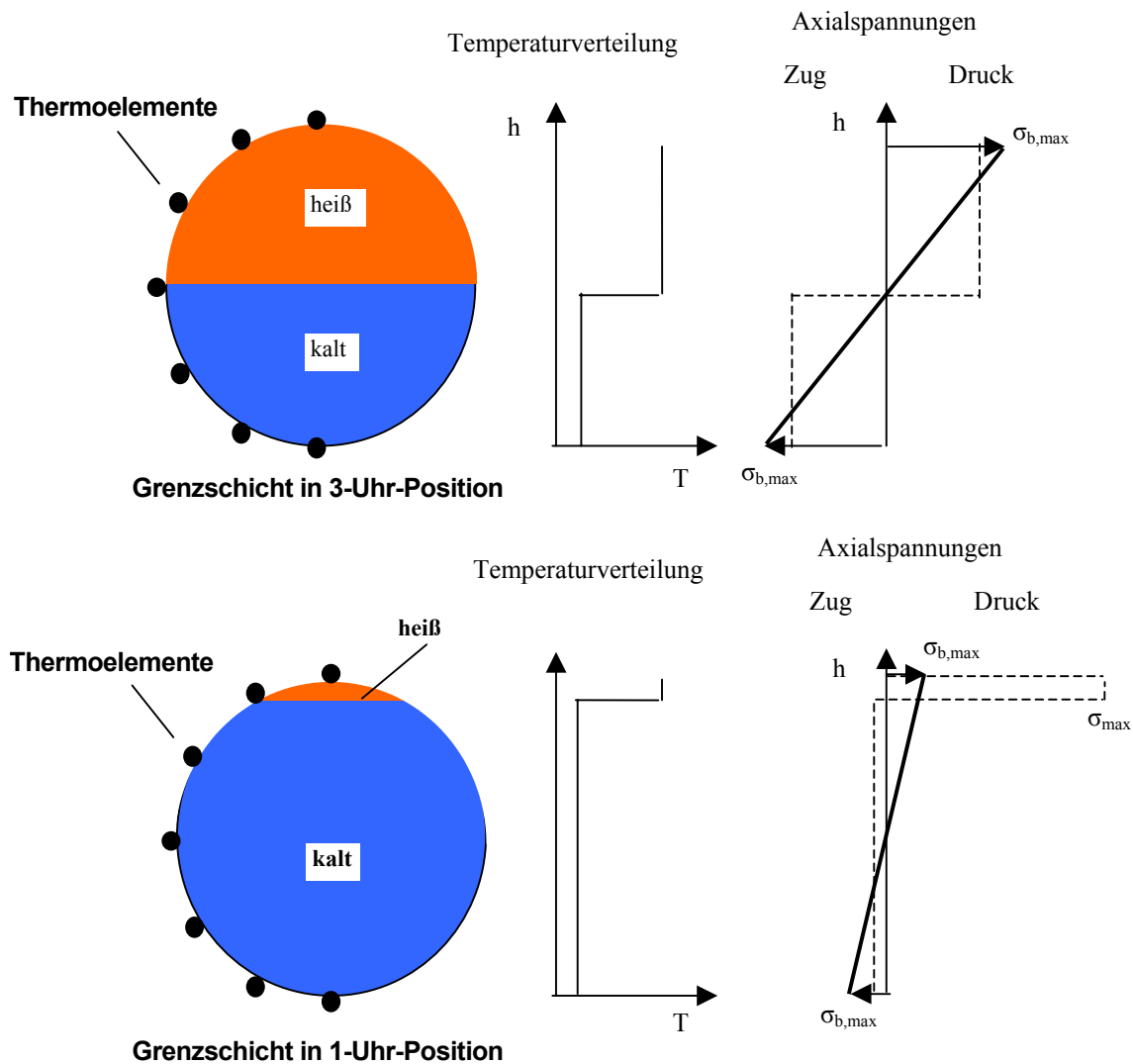


Bild 4.11: Einfluss der Höhe der Grenzschicht auf das Schichtungsmoment

leitung verursacht), aber auch der ermüdungsrelevanten örtlichen Spannungen beeinflusst.

Das **Bild 4.11** zeigt für 2 Fälle schematisch die Temperaturverteilung über dem Rohr-Querschnitt sowie die zugehörigen Axialspannungen (gestrichelt: lokale Axialspannungen bei vollständiger Dehnungsbehinderung; fett: Biegespannungen σ_b , d. h. linear über den Querschnitt verteilter Anteil der Axialspannungen mit dem Maximum $\sigma_{b,max}$) Die in Bild 4.11 oben dargestellte Grenzschicht in 3-Uhr-Position erzeugt von allen möglichen Grenzschichthöhen die größte Biegespannung $\sigma_{b,max}$ und damit das größtmögliche Schichtungsmoment. Eine Grenzschicht in 1-Uhr-Position, wie im unteren Bildteil schematisch dargestellt, bewirkt dagegen eine deutlich unsymmetrische Spannungsverteilung über dem Rohr-Querschnitt mit einer großen örtlichen Spitze σ_{max} im Bereich der 0-Uhr-Position. Das Maximum der linear über den Querschnitt verteilten Biegespannungen $\sigma_{b,max}$ fällt bei dieser Grenzschichtposition allerdings deutlich kleiner aus als bei einer „3-Uhr-Schichtung“ mit gleicher Temperaturdifferenz zwischen „heiß“ und „kalt“.

An horizontalen Rohrleitungsabschnitten, an denen Temperaturschichtungen erwartet werden, ist es daher üblich, 7 Thermoelemente am halben Umfang anzubringen (Bild 4.11). Um weitere Details zu erfassen, wurden in einigen Fällen bis zu 9 Aufnehmer am halben Umfang installiert. Werden Strähnen in senkrechten Leitungen erwartet, müssen die Aufnehmer über den ganzen Umfang verteilt werden. In solchen Fällen sind bis zu 8 Thermoelemente am Umfang üblich.

Die Höhe des Schichtungsmomentes hängt aber nicht nur von der Lage der Grenzschicht, sondern auch von der Erstreckung der Temperaturschichtung in Rohrlängsrichtung ab. Wo die Kenntnis dieser Länge von Bedeutung ist (das betrifft besonders lange horizontale Abschnitte), sollten daher mehrere Messebenen im schichtungsgefährdeten Bereich der Rohrleitung installiert werden. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die genaue Kenntnis der Neigung, mit der der horizontale Rohrabschnitt verlegt wurde.

Anlage 4.1**Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre**

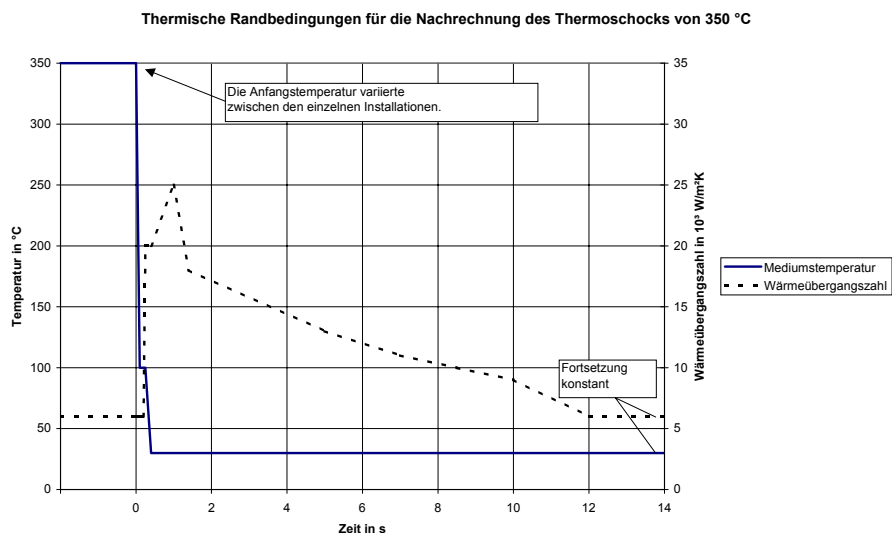
(nach VDI Wärmeatlas, Ausgab. 1991, Blatt Gb6 u. Gb7)

Stoffwerte von Wasser bei 25 °C

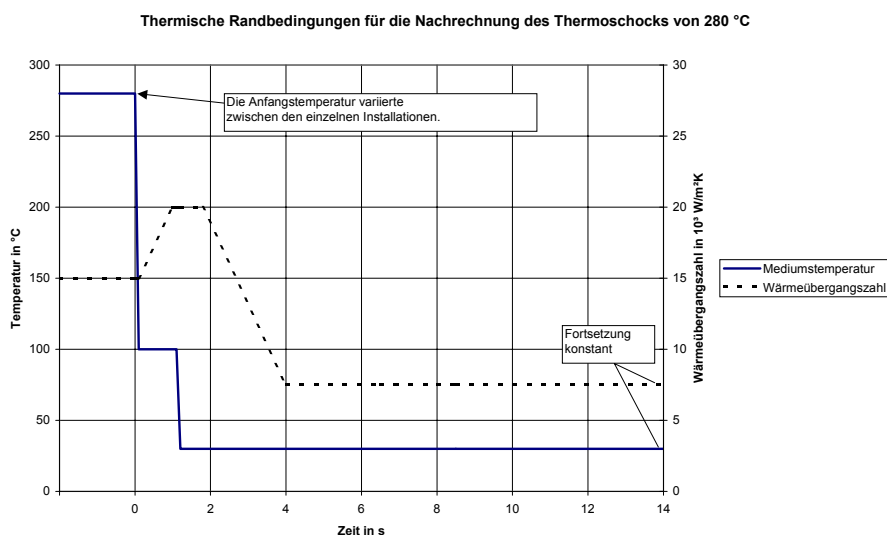
Dynamische Viskosität [kg/m s]	8,90E-04		
Prandtl-Zahl	6,1		
Wärmeleitfähigkeit [W/m K)	0,607		
Rohrinnendurchmesser [m]	0,073		
Anlaufänge [m]	3		
Massendurchsatz [kg/s]	7,5	7	6,5
Stömunsquerschnitt [m ²]	4,19E-03		
Reynoldszahl Re	1,47E+05	1,37E+05	1,27E+05
ζ-Wert (Gl. 25, Gb7)	1,66E-02	1,68E-02	1,71E-02
Zähler d. Gl. 24, Gb7	2001	1893	1784
Nenner d. Gl. 24, Gb7	2,35	2,36	2,37
Nußelt-Zahl	850	801	752
Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]	7071	6662	6251

Anlage 4.2

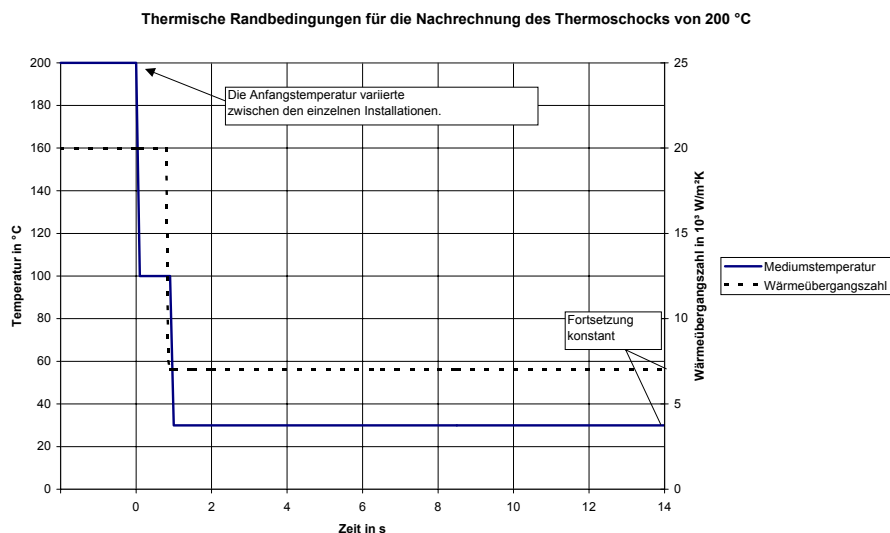
Thermische Randbedingungen für die 6-Uhr-Position



Thermische Randbedingungen für Versuch 1 (6-Uhr-Position)



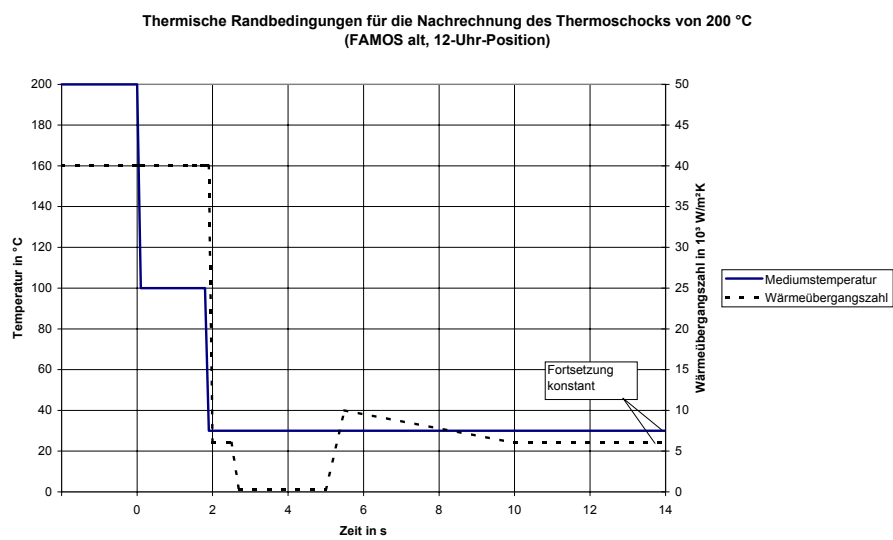
Thermische Randbedingungen für Versuch 2a (6-Uhr-Position)



Thermische Randbedingungen für Versuch 3 (6-Uhr-Position)

Anlage 4.3

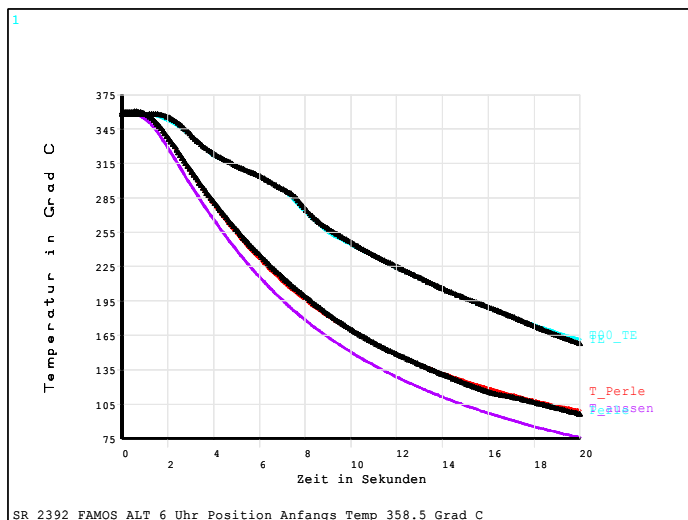
Thermische Randbedingungen für die 12-Uhr-Position



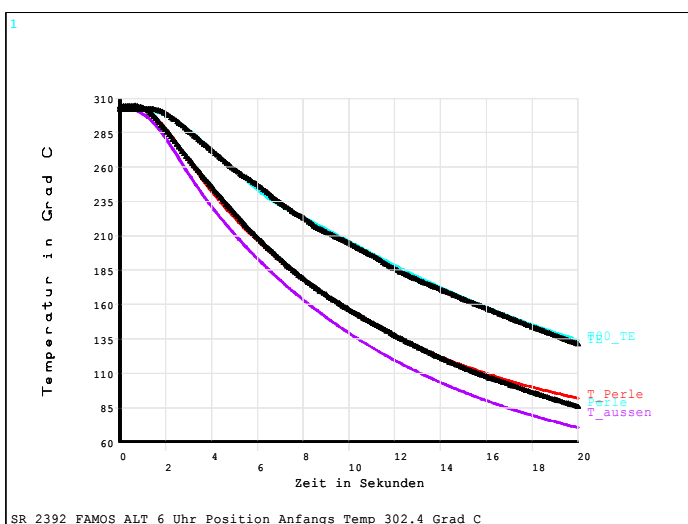
Thermische Randbedingungen für Versuch 3 (12-Uhr-Position)

Anlage 4.4

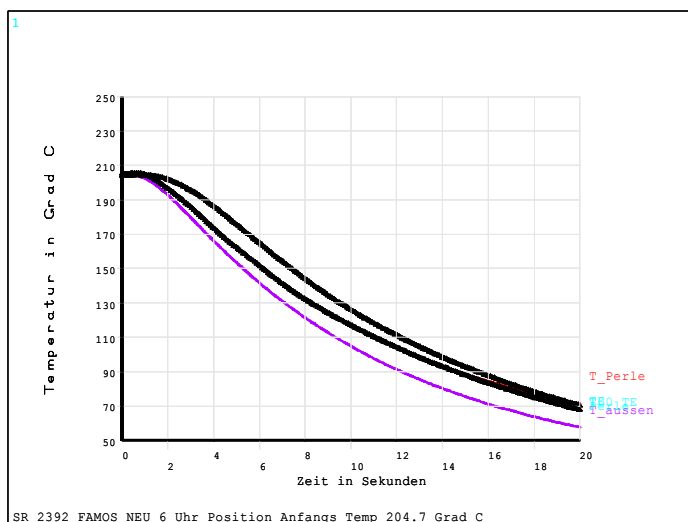
Vergleich Messung-Rechnung für FAMOS alt



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 1 (Thermoschock von 350°C)



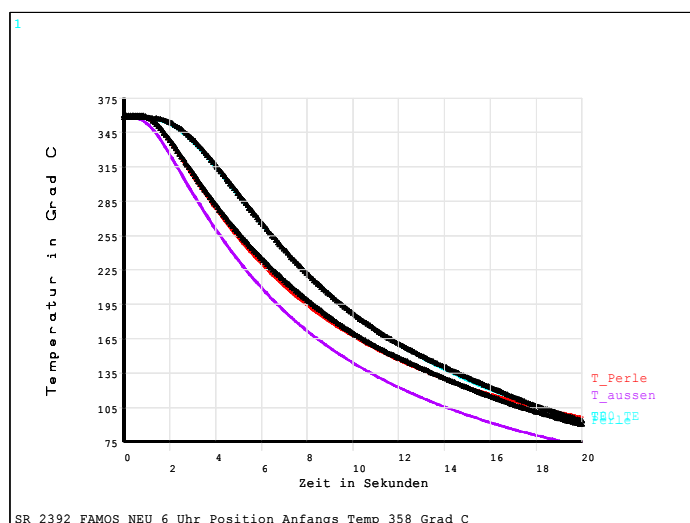
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 2a (Thermoschock von 280°C)



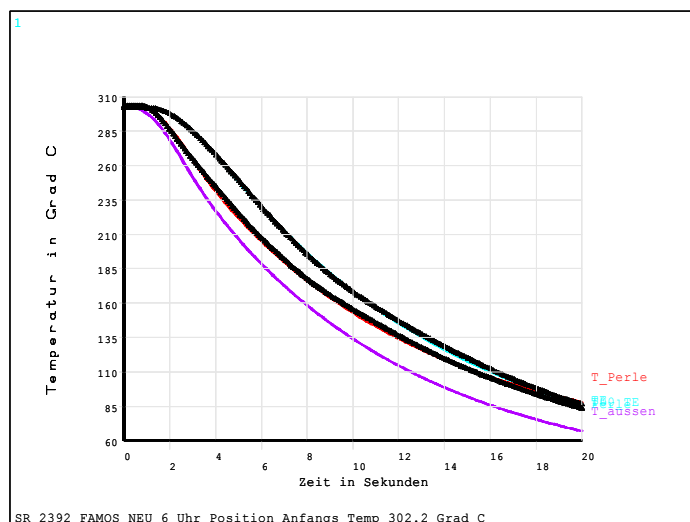
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.5

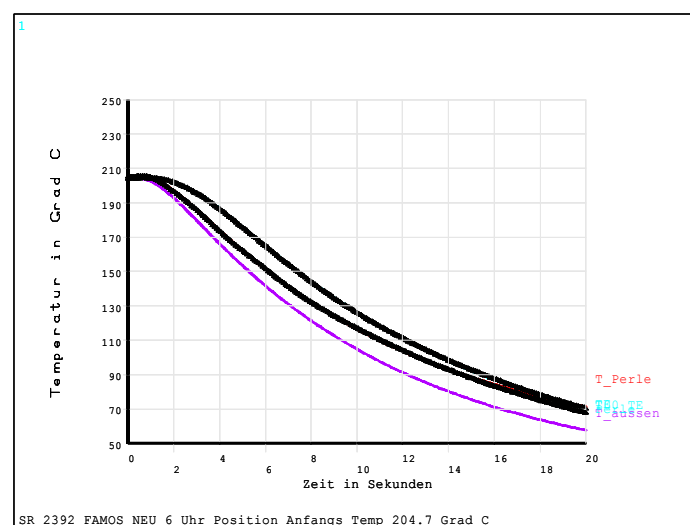
Vergleich Messung-Rechnung für FAMOS neu



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 1 (Thermoschock von 350°C)



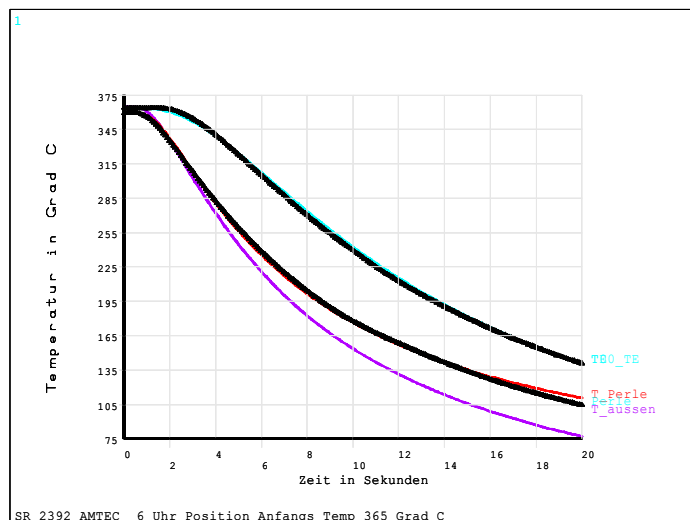
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 2a (Thermoschock von 280°C)



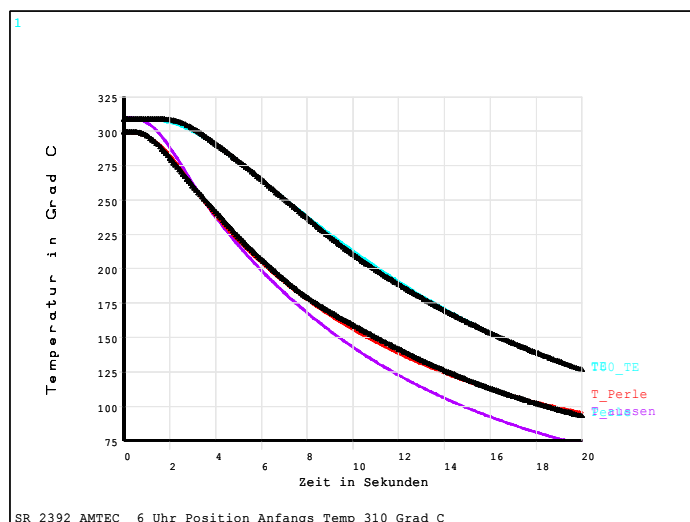
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.6

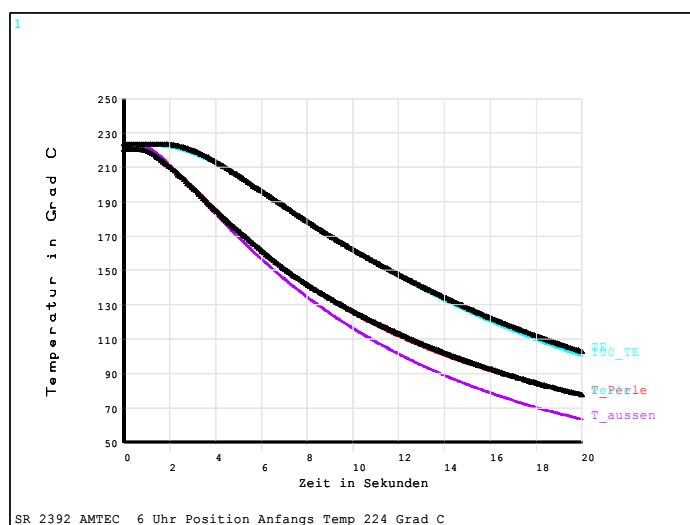
Vergleich Messung-Rechnung für AMTEC



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 1 (Thermoschock von 350°C)



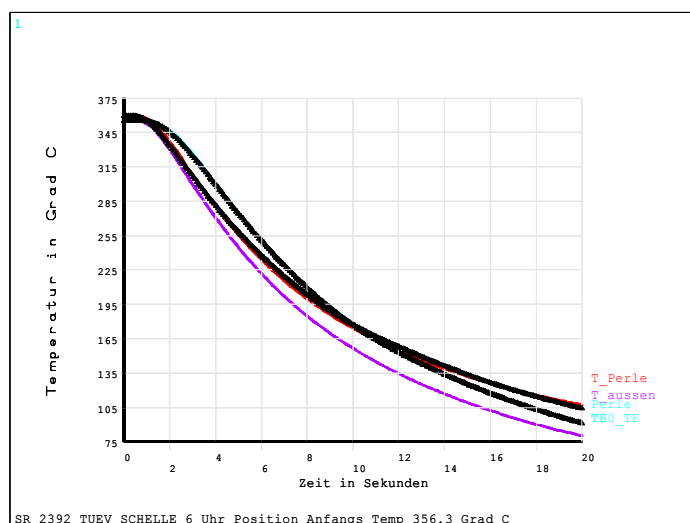
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 2a (Thermoschock von 280°C)



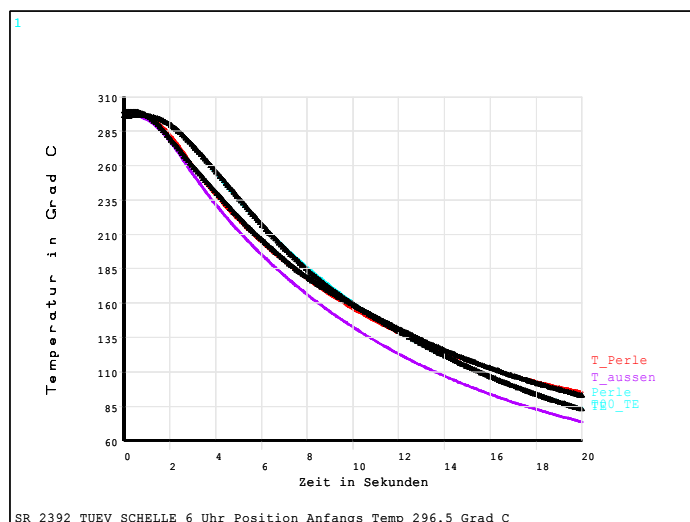
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.7

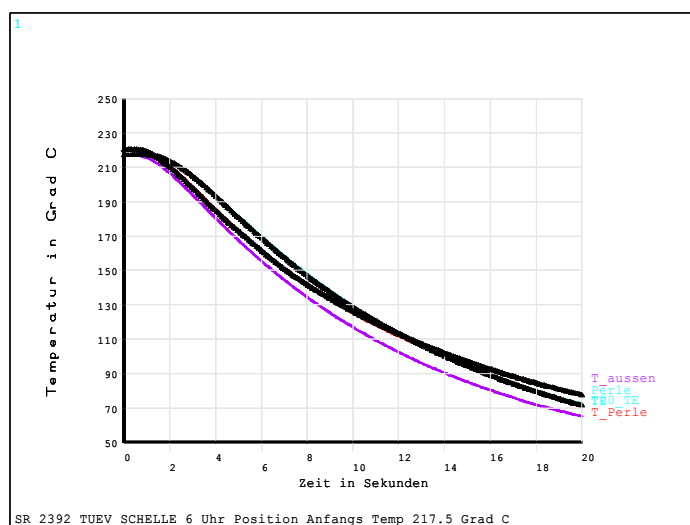
Vergleich Messung-Rechnung für TÜV Schelle



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 1 (Thermoschock von 350°C)



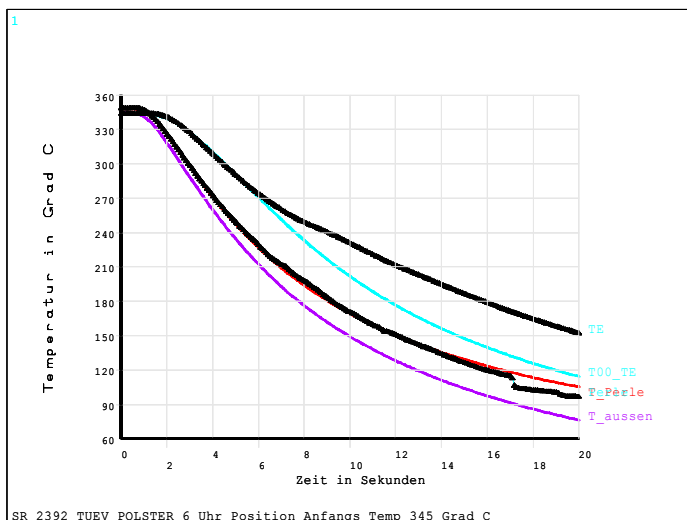
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 2a (Thermoschock von 280°C)



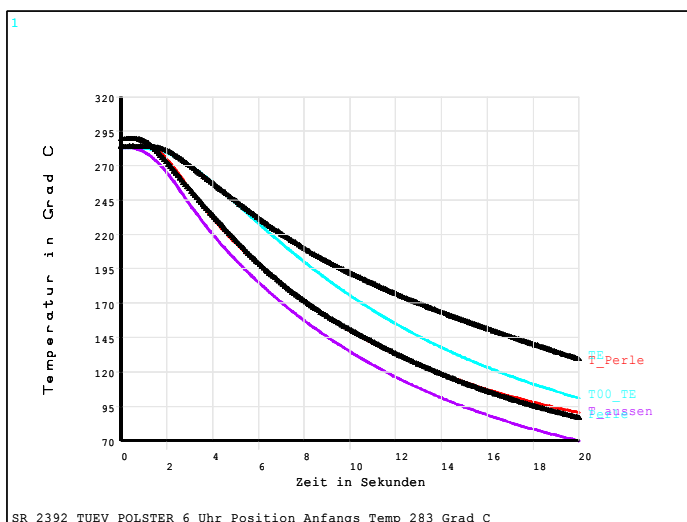
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.8

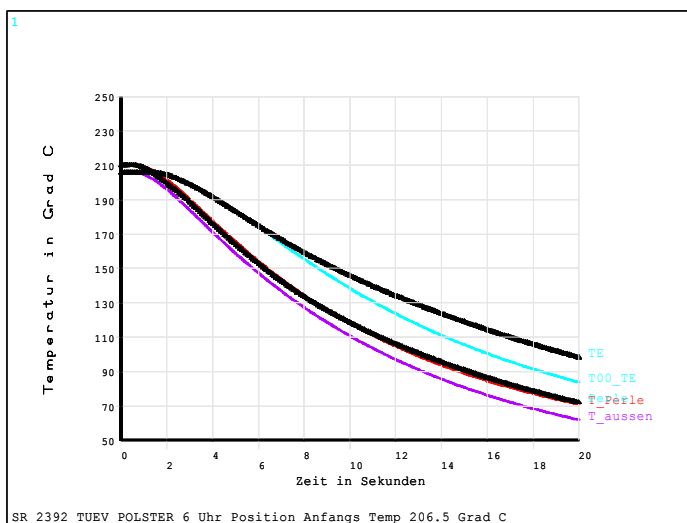
Vergleich Messung-Rechnung für TÜV Polster



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 1 (Thermoschock von 350°C)



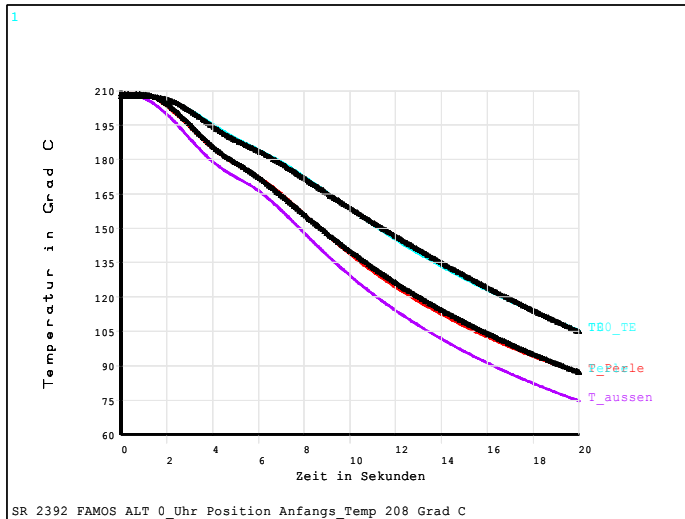
Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 2a (Thermoschock von 280°C)



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.9

Vergleich Messung-Rechnung für FAMOS alt (12-Uhr-Position) am Beispiel des Versuchs 3



Vergleich Messung-Rechnung für Versuch 3 (Thermoschock von 200°C)

Anlage 4.10**Einflussgrößen auf die gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten**

Allgemein hängen die mit einer der Installationen gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten neben dem Design der Installation selbst ab

- von der Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums
- von der Höhe der Mediumstemperaturänderung
- von der Wanddicke des Rohres
- von der Fließgeschwindigkeit des Mediums
- von der Art des Mediums (Wasser, Dampf, Inertgas) und
- von den thermischen Eigenschaften des Rohrmaterials (Austenit oder Ferrit).

Eine allgemeine Beziehung zwischen diesen Einflussgrößen und den mit den Installationen gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten (und damit auch mit den im Kapitel 3 aus den Versuchen ermittelten Gradientenverhältnissen aus den mit den Installationen gemessenen Temperaturen und den zugehörigen Oberflächentemperaturen) kann nicht in geschlossener Form angegeben werden, sondern erfordert für jeden konkreten Fall das Lösen der Differentialgleichung der Wärmeleitung. Im Folgenden werden einige dieser Einflussgrößen näher diskutiert:

Als Extremwerte der Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums treten einerseits der Temperatursprung (idealer Thermoschock, siehe **Bild 4.12**) und andererseits die quasistationäre Temperaturänderung (zeitlich konstante Temperaturänderung über so lange Zeit, dass die Außenwand-Temperatur der Mediumstemperatur mit gleicher Geschwindigkeit folgt, siehe **Bild 4.13**) auf. In den Bildern sind nur prinzipielle Innen- und Außentemperaturverläufe dargestellt. Temperaturverläufe, die mit einem (nicht ideal befestigten) Thermoelement ermittelt werden, verhalten sich dabei wie Außenwandtemperaturen bei einer etwas größeren als der originalen Wanddicke. Im Rahmen der Versuche wurden (fast ideale) Thermoschocks untersucht und die im Kapitel 3 angegebenen Gradientenverhältnisse gefunden. Wie in Bild 4.13 zu erkennen ist, ergibt sich im anderen Extremfall, der quasistationären Temperaturänderung, immer ein Gradientenverhältnis von 1,0 (siehe auch Literatur am Ende dieser Anlage). Kraftwerksmesswerte decken das gesamte Spektrum zwischen diesen Extremwerten ab, wobei Thermoschocks nur in einzelnen Systemen auftreten. Ideale Thermoschocks gibt es in der Realität nicht.

Da im Kraftwerk aus der Kenntnis der thermohydraulischen Prozesse im Allgemeinen die Zeitspanne bekannt ist, in der Mediumstemperaturänderungen ablaufen, hängt die Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums in der Praxis auch von der Höhe der Mediumstemperaturänderung ab. Diese wird als indirekte Einflussgröße hier aber nicht weiter betrachtet.

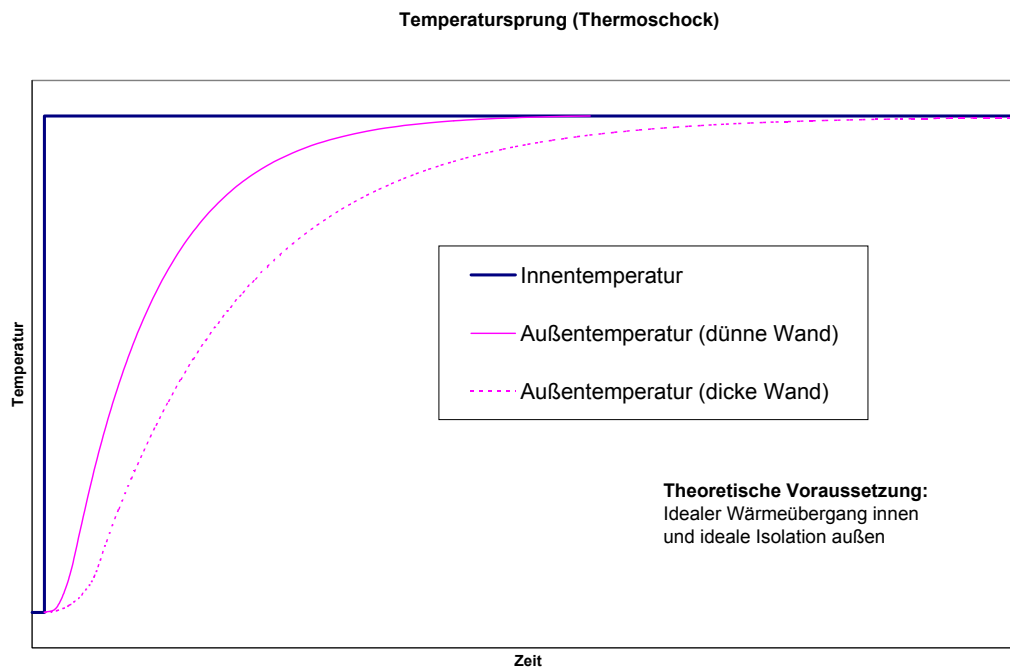


Bild 4.12: Idealer Thermoschock

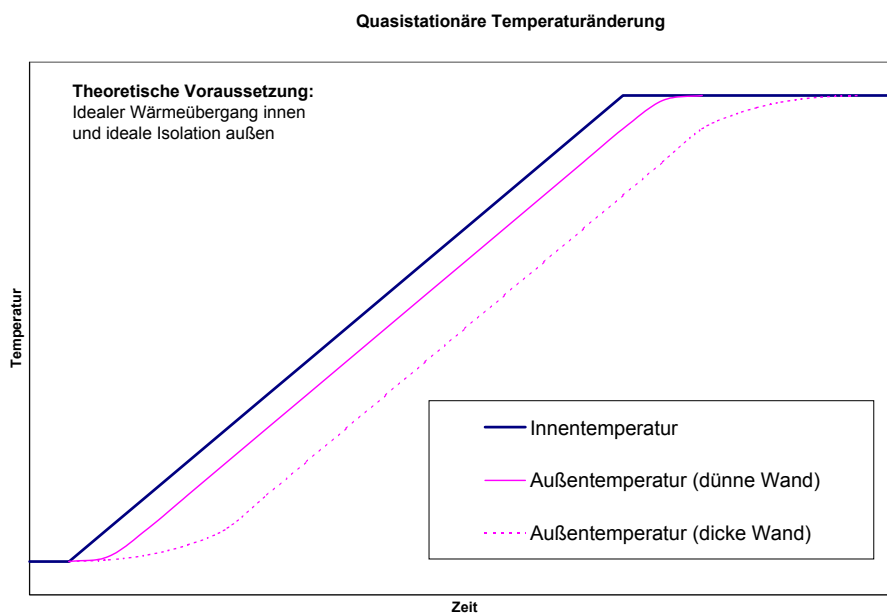


Bild 4.13: Quasistationäre Temperaturänderung

Die Rohrwalldicke beeinflusst wesentlich die Zeitspanne, die nötig ist, damit sich ein quasistationärer Zustand ausbilden kann (Bild 4.13). Ein dünnwandiges Rohr „reagiert“ schneller als ein dickwandiges, d. h. die Änderung des Außenwandgradienten erfolgt in einem dickwandigen Rohr langsamer (Beim Erreichen des qua-

sistationären Zustandes ändert sich der Gradient der Außenwandtemperatur nicht mehr). Im Falle des idealen Thermoschocks ist der erreichte maximale Außenwandgradient im dünnwandigen Rohr größer als im dickwandigen. Auch hier gilt, dass die Änderung des Außenwandgradienten in einem dickwandigen Rohr langsamer erfolgt (Bild 4.12). Auf der anderen Seite hängen die diskutierten Gradientenverhältnisse (Korrekturfaktoren) zwischen Außenwand und Thermoelement nicht vom Außenwandgradienten selbst, sondern von dessen zeitlicher Änderung ab. Für vergleichbare thermische Vorgänge ergeben sich somit die größten Unterschiede zwischen dem Gradienten an Außenwand und Thermoelement (Korrekturfaktoren) für dünnwandige Rohre, da in diesen die physikalisch mögliche Änderung des Außenwandgradienten größer ist als in dickwandigen. Daher wurden für die Versuche dünnwandige Rohre ausgewählt.

Fließgeschwindigkeit und Art des Mediums beeinflussen die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Medium und Innenwand. Bei schlechtem Wärmeübergangskoeffizienten (z. B. beim Vorhandensein von Inertgas als Medium) wird eine Temperaturänderung im Medium nur sehr abgeschwächt (im Extremfall gar nicht) an die Rohrinnenoberfläche „weitergegeben“, was natürlich den Gradienten an der Außenwand ebenfalls reduziert.

Die thermischen Eigenschaften des Rohrmaterials beeinflussen die gemessenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten in der Praxis deutlich weniger als die anderen genannten Einflussgrößen. Sie lassen sich als Temperaturleitzahl a ausdrücken

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

mit λ - Wärmeleitfähigkeit, ρ - Dichte und c – spezifische Wärmekapazität des Rohrmaterials. Je kleiner diese Temperaturleitzahl des Rohrwerkstoffes ist, desto größer (näher an 1,0) wird (bei sonst gleichen Bedingungen) das Gradientenverhältnis zwischen Thermoelement und Außenwand.

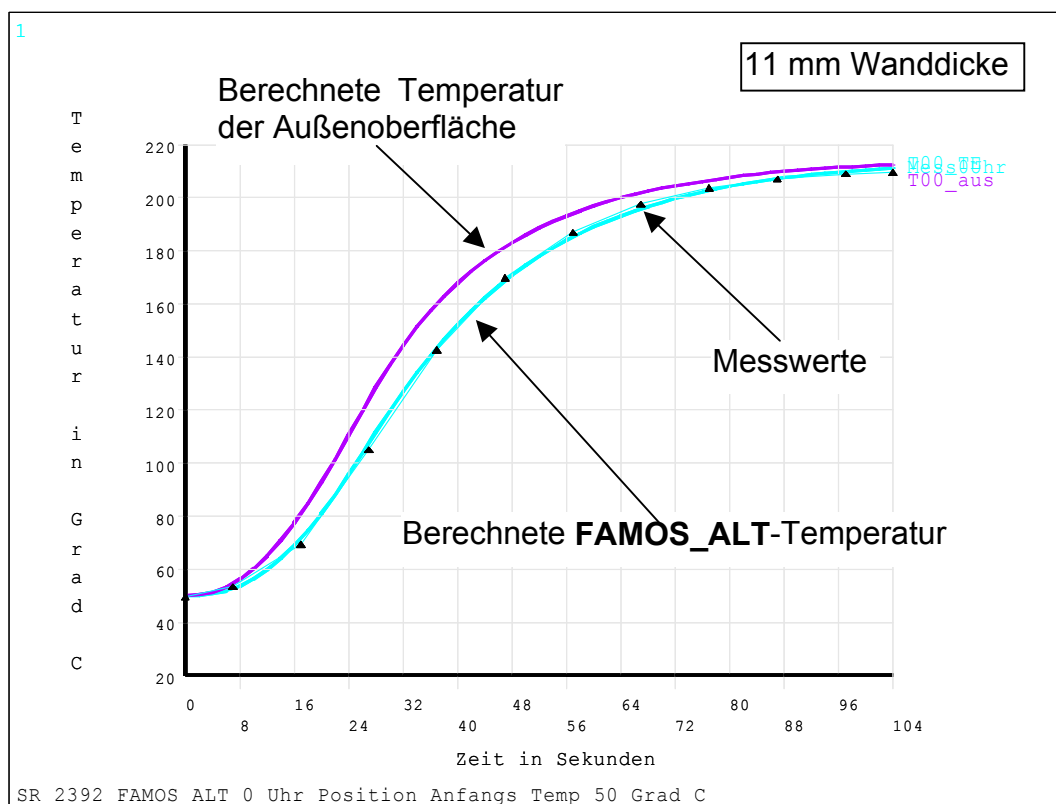
Literatur:

- Stieper, K., Temperaturen und Temperaturdifferenzen in Platten und Zylindern bei Sprung und linearem Anstieg der Umgebungstemperatur, Wissenschaftl. Zeitschrift der Universität Rostock, Math.-Naturwiss. Reihe, Band 22 (1973) Heft 4/5, S. 575-587
- Pich, R., Die Berechnung der elastischen instationären Wärmespannungen in Platten, Hohlzylindern und Hohlkugeln mit quasistationären Temperaturfeldern, VGB-Mitteilungen Heft 87, 12/1963, S. 373-383 und Heft 88, 02/1964, S. 53-60

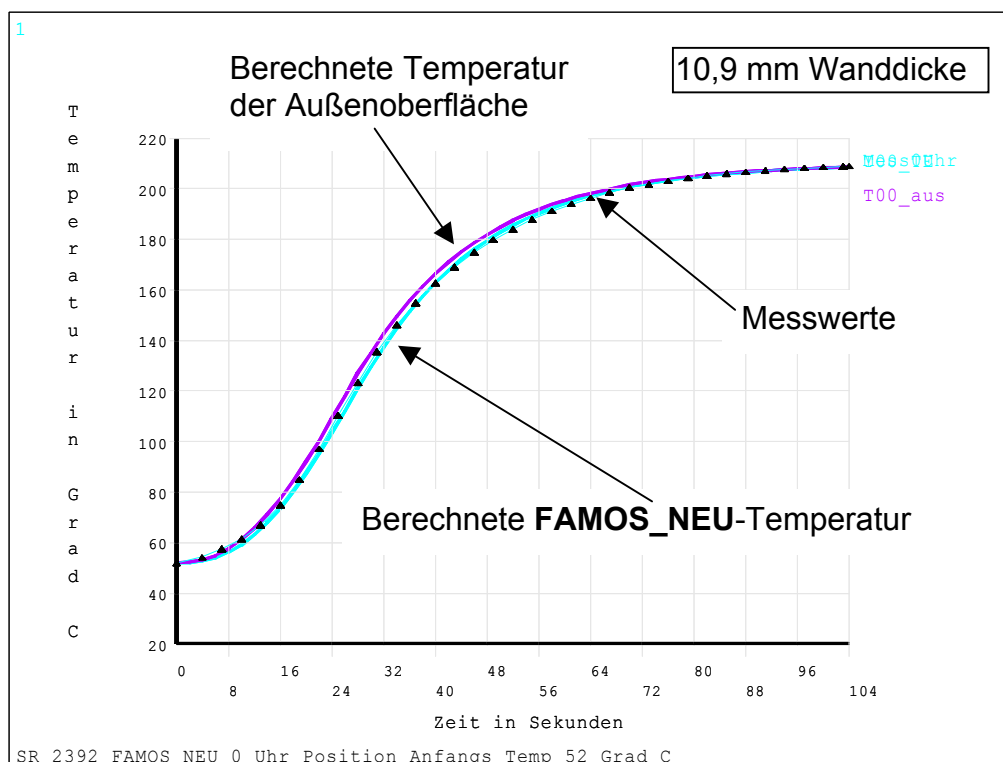
Anlage 4.11

Gegenüberstellung FAMOS alt – FAMOS neu

Ende eines Hilfssprühvorgangs (Oberflächengradient 4,6 K/s)



FAMOS alt: Max. gemessener Gradient 4,0 K/s

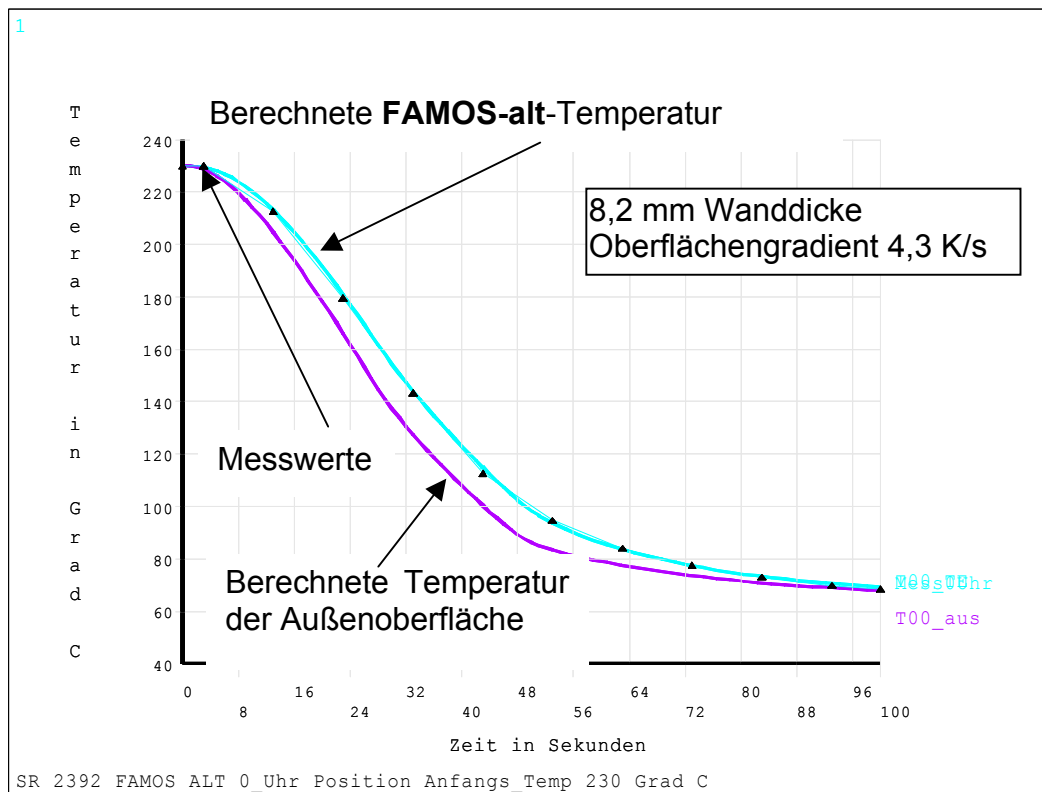


FAMOS neu: Max. gemessener Gradient 4,4 K/s

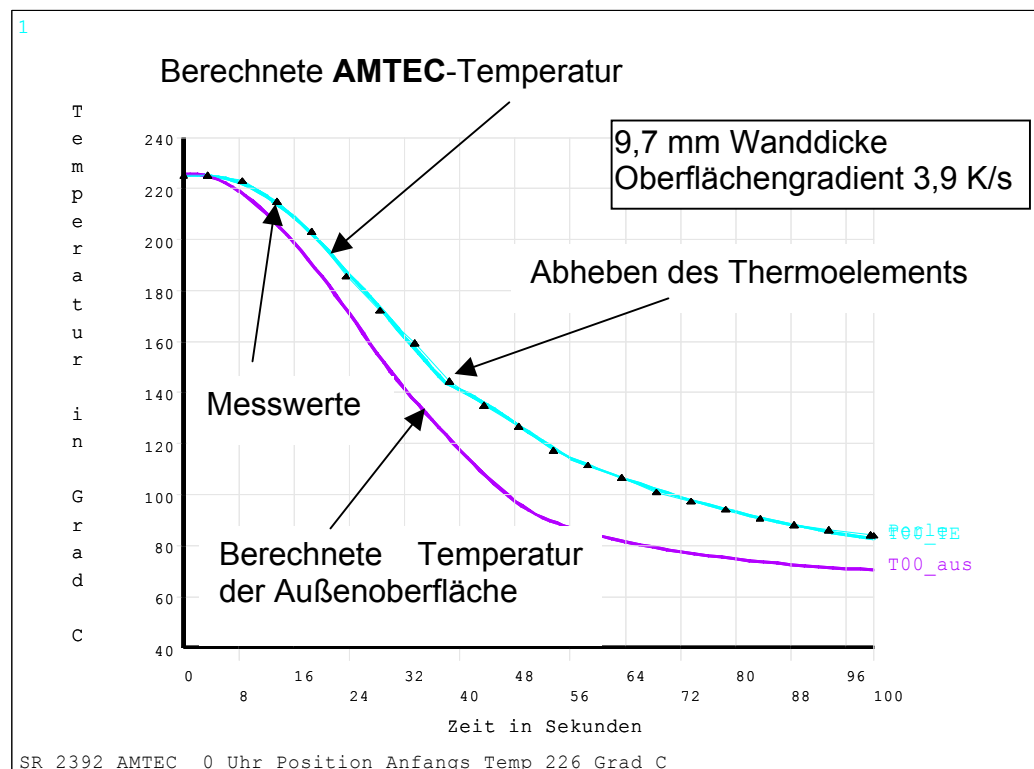
Anlage 4.12

Gegenüberstellung FAMOS alt – AMTEC

Hilfssprühvorgang mit ca. 3 kg/s (max. Oberflächengradient 4,3 K/s)



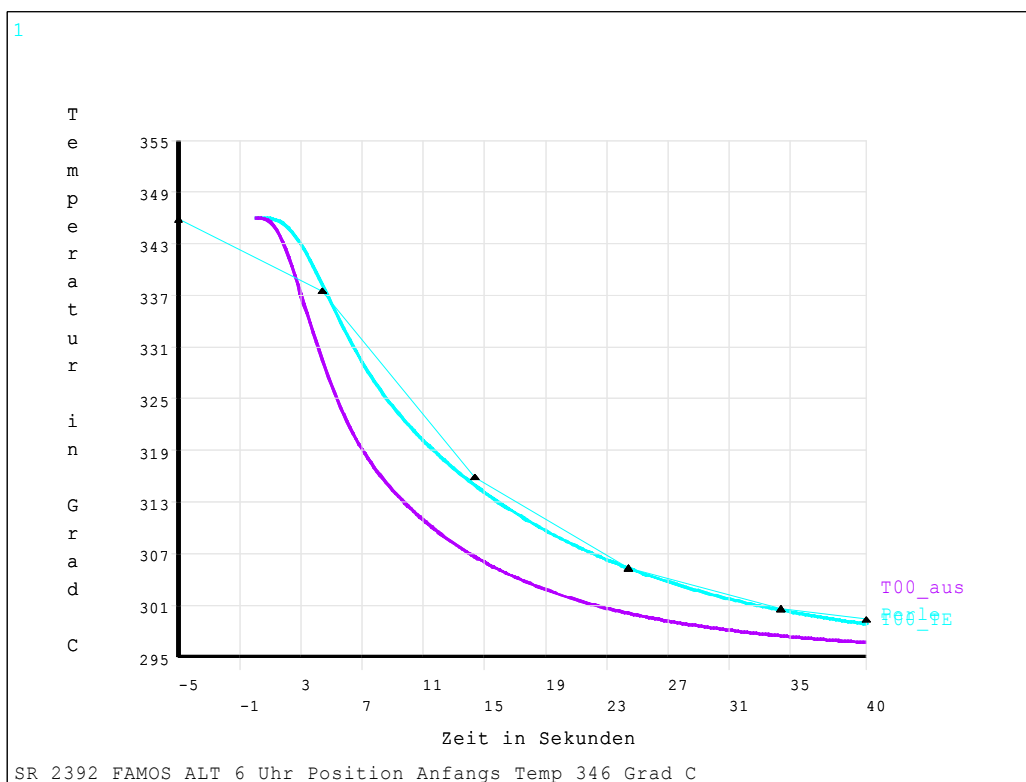
FAMOS alt: Max. gemessener Gradient 3,9 K/s



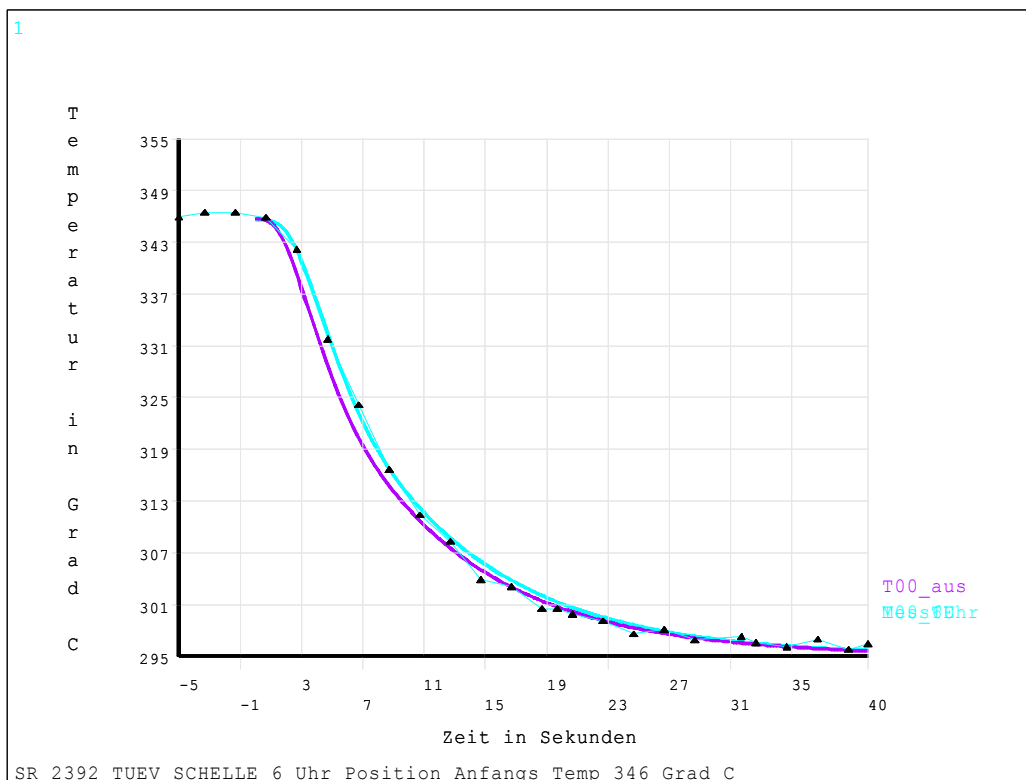
AMTEC: Max. gemessener Gradient 3,2 K/s

Anlage 4.13

**Gegenüberstellung FAMOS alt – TÜV Schelle
Sprühen mit 12 kg/s (Oberflächengradient 5,5 K/s)**



FAMOS alt: Max. gemessener Gradient 2,2 K/s

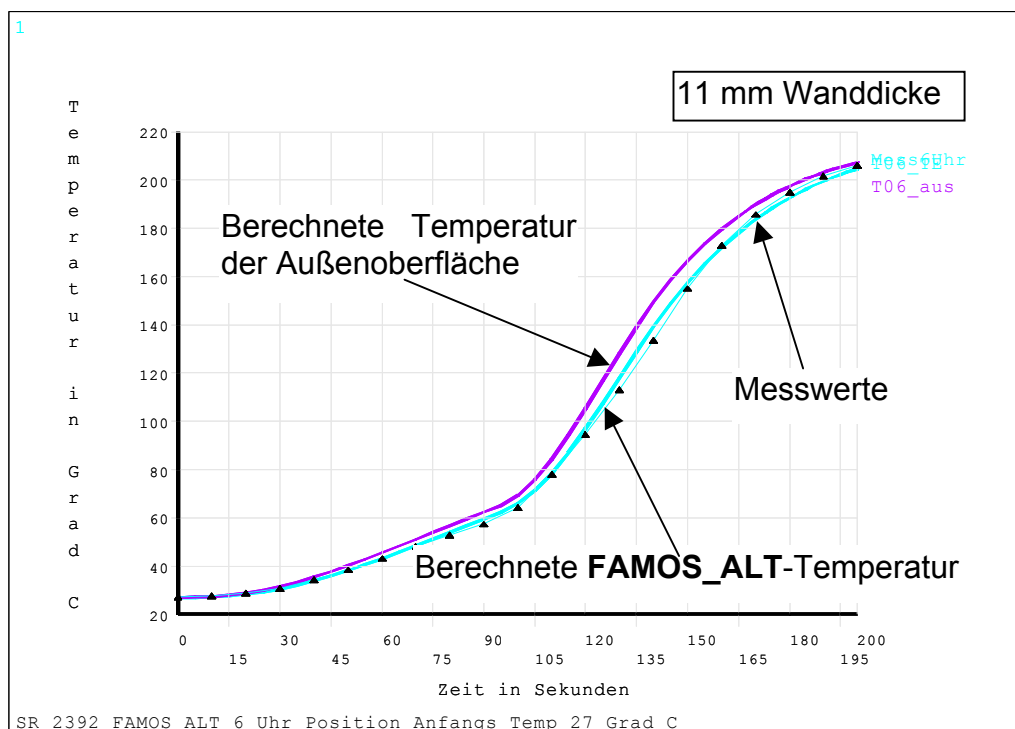


TÜV Schelle: Max. gemessener Gradient 5,1 K/s

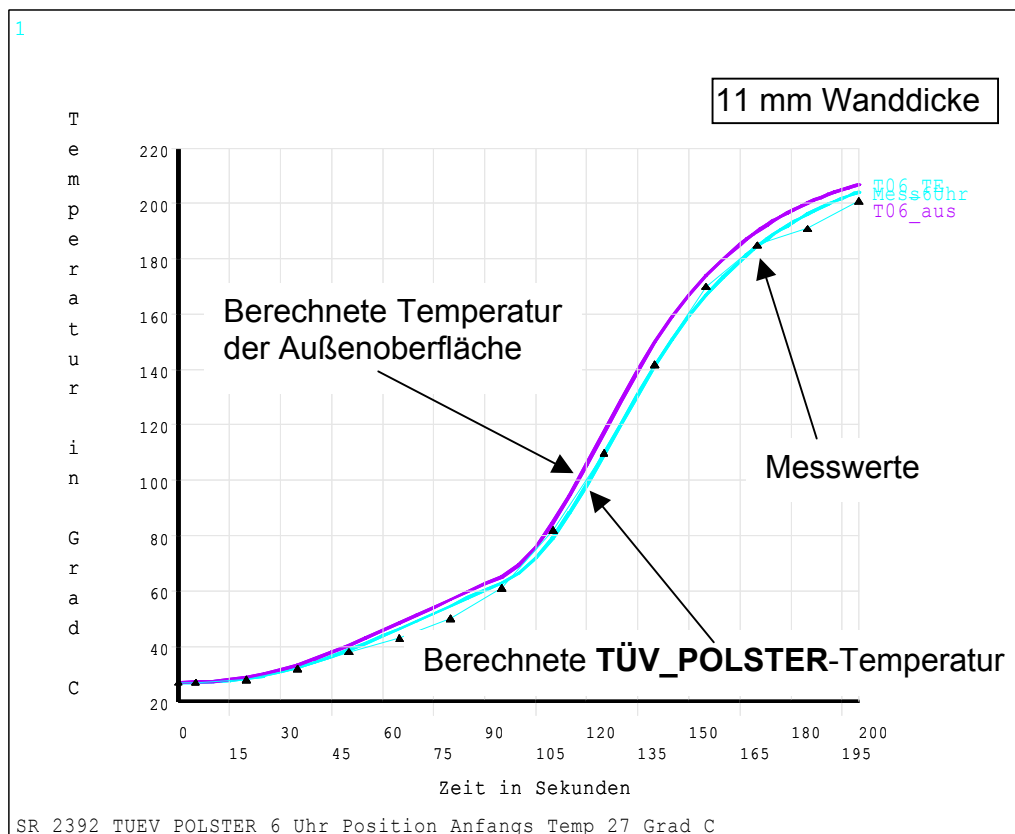
Anlage 4.14

Gegenüberstellung FAMOS alt – TÜV Polster

Ende eines TW-Sprühvorgangs (Oberflächengradient 2,3 K/s)



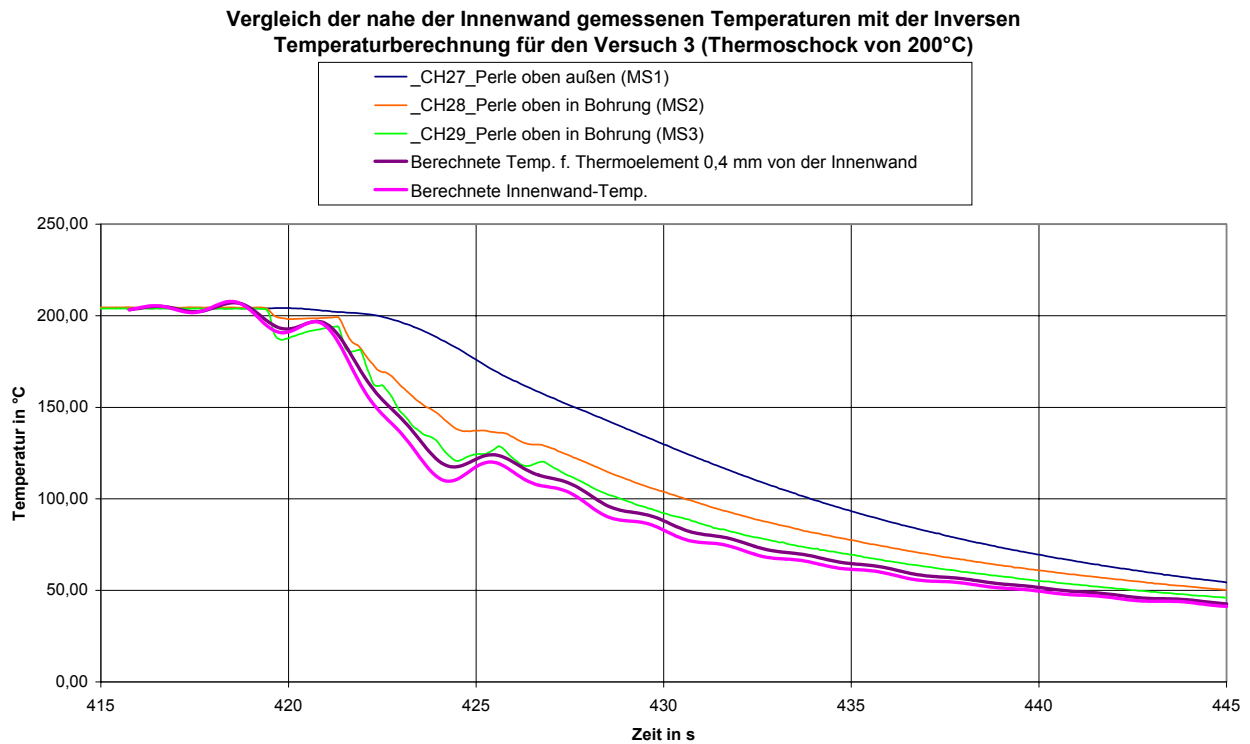
FAMOS alt: Max. gemessener Gradient 2,1 K/s



TÜV Polster: Max. gemessener Gradient 2,2 K/s

Anlage 4.15

Vergleich von gemessener und berechneter Temperatur nahe der Innenwand



Voraussetzungen für die Inverse Temperaturberechnung:

- Temperatur der Perle oben außen = Oberflächentemperatur
- Konstante Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- Konstante Dichte $\rho = 7900 \text{ kg}/\text{m}^3$

5 Empfehlungen

5.1 Messtechnik

5.1.1 Verbesserung der Installationen

Die Ergebnisse der Gradientenauswertung für die experimentellen Untersuchungen sind in der Tabelle 3.10 aus Kapitel 3.7 zusammengefasst. Das unterschiedliche Ansprechverhalten der Installationen bei schnellen Temperaturänderungen beruht auf den unterschiedlich guten Wärmeübertragungseigenschaften der Verbindung zwischen Thermoelement und Rohroberfläche und damit der Übertragung eines Temperaturgradienten - z.B. durch Abkühlung - vom Rohr auf das Thermoelement:

Das beste Ansprechverhalten zeigt die "TÜV Schelle", bei der das Thermoelement mit einer kleinen Schelle direkt auf dem Rohr befestigt wird. Dabei liegt das Thermoelement einerseits mit seiner untersten Mantellinie auf dem Rohr, wird aber auch um 180° von der Schelle umschlungen, so dass die Temperaturänderung des Thermoelements von diesen beiden Wärme- (bzw. Abkühlungs-) Quellen bestimmt wird. Allerdings zeigt auch diese Installation noch eine deutliche Abweichung von dem tatsächlichen Gradienten der Rohroberfläche, wie in der Tabelle angegeben.

Es folgt die Installation "FAMOS neu", die im Prinzip der TÜV Schelle entspricht, aber zur Abnehmbarkeit auf einem Spannband statt unmittelbar auf dem Rohr befestigt ist. Aus der auf diese Weise etwas „vergrößerten Wanddicke“ resultiert eine leichte zusätzliche Trägheit.

Die restlichen drei Installationen "FAMOS alt", "AMTEC" und "TÜV Polster" zeigen ein vergleichbares Ansprechverhalten. Bei ihnen erfolgt eine direkte Übertragung der Temperaturänderung von der Rohroberfläche auf das Thermoelement nur über die unterste Mantellinie. Bei diesen Installationen liegen auf einer gewissen Fläche im Bereich der obersten Mantellinie die thermisch trägen Spannbänder bzw. Isolationskissen an und bestimmen die Trägheit der Installation.

Auch die auf das Rohr aufgeschweißte Thermoelement-Perle zeigt noch nicht den maximalen Gradienten der Rohroberfläche, wenn die anschließenden Thermodrähte in Keramik-Röhrchen verlegt sind, abgesehen davon, dass diese Art der Anbringung für eine abnehmbare Installation nicht geeignet ist.

Die "echten" Oberflächen-Gradienten zeigten in Übereinstimmung mit der Berechnung Temperaturmessfolien, die aber nur zum Einsatz bis maximal 260°C geeignet sind.

Um das Ansprechverhalten der Installationen zu verbessern, sollten diese Erkenntnisse genutzt werden.

5.1.2 Abfragefrequenz

Natürlich werden die ermittelten Gradienten auch von der Abfragefrequenz beeinflusst (siehe auch Kapitel 4.6.3). Üblich sind heute wegen der hohen Datenmengen Abfragetakte von 1 bis 10 Sekunden.

Ergeben sich bei diesen Messungen Hinweise auf hohe Gradienten, so wird empfohlen, bei diesen einmal eine Sonderaufzeichnung unter Nutzung der vorhandenen Installation mit hoher Abfragefrequenz durchzuführen. Damit kann die tatsächliche Beanspruchung ermittelt werden und dann über die "langsame" Überwachung in ihrer Zyklenzahl erkannt und berücksichtigt werden.

5.1.3 Messstellenanordnung

Siehe Kapitel 4.7.

5.2 Messwertverarbeitung

5.2.1 Signalauswertung

Je höher die Abfragefrequenz gewählt wird, desto höhere Anforderungen werden auch an die Leistungsfähigkeit des anschließenden Auswertesystems gestellt hinsichtlich der Abstimmung von Auswertefrequenz der Abfrage und der Datenbereitstellungsdauer, der Genauigkeit der Zeitangabe u.s.w. Insbesondere kann es bei schlecht aufeinander abgestimmten Systemen dazu kommen, dass ein Temperatur-Messwert mehrfach abgespeichert wird und auf diese Weise zwei aufeinanderfolgende Zeitpunkte denselben Temperaturwert ausweisen. Bild 5.1 zeigt ein solches Beispiel, bei dem die Messwerte im 2-Sekunden-Takt erfasst wurden, wo aber im Verlaufe der weiteren Signalverarbeitung offensichtlich die korrekte zeitliche Zuordnung verloren geht. Daher entsteht im Endeffekt die dargestellte Treppenstufenkurve, die bei einer Auswertung hinsichtlich Temperaturänderungsgeschwindigkeiten zu Schwierigkeiten führt.

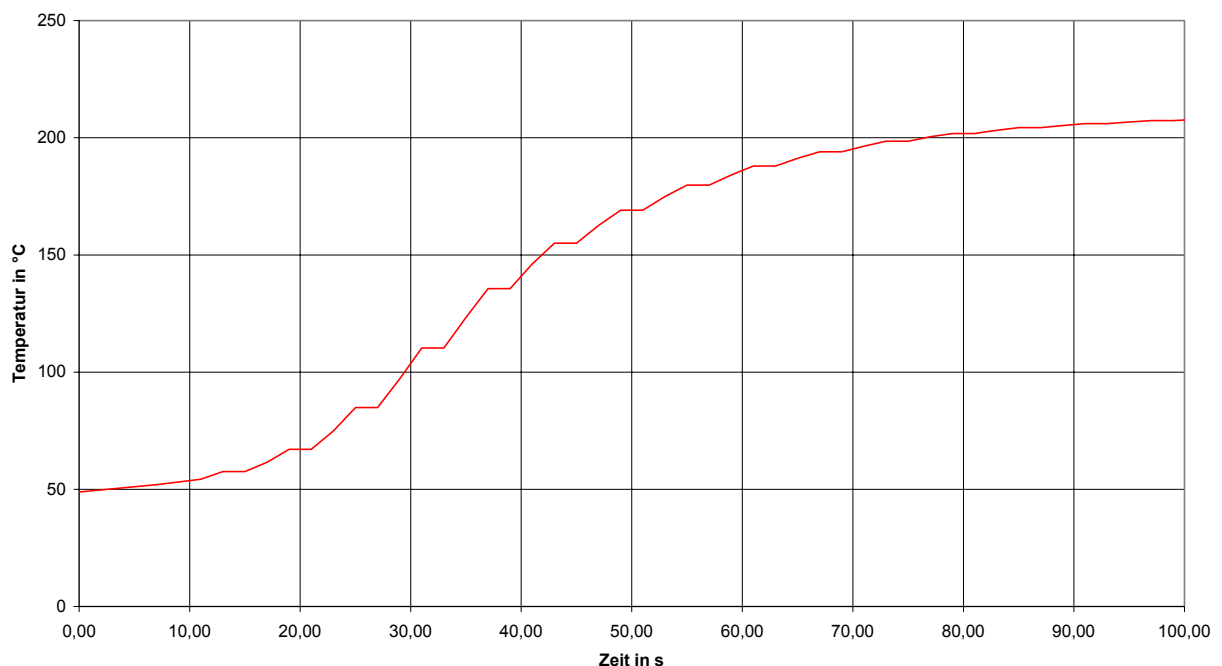


Bild 5.1: Beispiel einer Treppenstufenkurve

5.2.2 Berücksichtigung der Trägheit der Messinstallationen

5.2.2.1 Ermittlung der Temperaturverteilung in der Rohrwand

Um aus den mit den Installationen gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufen die für die Berechnung der thermischen Spannungen maßgebende Temperaturverteilung in der Rohrwand zu ermitteln, ist es erforderlich, im Berechnungsmodell die Trägheit der Thermoelement-Installation auf geeignete Weise zu berücksichtigen.

Im Ergebnis erhält man sowohl den Temperaturverlauf an der Rohraußenoberfläche als auch den Temperaturverlauf an der Rohrinneenseite sowie den zugehörigen Mediumstemperaturverlauf mit den anzusetzenden Wärmeübergangszahlen.

Welchen Einfluss die Trägheit der Thermoelement-Installation auf die Ergebnisse hat, hängt stark vom vermessenen Vorgang selbst und der untersuchten Rohrleitung ab. Während er bei quasistationären Vorgängen und in Rohrleitungen mit großer Wanddicke vernachlässigt werden kann, spielt er bei schockartigen Vorgängen mit hohen Wärmeübergangszahlen und in dünnwandigen Rohren eine große Rolle, die unbedingt zu berücksichtigen ist (siehe auch Anlage 4.10).

Wie im Kapitel 4 dargestellt, ist die Berücksichtigung dieser Trägheit mit Hilfe von FEM-Modellen, die den Aufbau der Messinstallation beinhalten, sehr gut möglich. Insbesondere kann man mit diesen Modellen die Messwerte jeder der betrachteten Mess-Installationen so auswerten, dass deren Trägheit eliminiert wird und die für die Bauteilermüdung maßgebenden thermischen Vorgänge im Rohrinneinneren ermittelt werden.

Durch entsprechende Anpassung der Berechnungsmodelle kann man auch Messwerte anderer Installationsarten verarbeiten. Bei der Modellierung ist zu beachten, dass alle maßgebenden Bestandteile der jeweiligen Installation mit ihren thermischen Eigenschaften berücksichtigt werden und besonders die Rohrwanddicke möglichst genau ermittelt und abgebildet wird.

Anlage 5.1 zeigt ein alternatives Verfahren, um unter Verwendung der im Kapitel 3 aus den Versuchen bestimmten Korrekturfaktoren ohne FEM-Modell eine konservative Temperaturverteilung in der Rohrwand sowie Mediumstemperaturverläufe im Rohrinneinneren zu ermitteln.

5.2.2.2 Korrekturfaktoren für die maximalen gemessenen Gradienten

Im Kapitel 3 wurden Korrekturfaktoren zur Umrechnung des maximalen mit der jeweiligen Installation gemessenen zeitlichen Temperaturgradienten auf den Maximalwert des Gradienten an der Rohr-Außenoberfläche angegeben. Grundlage dafür waren sowohl die Messergebnisse mit den Temperaturmessfolien als auch die mit den FEM-Berechnungen ermittelten Temperaturverläufe. Diese Faktoren gelten für die Versuchsbedingungen, d. h. für sehr schnelle Temperaturänderungen (Thermoschocks) mit hohen Wärmeübergangszahlen in austenitischen Rohren mit 8 bis 10 mm Wanddicke. Diese Bedingungen waren bei allen durchgeführten Versuchen erfüllt. Der Unterschied bestand lediglich in der Höhe der Mediums-Temperaturänderung. Diese wirkte sich auf die Größe des an der Rohr-Außenoberfläche „ankommenden“ maximalen Gradienten (und damit auch auf den mit den Installationen gemessenen) aus. Für die Versuchsbedingungen sind die genannten Korrekturfaktoren unabhängig vom gemessenen Gradienten (vgl. Bild 3.14 in Kapitel 3.7).

Sobald sich eine der maßgebenden Randbedingungen wesentlich ändert, d. h. bei

- anderer Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums (bis hin zum quasistationären Extremfall)
- anderer Wärmeübergangszahl (geringere Fließgeschwindigkeit und andere Art des Mediums, z. B. langsam fließende Leckströmung oder ruhender Dampf)
- anderer Wanddicke des Rohres (die Versuchsrohre entsprechen den Sprühleitungen, alle anderen ermüdungsrelevanten Systeme haben größere Wanddicken) und
- anderen thermischen Eigenschaften des Rohrmaterials (kein Austenit)

gelten andere Faktoren, weil alle diese Randbedingungen die Änderungsgeschwindigkeit des Temperaturgradienten an der Rohr-Außenwand beeinflussen. Die Korrekturfaktoren sind direkt abhängig von der Änderungsgeschwindigkeit des Temperaturgradienten an der Rohr-Außenwand (nicht vom Temperaturgradienten selbst), weil sich die Trägheit der Mess-Installation nur dann auswirkt, wenn sich der Außenwandgradient ändert (vgl. auch Anlage 4.10).

Wie im Kapitel 4 theoretisch und an Beispielen aus dem Kraftwerksbetrieb gezeigt, stellen die im Versuch ermittelten Korrekturfaktoren konservative Grenzwerte für im Kraftwerk auftretende Vorgänge dar. Zur genaueren Ermittlung des für den jeweils gemessenen Vorgang zutreffenden Korrekturfaktors eignen sich die im Kapitel 4 beschriebenen FEM-Modelle.

Zur Berechnung des maximalen Oberflächengradienten an der Rohraußenwand aus den Messwerten der Installationen müssen diese Korrekturfaktoren im Rahmen der Weiterverarbeitung der Messwerte berücksichtigt werden.

5.2.2.3 Einfluss der Installationsarten auf die Verfolgung der Bauteilermüdung

Alle verwendeten Installationsarten sind zur Zählung und Verfolgung der betrieblichen Vorgänge im Kraftwerk geeignet.

Bei der Wiedergabe von stationären Temperaturen und quasistationären Temperaturänderungen stimmen die mit den Installationen gemessenen Temperaturen unabhängig von der Installationsart stets mit den Außenwandtemperaturen überein. Auch in dickwandigen Rohrleitungen (z. B. Hauptkühlmittelleitung, Volumenausgleichsleitung) sind die Abweichungen zwischen den maximalen gemessenen Gradienten und den Außenwandgradienten vernachlässigbar (siehe auch Abschnitt 5.2.2.2). In diesen Fällen besteht also kein nennenswerter Einfluss der Installationsart auf die Ergebnisse der Ermüdungsberechnung.

Die unterschiedliche Trägheit der Installationen führt nur in dünnwandigen Rohrleitungen (z. B. Sprühleitungen) und bei schnellen Transienten zu Mess-Signalen, die vom Temperaturverlauf der Außenoberfläche nennenswert abweichen, und somit auch zu kleineren gemessenen Gradienten. Für diese Fälle ist es daher im Rahmen der Umsetzung der gemessenen Temperaturverläufe in Belastungsannahmen zur Temperaturfeld- und Spannungsberechnung sowie bei der Ermüdungsbewertung konkreter Vorgänge erforderlich, die unterschiedliche Trägheit der Installationen mit geeigneten Werkzeugen zu berücksichtigen. Solche Werkzeuge stehen z. B. in Form der verwendeten FE-Modelle zur Verfügung (vgl. Kapitel 4).

Anlage 5.1

Bestimmung der thermischen Vorgänge im Rohrrinneren aus den im Kapitel 3 ermittelten konservativen Korrekturfaktoren

Im Folgenden wird eine Möglichkeit dargestellt, um aus einem gemessenen Temperaturverlauf und den im Kapitel 3 ermittelten konservativen Korrekturfaktoren auf Vorgänge im Rohrrinneren zu schließen. Dazu sind folgende Schritte nötig:

1. Mit den konservativen Korrekturfaktoren lt. Kapitel 3 wird aus der maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeit (Gradient) eines gemessenen zeitlichen Temperaturverlaufs $v_{\max, \text{Thermoelement}}$ ein maximaler konservativer Außenwand-Gradient $v_{\max, \text{Außenwand}}$ errechnet.
2. Durch Stauchung der Zeitachse des gemessenen Temperaturverlaufs um den o.g. Korrekturfaktor erhält man einen Außenwand-Temperaturverlauf mit der maximalen Temperaturänderungsgeschwindigkeit $v_{\max, \text{Außenwand}}$.
3. Durch Anwendung der inversen Temperaturberechnung (vgl. Kapitel 4.4) bestimmt man ein dazugehöriges Temperaturfeld in der Rohrwand.
4. Die Ermittlung des zugehörigen, auf Grund der „Zeitstauchung“ immer konservativen Mediums-Temperaturverlaufes erfordert die Abschätzung einer Wärmeübergangszahl für den Wärmeübergang vom Medium auf die Rohrrinnenwand.

Folgende Unsicherheiten sind in dem beschriebenen Verfahren enthalten:

1. Konservativität des Korrekturfaktors (siehe Kapitel 5.2.2.2)
2. Anwendung des Korrekturfaktors auf den gesamten Temperatur-Zeitverlauf (eigentlich gilt er nur für den Zeitpunkt des maximalen Gradienten)
3. Verfahrensbedingte Annahme von zeitlich konstanten Materialeigenschaften für die inverse Temperaturberechnung (In Wirklichkeit sind diese Eigenschaften temperaturabhängig)
4. Annahme einer Wärmeübergangszahl für den Wärmeübergang vom Medium auf die Rohrrinnenwand

Im allgemeinen ist eine iterative Bestimmung der Wärmeübergangszahlen nötig, um physikalisch plausible Ergebnisse zu erhalten.

Dieses Berechnungs-Verfahren ergibt bei nicht plausiblen Eingangsgrößen (Außenwand-Temperaturverlauf, Materialeigenschaften bzw. Wärmeübergangszahlen) physikalisch unsinnige Temperaturverläufe an der Rohrrinnenwand. Die Stauchung des gesamten Temperatur-Zeitverlaufs kann dazu führen, dass es mit dieser Methode überhaupt nicht möglich ist, plausible Ergebnisse zu erhalten.