

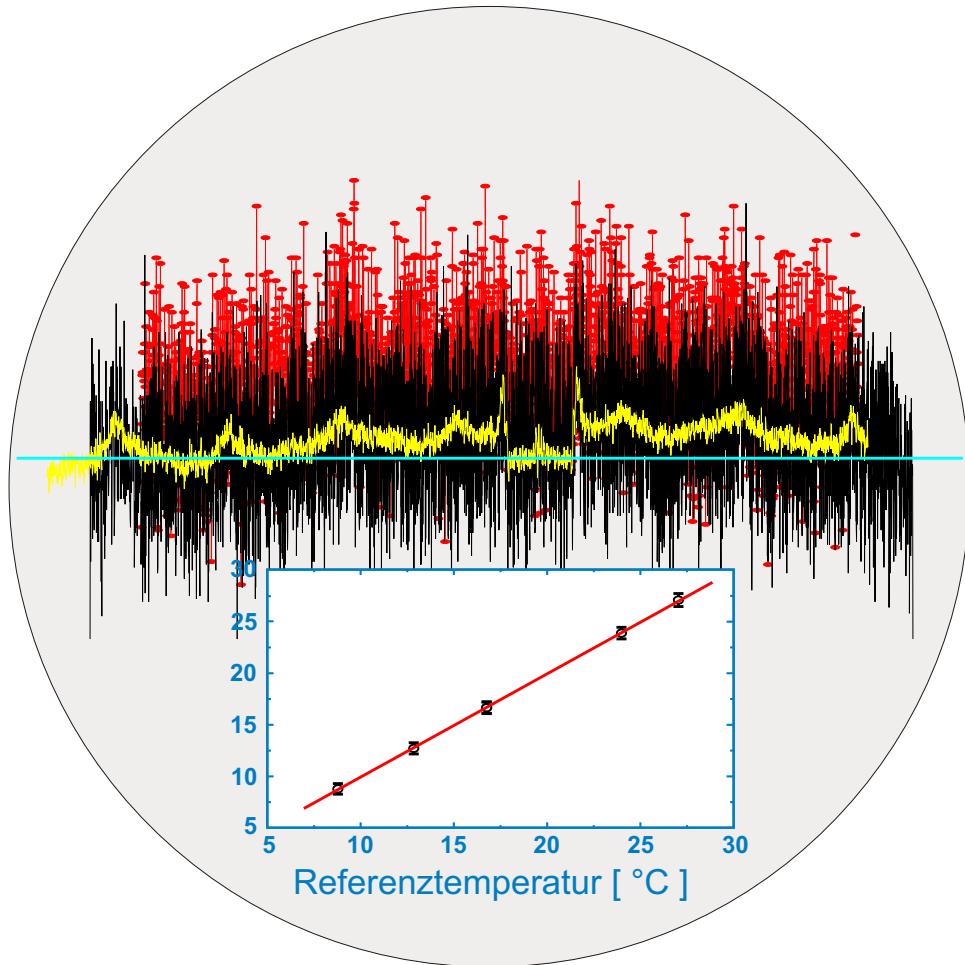
G E O F O R S C H U N G S Z E N T R U M P O T S D A M
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Kemal Erbaş
Grit Dannowski
Jörg Schrötter

**Reproduzierbarkeit und
Auflösungsvermögen faseroptischer
Temperaturmessungen für Bohrlochanwendungen
- Untersuchungen in der Klimakammer des GFZ -**

Scientific Technical Report STR99/19

Reproduzierbarkeit und Auflösungsvermögen faseroptischer Temperaturmessungen für Bohrlochanwendungen - Untersuchungen in der Klimakammer des GFZ -



Kemal Erbaş, Grit Dannowski, Jörg Schrötter

Scientific Technical Report STR99/19

Reproduzierbarkeit und Auflösungsvermögen faseroptischer Temperaturmessungen für Bohrlochanwendungen

- Untersuchungen in der Klimakammer des GFZ -

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Prinzip der faseroptischen Temperaturmessungen	7
2.1	Meßgerät DTS 80	8
2.2	Örtliche Auflösung	10
2.3	Zeitliche Auflösung	10
2.4	Datenbasis	11
3	Durchführung der Messungen	13
3.1	Steckerauswahl	13
3.2	Längenbestimmung	14
3.3	Meßanordnung in der Klimakammer des GFZ	17
4	Messungen am 700 m Bohrlochmeßkabel	19
4.1.1	Längenbestimmung	20
4.1.2	Bestimmung der Dämpfungseigenschaften.....	22
4.1.3	Messungen bei 12,85 °C	23
4.1.4	Ergebnis der Kalibrierungen	25
4.1.5	Zeitliche Auflösung.....	27
4.1.6	Beurteilung der Datenqualität bei Feldmessungen	31
5	Messungen an einem 2000 m Kabel	34
5.1.1	Längenbestimmung	35
5.1.2	Bestimmung der Dämpfungseigenschaften.....	35
5.1.3	Messungen bei 25 °C	35
5.1.4	Ergebnis der Kalibrierungen	38
5.1.5	Zeitliche Auflösung.....	40
5.1.6	Beurteilung der Datenqualität bei Feldmessungen	44
	Zusammenfassung und Ausblick	46
6	Literatur	47
7	Anhang A: Datenblatt der Kalibrierung der Firma York Sensors	48
8	Anhang B: Darstellung der verwendeten Messungen	49

1 Einleitung

Seit einigen Jahren sind faseroptische Temperaturmessungen in die Geowissenschaften eingeführt. Die Anwendung dieser Technologie ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung von Temperaturprofilen entlang der gesamten Faserstrecke, weshalb der Einsatz insbesondere zur Beobachtung zeitlich veränderlicher Temperaturzustände geeignet ist. Im Gegensatz zu anderen Anwendungen (Deich-, Dammbau, Flugzeugindustrie, Prozeßtechnologien) konzentrieren sich die Arbeiten des GFZ auf die Anwendung in der Bohrlochmeßtechnik.

Um eine mehrfache Nutzung der optischen Fasern und eine Handhabung bei den Bohrlochmessungen zu gewährleisten, wird ein Konzept verfolgt, bei dem die optischen Fasern in ein Bohrlochmeßkabel integriert sind. Limitierungen in Bezug auf die Einsatzbedingungen (Temperatur, Druck, Länge des Kabels etc.) ergeben sich grundsätzlich durch die verwendete Faser, den Kabelaufbau und die Meßtechnik.

Seit 1992 werden die Messungen des GFZ mit einer Apparatur der Firma York Sensors (UK) durchgeführt. Bisher standen 2 Bohrlochmeßkabel für einen Temperaturbereich bis max. 80 °C und Tiefen bis 1000 m zur Verfügung. Aufgrund der inzwischen erfolgten Weiterentwicklung in der Meßtechnik wurde die Apparatur 1998 auf den neusten technologischen Stand gebracht. Damit ist z.B. der Meßbereich von bisher 4 km Faserlänge auf 8 km erweitert worden.

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten des GFZ haben die geothermischen Bohrlochmessungen in der Grundlagenforschung (Temperaturfeld, Wärmestromdichte) und der angewandten Geothermie (Nutzung der Erdwärme) eine traditionell große Bedeutung. Die Aufgabenstellungen und Lokationen des ICDP Programms bieten zudem die Möglichkeit, Weiterentwicklungen dieser Technologie mit der Beantwortung lokaler und regionaler Fragestellungen zu verknüpfen. Für den Einsatz in tiefen Bohrlöchern wurde deshalb die Beschaffung eines 4000 m langen Bohrlochmeßkabels für eine maximale Einsatztemperatur von 200 °C vorangetrieben. Durch die mit dem britischen Hersteller BICC Thermoheat eingegangene Kooperation wird derzeit das erste Bohrlochmeßkabel dieser Länge und für diesen Einsatzbereich hergestellt.

Für die Güte der quantitativen Analysen der thermo-hydraulischen Bedingungen in Bohrlöchern und ihre weitere Interpretation ist neben einer hohen Auflösung im Orts- und Zeitbereich die Genauigkeit der gemessenen Temperaturen ausschlaggebend. Bedingt durch das Meßverfahren sind diese Parameter material- und konstruktions-

abhängig. Während bisherige Genauigkeitsuntersuchungen auf dem Vergleich konventioneller Temperaturlogs und DTS-Messungen in Bohrlöchern basieren ([Wissian et al, 1998](#)) und damit grundsätzlich „geologisches Hintergrundrauschen“ enthalten, besteht bei Messungen unter kontrollierten äußeren Bedingungen die einzige Möglichkeit systematische Untersuchungen zu Temperatur-, Orts- und Zeitauflösung durchzuführen.

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Vorgehensweise und den derzeitigen Stand der Kalibrierungsmessungen anhand einiger Meßbeispiele. Dazu wird zuerst das Prinzip der DTS-Meßtechnik und anschließend die bei den Messungen verwendeten Komponenten sowie der Meßaufbau in der Klimakammer beschrieben. Es folgt eine Darstellung der Meßergebnisse und ihre Interpretation in Hinblick auf das Auflösungsvermögen der Temperaturmessungen für die derzeit verwendeten Systeme.

2 Prinzip der faseroptischen Temperaturmessungen

Die Technik des „Distributed Fibre Optic Temperature Sensing“ (DTS) basiert auf der Messung der rückgestreuten Raman-Komponente des Laserlichtes in einem Lichtwellenleiter (LWL). Sie ist in der Literatur (z.B. [Rogers, 1988](#), [Hartog and Gamble, 1991](#)) ausführlich beschrieben und wird hier nur kurz skizziert.

Wenn ein Laserpuls in einen LWL eingekoppelt wird, kommt es während der Ausbreitung in der optischen Faser zu Rückstreuungen von Licht. Die Intensität und die spektrale Zusammensetzung des rückgestreuten Lichts wird durch die Moleküle der optischen Faser bestimmt. Die Raman-Komponente der Rückstreuung wird durch thermisch bedingte molekulare Vibrationen hervorgerufen. Sie wird trotz ihrer verhältnismäßig geringen Amplitude aufgrund des Frequenzabstandes zum eingestrahlichten Laserlicht bisher häufiger zur Temperaturbestimmung verwendet als z.B. die Komponenten Brillouin-Streuung ([Abb. 1](#)). Die Anti-Stokes-Komponente der Ramanstreuung ist im Gegensatz zur Stokes-Komponente stark temperaturabhängig. Aus dem Verhältnis der beiden Komponenten kann somit die Temperatur unter weitestgehender Eliminierung weiterer Materialeinflüsse bestimmt werden. Aufgrund der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Faser können die Orte der Rückstreuungen über genaue Laufzeitmessungen berechnet werden. Somit ist es möglich, die Temperatur und die dazugehörige Entfernung für die gesamte Faserstrecke quasi gleichzeitig zu erfassen.

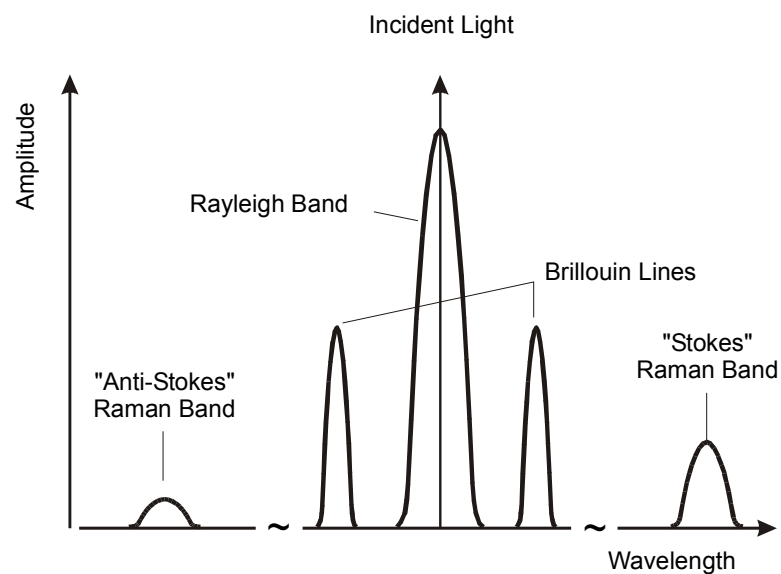


Abb. 1: Schematische Darstellung des Spektrums der bei dem Ausbreiten eines Laserpulses in einer optischen Faser entstehenden rückgestreuten Wellenlängen und ihrer Amplitudenverhältnisse.

2.1 Meßgerät DTS 80

Basierend auf dem oben skizzierten Prinzip der Ramanspektroskopie sind seit Ende der 80er Jahre kommerzielle Meßsysteme entwickelt worden. Für die hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeiten hinsichtlich der Temperatur- und der Ortsauflösungen ergaben wiederholt durchgeführte Marktstudien (s.a. [Rummel und Kappelmeyer, 1998](#)), daß die von der Firma York Sensors (UK) hergestellten Geräte denen anderer Hersteller überlegen sind.

Am GFZ ist seit 1992 ein Gerät vom Typ DTS 80 im Einsatz, welches sich bei vielen Messungen bewährt hat ([Förster et al., 1997a](#), [Förster et al., 1997b](#)). Aufgrund der technologischen Weiterentwicklungen der letzten Jahre ist es Ende 1998 überholt worden. Als eine wesentliche Verbesserung ist die Umrüstung auf selbstjustierende Steckverbindungen vom TYP Diamond (Baureihe E2000) anzusehen, wodurch die gleichbleibende Güte der Ankopplung der optischen Faser an das Meßgerät über einen langen Zeitbereich gewährleistet ist. Dies ist insbesondere für zukünftige Langzeitmessungen von ausschlaggebender Bedeutung.

Der prinzipielle Aufbau des Meßsystems ist in den Abbildungen [2](#) und [3](#) dargestellt.

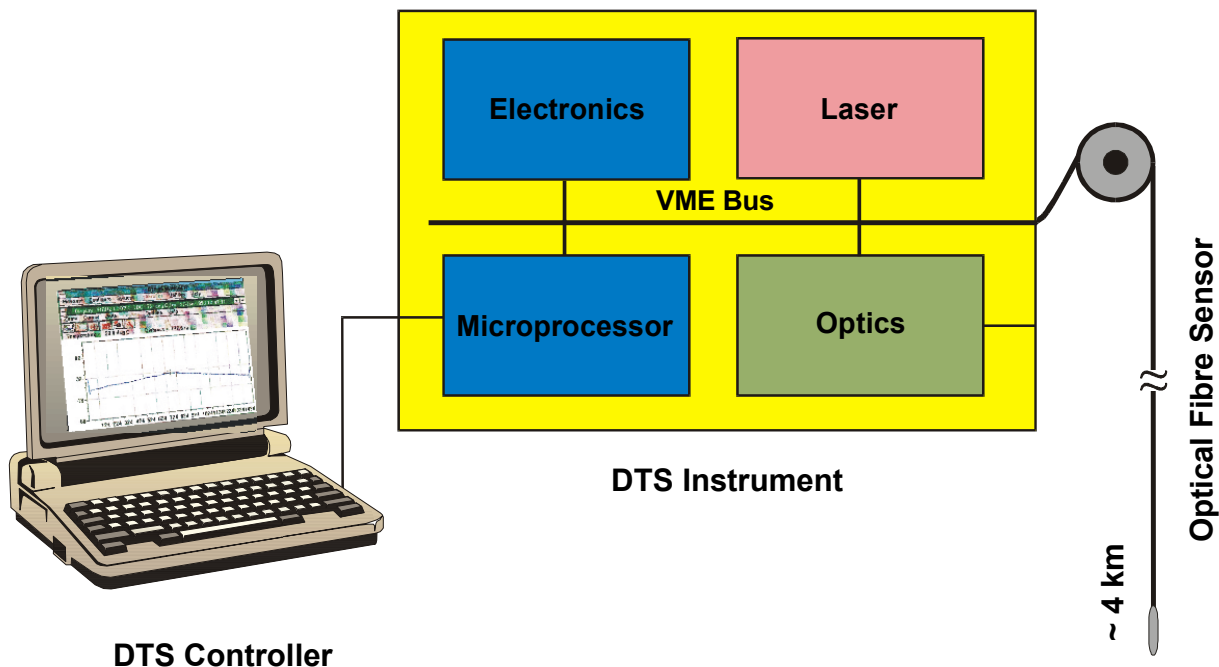


Abb. 2: Schematische Darstellung des DTS Meßsystems. Es besteht aus der Laser-Steuereinheit für die optischen Signale (DTS 80), einem Meßkabel in dem die optischen Fasern eingebettet sind und einem transportablen Mikrocomputer.

Die gepulste Laserquelle hat eine Leistung von 10 mW bei einer Wellenlänge von 1064 nm; die Pulsbreite beträgt 10 ns.

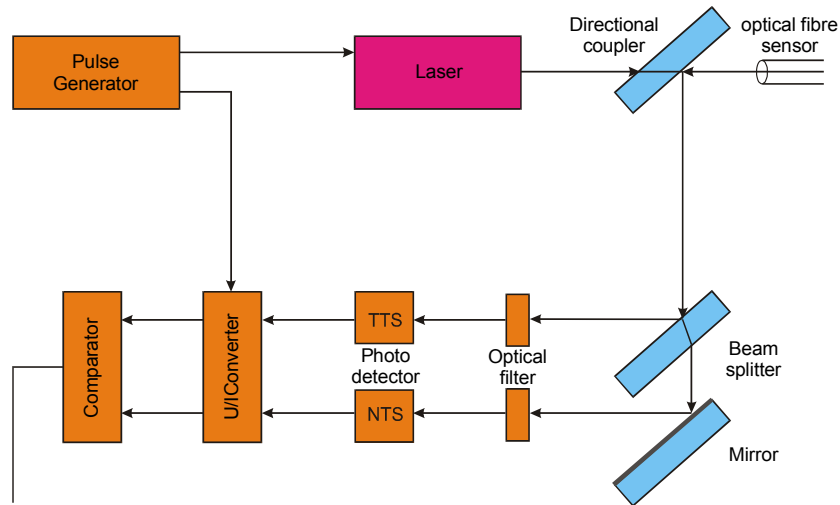


Abb. 3: Schematische Darstellung des Aufbaus der DTS Apparatur. Die für die Temperaturmessungen verwendeten Anteile des rückgestreuten Laserlichts werden in den beiden Photodetektoren gemessen und dann im Gerät weiterverarbeitet.

Die Meßgrößen innerhalb des Gerätes sind die Amplituden der Anti-Stokes-Komponente und der Stokes-Komponente. Diese Signaltypen werden vom Hersteller mit TTS (temperature sensitive) und NTS (non-temperature sensitive) bezeichnet. Ebenfalls gemessen wird das opto-elektronische Rauschen (background signal, BCK) des Systems in den beiden Frequenzbändern (siehe Abb. 1). Dies wird benutzt, um das „kohärente“ Rauschen aus den gemessenen Rückstreuungen zu entfernen. Die resultierenden Signale CTTS (cleaned TTS) und CNTS werden sodann für die Temperaturberechnungen verwendet.

Die Messungen können in 2 verschiedenen Betriebsarten durchgeführt werden:

1. Single-ended: Die Messungen werden an einer Faser durchgeführt, wobei ein Ende mit dem Meßgerät verbunden ist. Das andere Ende ist offen.
2. Double-ended: Die Messungen werden an einer Faser durchgeführt, von der beide Enden mit dem Meßgerät fest verbunden sind (Schleifenmessung). Das Laserlicht der Quelle wird von beiden Enden her abwechselnd eingekoppelt und die Rückstreuungen werden auch an beiden Enden registriert. Der Vorteil dieser Betriebsart liegt in der Reduzierung des Rauschens durch Mittelwertbildung über die Messungen in unterschiedliche Richtungen.

Aufgrund des besseren Signal-Rausch Verhältnisses wird angestrebt, alle Messungen im Betriebsmodus Double-ended durchzuführen. Für den Fall eines Faserbruchs während einer Meßfahrt bietet die Betriebsart der Single-ended Messungen jedoch die Gewähr, weiterhin Temperaturwerte, wenn auch in geringerer Qualität, registrieren zu können.

In der derzeitigen Ausbaustufe kann mit dem Meßgerät an 2 Schleifen (LOOP1, LOOP2) gemessen werden. Die jeweilige Bezeichnung der Eingangsbuchsen einer Schleife mit END1 und END2 charakterisiert auch die Richtung der Einkopplung des Laserpulses.

2.2 Örtliche Auflösung

Aufgrund der für jede Wellenlänge bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Faser kann die Position eines Meßwertes auf der Faserstrecke aus der doppelten Laufzeit des Lichtes bis zu diesem Punkt berechnet werden.

Die örtliche Auflösung wird durch die Pulsbreite des eingekoppelten Laserlichtes bestimmt. Aus der benutzten Pulsbreite von 10 ns resultiert eine Auflösung von 1m. Dies ist der Bereich, für den jeweils ein Meßwert (sample point) ermittelt wird.

Der Meßpunktabstand wird durch die Dauer der Messung im Photodetektor und der anschließenden A/D-Wandlung (sampling Rate) bestimmt. Die sampling Rate des Meßgerätes beträgt 10 ns. Daraus ergibt sich ein Meßpunktabstand von ebenfalls 1 m.

Durch eine spezielle Verschachtelungstechnik (Interleaving) ist es jedoch möglich, den Meßpunktabstand zu verringern. Die Abtastrate wird dadurch erhöht, daß bei aufeinanderfolgenden Messungen der Anfangszeitpunkt der Datenregistrierung geringfügig verschoben wird. Die Meßwerte liegen dann zwischen denen der vorangegangenen Meßreihe und anschließend können beide zu einem Profil mit höherer örtlicher Auflösung zusammengesetzt werden. Das DTS Gerät bietet die Möglichkeit der Verschachtelung bis zum Faktor 4, daraus resultiert eine maximale örtliche Auflösung von 0,25 m. Alle Kalibrierungen wurden mit dieser Einstellung durchgeführt.

2.3 Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Abfolge der Messungen ergibt sich aus der Meßzeit und der Zeit für die Registrierung der Daten. Sie ist von der Faserlänge abhängig und kann vom Benutzer nur in fest vorgegebenen Stufen verändert werden. Das kürzeste Zeitintervall beträgt 7 s. Innerhalb dieser Zeit kann für Faserlängen bis 4 km eine ganze Meßreihe

aufgenommen werden. Für den Fall einer Messung mit einer 4-fach Verschachtelung (Interleave 4, s.o.) erhöht sich diese minimale Intervalllänge auf das 4-fache, d.h. ca. 28 s.

2.4 Datenbasis

Die vom Meßgerät registrierten Datensätze (BCK, TTS, NTS, CTTS, CNTS) werden jeweils im Meßgerät gespeichert und anschließend auf den Steuerungsrechner übertragen. Damit ergibt sich die prinzipielle Möglichkeit, das Processing der Daten auch im nachhinein durchzuführen und eventuelle Störeffekte zu korrigieren. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch eine Auswahl aus den während einer Messung erfaßten Datensätzen. In den Abbildungen 4 und 5 sind deutlich die unterschiedlichen Bereiche der Faserstrecke zu erkennen, wie beispielsweise der geräteinterne Referenzbereich (Reference Coil).

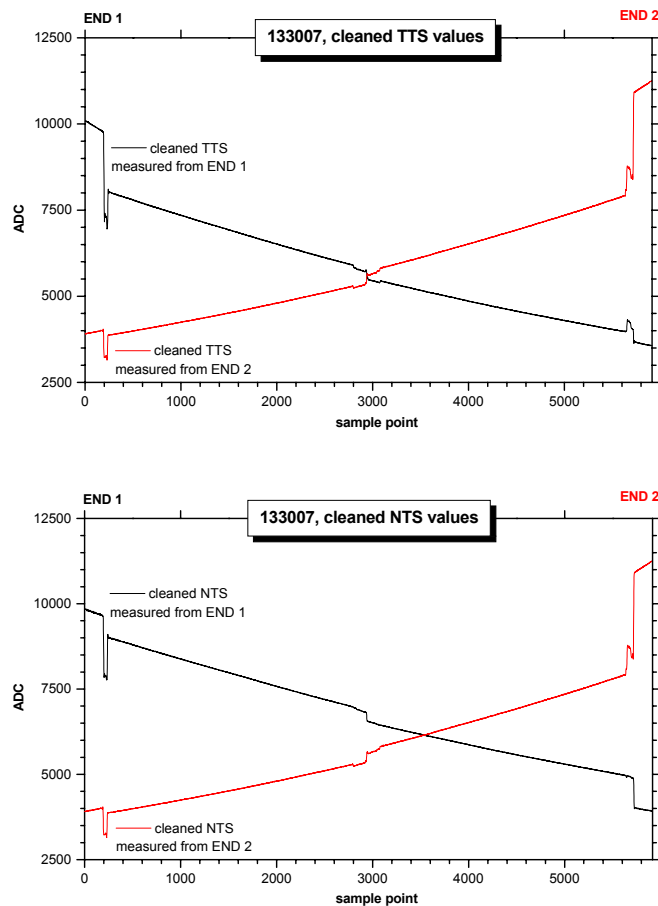


Abb. 4: Die beiden Abbildungen geben die um das kohärente Rauschen bereinigten Amplituden (ADC) der Anti-Stokes-Komponente (oben) und der Stokes-Komponente (unten) der Ramanstreuung wieder. Diese sind die Ausgangsdaten der Temperaturberechnung (Abb. 5). Die Steckverbindungen bzw. Verschweißungsstellen (Spleiß) sind durch Sprünge in den Amplitudenwerten der einzelnen Komponenten deutlich zu erkennen. Meßparameter: Meßintervall 7 s, Mittelung (stack) von jeweils 28 Messungen, Interleave:4.

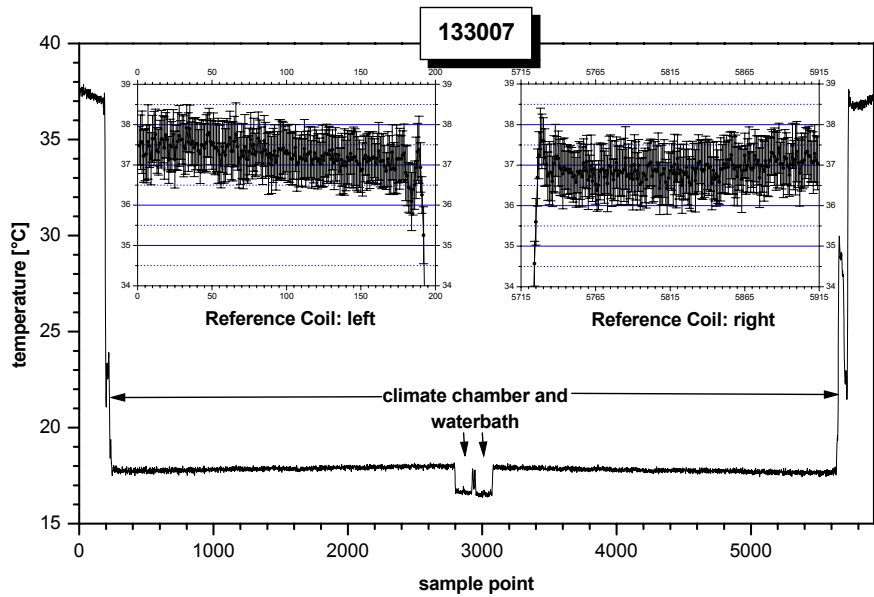


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der an einer optischen Faserstrecke gemessenen Temperaturen (s. Abb. 4). Die Temperaturen der internen Referenzbereiche (Reference Coil) an den beiden Schleifenenden sind gesondert hervorgehoben, die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Mittelwerte für die einzelnen Meßpunkte wieder. Meßparameter: Integrationszeit 7 s, Mittelung (stack) von jeweils 28 Messungen, Interleave: 4.

Bei den Referenzbereichen (Reference Coil Area) handelt es sich um Bereiche innerhalb des DTS Meßgerätes in denen je ca. 50 m Faserstrecke auf einer annähernd konstanten Temperatur gehalten werden. Diese liegt über der vom Hersteller angegeben maximal zulässigen Umgebungstemperatur von 30 °C und die Meßwerte in diesen Bereichen können zur Beurteilung der Meßgüte unter Feldbedingungen herangezogen werden (s. unten).

3 Durchführung der Messungen

3.1 Steckerauswahl

Für ein optimales Signal-Rausch Verhältnis ist es notwendig, eine möglichst geringe Dämpfung entlang der Faserstrecke zu realisieren. Eine Optimierungsmöglichkeit besteht für eine gegebene Systemkombination neben den Verschweißungsstellen der Fasern (Spleiß) jedoch generell nur an den Steckverbindungen bzw. den kurzen Endstücken (Pigtails), mit denen diese an die Fasern innerhalb des Bohrlochmeßkabels angespleißt sind. Die Dämpfung der Faserstrecken im Meßkabel bzw. in der Reference Coil innerhalb des Meßgerätes sind durch die Materialparameter vorgegeben.

Die Verschweißungsstellen wurden jeweils direkt nach dem „spleißen“ durch Dämpfungsmessungen beurteilt. Erfahrungsgemäß können bei sorgfältiger Vorgehensweise Dämpfungen realisiert werden, die im Bereich von maximal 0,2 dB pro Spleiß liegen.

Aufgrund geringfügiger Abweichungen, die innerhalb der Fertigungstoleranz der Kontaktflächenneigung in den Steckern und den fest im Gerät installierten Buchsen liegen, konnte beobachtet werden, daß bestimmte Stecker an einzelnen Buchsen besonders niedrige Dämpfungswerte für den Übergang aufweisen. Deshalb wurden alle Steckverbindungen jeweils an allen Eingangsbuchsen des Gerätes vermessen (Abb. 6, 7). Anschließend erfolgte eine Klassifizierung der Stecker hinsichtlich ihrer Übergangsdämpfungen, anhand derer sie für verschiedene Anwendungsfälle vorgesehen wurden. So werden z.B. die Stecker mit den geringsten Übergangsverlusten für die längeren Bohrlochkabel vorgesehen.

Die Bandbreite der über die Steckerankopplung entstehenden Verluste in den Amplituden reicht von $-0,02$ dB (Stecker 17 an LOOP1, END1, s. Abb. 6) bis zu $-1,1$ dB (Stecker 14, an LOOP1, END1, s. Abb. 6). Einige Stecker sind offensichtlich auch total unbrauchbar (z.B. Stecker 16 an LOOP1, END1, s. Abb. 7).

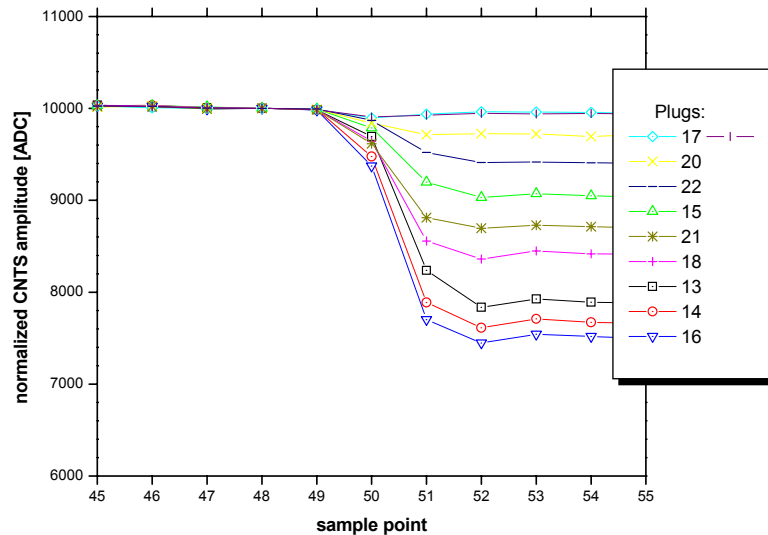


Abb. 6: Darstellung der Dämpfungen am Übergang Gerätebuchse (LOOP1, END1, links) zu Stecker (rechts) für verschiedene Stecker. Für den Vergleich wurden die Meßwerte auf eine Anfangsamplitude von 10000 ADC am Meßpunkt 48 normiert.

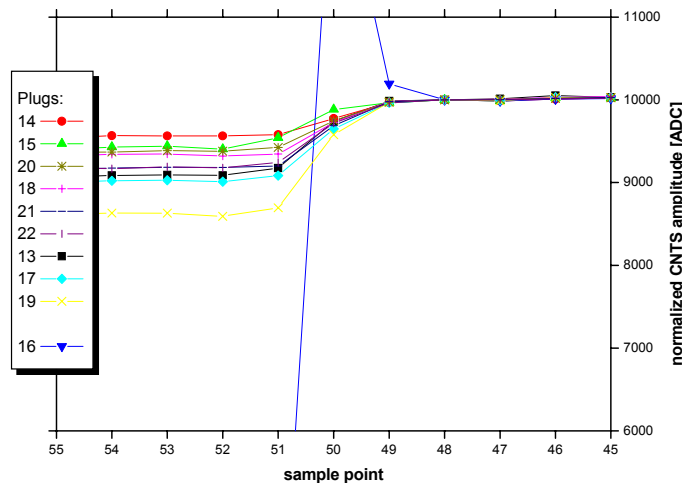


Abb. 7: Darstellung der Dämpfungen am Übergang Gerätebuchse (LOOP1, END2, rechts) zu Stecker (links) für verschiedene Stecker. Für den Vergleich wurden die Meßwerte auf eine Anfangsamplitude von 10000 ADC am Meßpunkt 48 normiert.

3.2 Längenbestimmung

Da bei der verwendeten Betriebsart der Schleifenmessung (Double-ended) die Rückstreuungen jeweils von den entgegengesetzten Enden der Faserstrecke bestimmt und dann zur Temperaturberechnung kombiniert werden, kommt der Längenbestimmung der Faserstrecke eine besondere Bedeutung zu.

Bei der Längenbestimmung wird nach den Vorschriften in der Bedienungsanleitung (York Sensors, 1998) vorgegangen. Aufgrund der geringeren Temperaturabhängig-

keit wird die Rückstreuung der Stokes-Komponente (NTS) für diese Messungen benutzt. In einem ersten Schritt wird die Länge der geräteinternen Referenzfaser festgelegt, indem die Rückstreuungen bei offenem Schleifenende am Gerät registriert werden. Wie die [Abb. 8](#) zeigt, ist das offene Ende durch den drastischen Abfall in der Amplitude der Rückstreuung zu erkennen. Damit lässt sich die Halbwertshöhe und die resultierende Faserlänge sehr gut bestimmen. Diese wird der Faserlänge der bis zur Buchse reichenden Referenzfaser zugeordnet.

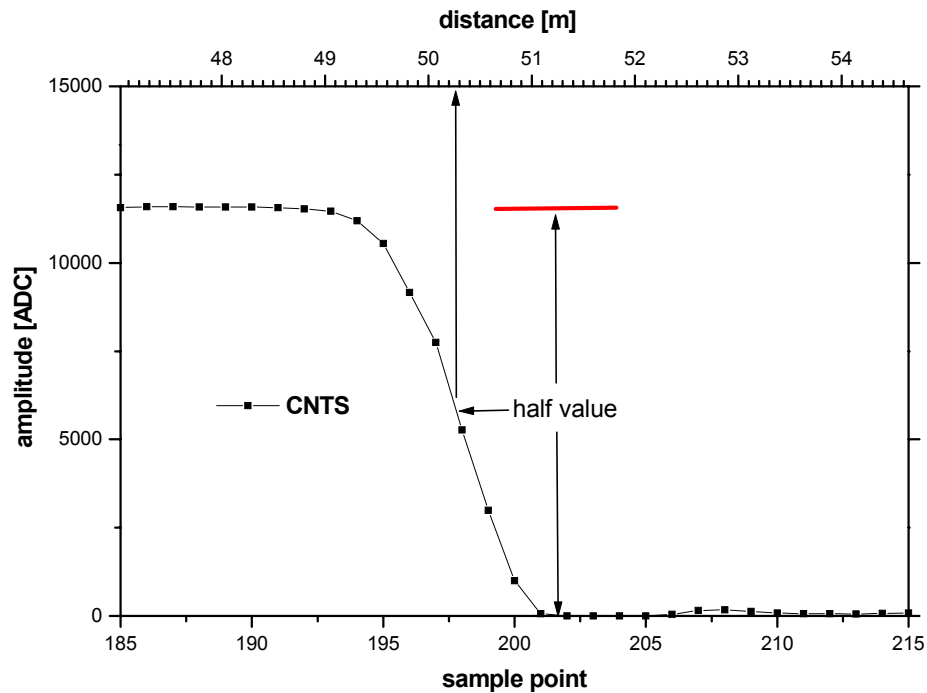


Abb. 8: Darstellung der Längenbestimmung der geräteinternen Faserstrecke. Durch den deutlichen Amplitudenabfall am offenen Eingang des DTS-Meßgerätes läßt sich diese Länge sehr gut bestimmen

Die Längenbestimmung der angeschlossenen Faserstrecke gestaltet sich etwas aufwendiger. Hierzu wird die Faser an das Meßgerät angeschlossen und die Rückstreuungen werden bei offenem Faserende gemessen. An diesem offenen Ende kommt es aufgrund der Grenzfläche wiederum zu einem deutlichen Abfall in den gemessenen Rückstreuamplituden ([Abb. 10](#)). Aufgrund jeweils leicht unterschiedlicher Signalformen sowie der ohnehin niedrigeren Signalamplituden ist die Reproduzierbarkeit jedoch nicht sehr hoch.

Um ein einfaches und einheitliches Vorgehen für alle Kabelstrecken zu gewährleisten, wurde deshalb ein auf die Stecker passendes Gegenstück mit einem polierten Edelstahlstift angefertigt ([Abb. 9](#)). Diese Konstruktion führt zu einer Reflexion am En-

de der Faserstrecke, deren Signalform zum einen reproduzierbar ist und zudem größere Amplituden aufweist (Abb. 10). Damit ist eine einheitliche Vorgehensweise bei der Längenbestimmung der angeschlossenen Faserstrecke möglich. Die der Halbwertshöhe zugeordnete Länge wird wiederum als Faserlänge definiert.

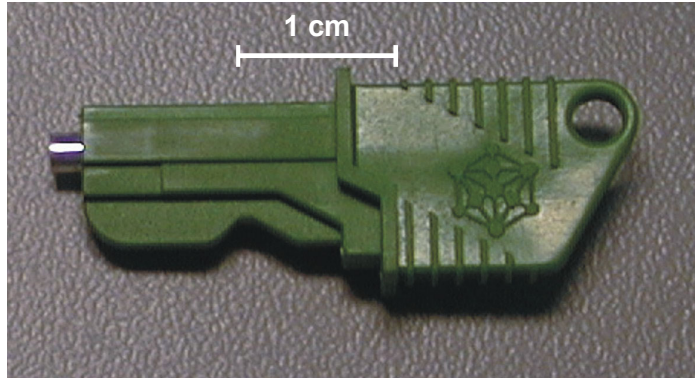


Abb. 9: Gegenstück für Diamond Stecker mit poliertem Edelstahlstift für die Längenbestimmungen an den optischen Faserstrecken.

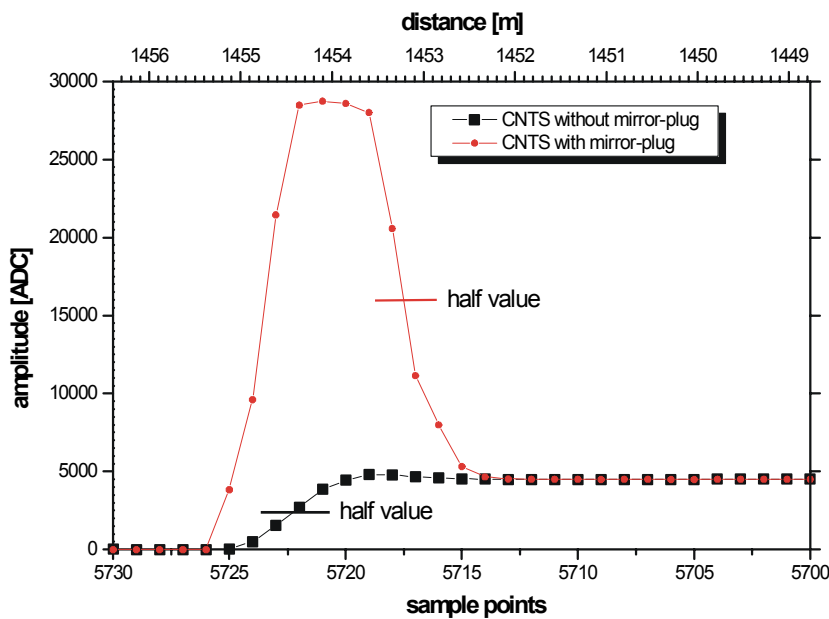


Abb. 10: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Messungen zur Längenbestimmung der Faserstrecke. Die Kurve mit dem ausgeprägten Maximum wurde bei aufgesetztem Gegenstück an den Diamond Steckern aufgenommen, während die Vergleichskurve bei offenem Faserende registriert wurde. Aufgrund der deutlich besseren Reproduzierbarkeit werden alle Längenmessungen mit aufgesetztem Gegenstück durchgeführt.

Die Längenmessungen für verschiedene Ortsauflösungen (Interleave: 1 bis 4) ergeben leicht unterschiedliche Werte für die jeweils bestimmten Faserlänge. Aus diesem Grund werden die Längenbestimmungen für jedes Interleave durchgeführt und die resultierenden Längen dann später als Parameter für die DTS Apparatur verwendet (s. Tab. 1, Tab. 11).

3.3 Meßanordnung in der Klimakammer des GFZ

Zur Gewährleistung von konstanten Umgebungstemperaturen für die zu kalibrierenden Faserstrecken wurde die Klimakammer des GFZ genutzt. Mit Abmessungen von 3,2m x 5,2m x 2,8m (LxBxH) und einem regelbaren Temperaturbereich von -20 bis $+50^{\circ}\text{C}$ ist sie hervorragend für die Aufnahme größerer Geräte bzw. Kabel geeignet. Temperaturmessungen innerhalb der Klimakammer ergaben, daß die zeitliche Temperaturkonstanz im Bereich von $\pm 0,5$ K liegt. Dies ist für die Kalibrierungsmessungen des DTS Systems nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurde in der Klimakammer ein Wasserbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 200 l aufgestellt, in dem Teilstrecken der zu untersuchenden Bohrlochmeßkabel untergebracht werden können. (Abb. 11).

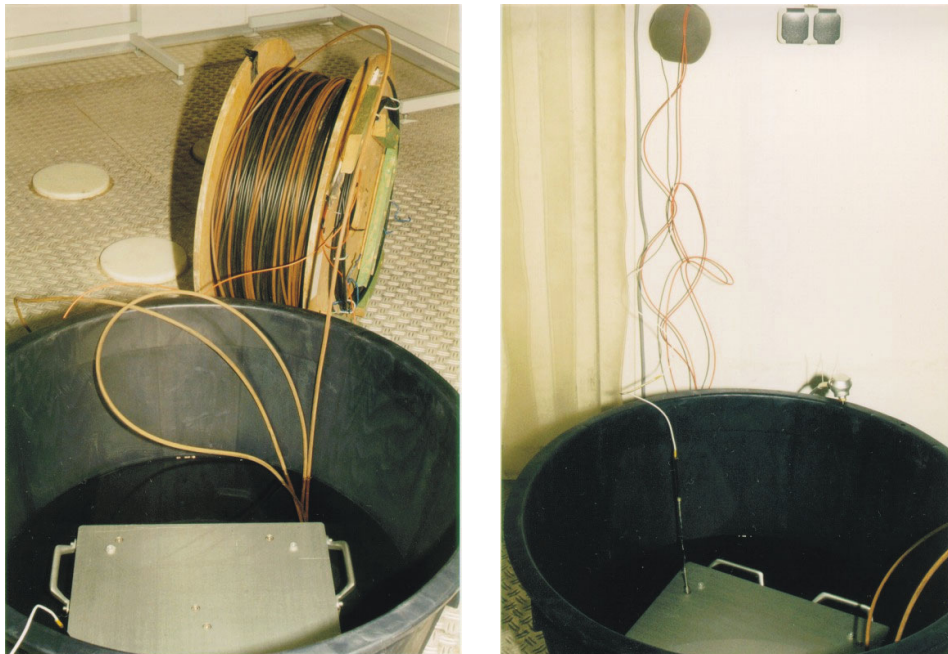


Abb. 11: Wasserbad für Kabelstrecken in der Klimakammer des GFZ. Die zu kalibrierenden Fasern befinden sich innerhalb eines Blockes aus Aluminiumplatten. Die Messung der Referenztemperatur erfolgt mit dem Sensor eines Quarzthermometers innerhalb dieses Blockes (rechtes Bild).

Innerhalb des Wasserbehälters wird das Kabel auf einer Länge von ca. 30 m zwischen zwei speziell ausgefrästen Aluminiumplatten geführt (Abb. 12). Dies führt einerseits zu einer weiteren Dämpfung von eventuell noch vorhandenen Temperaturschwankungen, zum anderen erleichtert es die Handhabung und verhindert Bewegungen des Kabels innerhalb des Wasserbades.

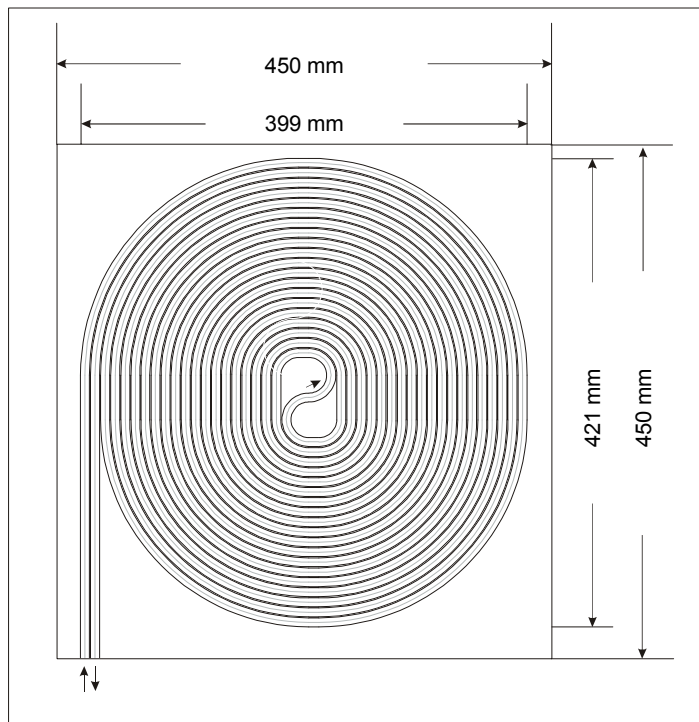


Abb. 12: Die Kabelführung im Wasserbad erfolgt innerhalb von miteinander verschraubten Aluminium Platten. Die Abmessungen sind so gewählt, daß scharfe Knicke in der Kabelführung vermieden werden, da dies zu Störeffekten führen würde.

Die Messung der als Referenz verwendeten Wasserbadtemperatur erfolgte mit einem Quarzthermometer (Hewlett Packard HP2804 A), dessen Sensor in einer Bohrung in dem Plattenblock angebracht ist. Die relative Meßgenauigkeit des Gerätes für 10°C Bereiche im Intervall von -20°C bis 120°C wird vom Hersteller mit $\pm 0,001^\circ\text{C}$ angegeben, womit eine hinreichende Beurteilung der Konstanz der Referenztemperatur gegeben ist. Die absolute Genauigkeit wird mit $< \pm 0,02^\circ\text{C}$ angegeben. Damit ist eine hochgenaue Basis für die Referenztemperaturen gewährleistet. Zusätzlich wurde im Verlauf der Messungen noch eine Wechselstrom-Meßbrücke (F300, Automatic Systems Laboratories Ltd., UK) verwendet, deren Meßergebnisse diese Beurteilung bestätigen.

Die Unterbringung der Meßgeräte sowie des für die Steuerung der Messungen und die Datenerfassung verwendeten PCs erfolgte in einem Vorraum der Klimakammer.

4 Messungen am 700 m Bohrlochmeßkabel

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen an 2 Kabeln zusammengefaßt. Für die Bestimmung der Kalibrierungsparameter ist es notwendig, die mit dem DTS-Meßgerät ermittelten Temperaturen in einem möglichst großen Temperaturintervall zu belegen. Auf der Basis dieser Meßergebnisse werden dann die geräteinternen Parameter für Offset (RCT) und Steigung (SLE) des linearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Rückstreuungsamplitude im Anti-Stokes Band der Ramanstreuung angepaßt. Anschließend werden die DTS-Messungen mit den neuen Parametern durchgeführt. Dieser Prozeß wird so lange wiederholt, wie sich signifikante Verbesserungen erreichen lassen. Während die Bedienungsanleitung der Firma York Sensors die Kalibrierung lediglich am oberen und unteren Ende des Temperaturintervalls vorsieht, wurden unsere Messungen mit einer größeren Anzahl von Stützstellen durchgeführt, um die ganze Bandbreite der möglichen Parametervariationen zu erfassen.

Aufgrund des Einsatzgebietes in Bohrungen erfolgt zur Zeit eine Beschränkung auf Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes, die obere Grenze ist durch den Regelbereich der Klimakammer von 50°C vorgegeben. Zukünftige Kalibrierungsmessungen sollen in einer erweiterten Anlage durchgeführt werden, in der auch Temperaturen bis ca. 200 °C realisiert werden können.

Bei dem 700 m Bohrlochmeßkabel handelt es sich um eine Konstruktion der Firma Felten & Guilleaume Energietechnik, welches seit 1992 im Einsatz ist. Der Kabelaufbau ist in der [Abb. 13](#) dargestellt.

Die optischen Daten des Kabels sind (Herstellerangaben):

Dämpfung bei 1310 nm : 0,6 dB/km

Bandbreite bei 1310 nm: 800 MHz*km

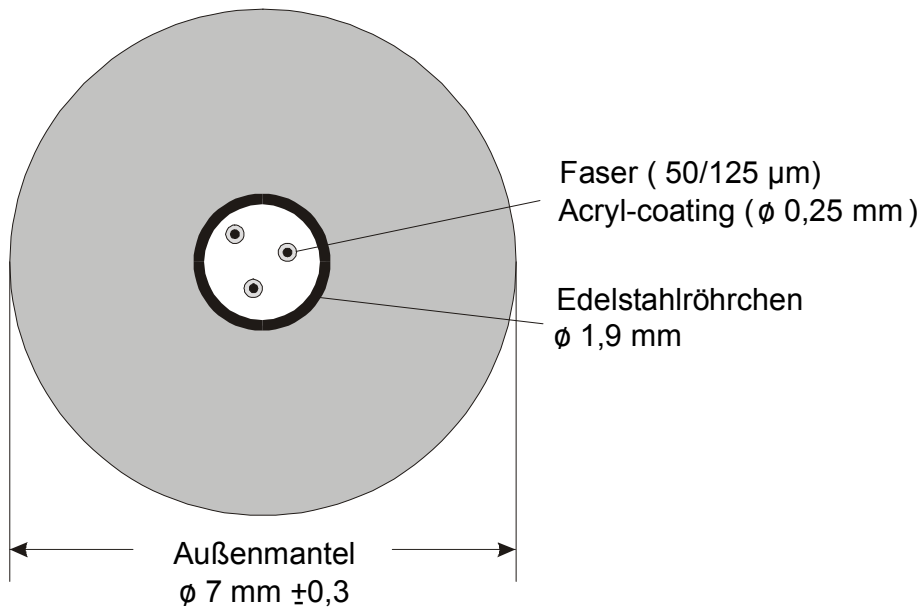


Abb. 13: Querschnitt des 700 m Bohrlochmeßkabels für faseroptische Temperaturmessungen.

Bei der verwendeten Faser handelt es sich um eine handelsübliche Mehrmodenfaser (50/125µm) mit Gradientenindex-Profil. Der Einsatzbereich des Kabels bis zu einer Temperatur von 80°C ist durch die Temperaturbeständigkeit der Acryl-Beschichtung (coating) der optischen Faser vorgegeben. Am Ende des Kabels befindet sich ein druckdichtes Kabelendstück (Abb. 14), innerhalb dessen der Spleiß der beiden für die Schleifenmessungen (Double-ended) verwendeten Fasern liegt.



Abb. 14: Kabelendstück des 700 m DTS-Meßkabels.

4.1.1 Längenbestimmung

Die Längenbestimmung für ein faseroptisches Meßkabel muß in der Regel nur einmal erfolgen. Dabei werden für die interne Verarbeitung in dem DTS-Meßgerät wich-

tige Parameter wie Anfangspunkt und Endpunkt der an das Gerät angeschlossenen Faser ermittelt. Diese Werte sind insbesondere bei der Schleifenmessung (Double-ended) von Bedeutung, da für die Temperaturberechnungen die Meßwerte von beiden Schleifenenden benutzt werden und die jeweilige Zuordnung über den Abstand geschieht. Die Längenbestimmung für das 700m Kabel erfolgte anhand der weiter oben skizzierten Vorgehensweise bei einer Umgebungstemperatur von ca. 22°C. **Abb. 15** zeigt exemplarisch einen Datensatz dieser Längenbestimmungen.

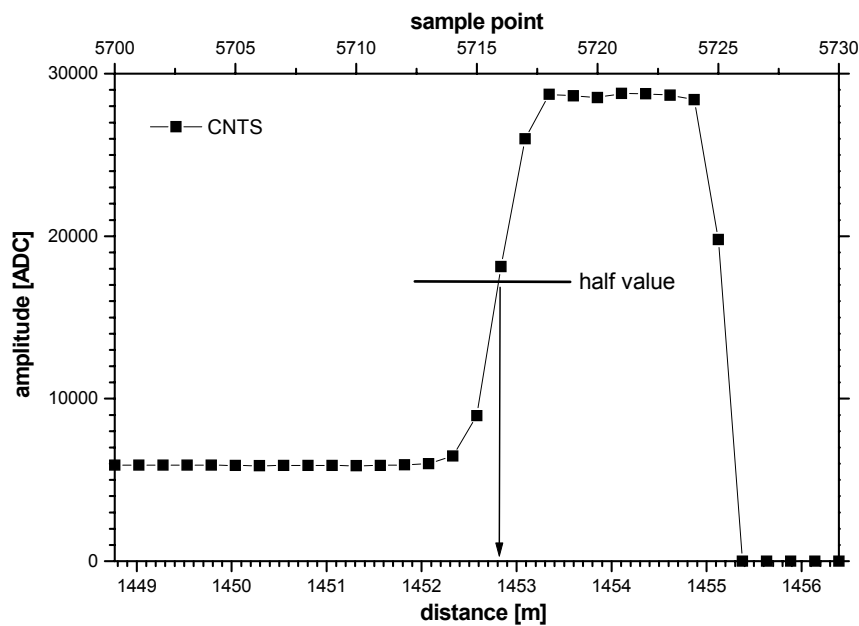


Abb.15: Beispiel Längenbestimmung 700 m Kabel. Der Amplitudenverlauf läßt eine sehr genaue Bestimmung des Faserendes zu.

In der **Tabelle 1** sind die Ergebnisse der Längenmessungen am 700 m Kabel zusammengefaßt.

	Länge Reference Coil:	Faserende bei:
Interleave 4:	50,26 ($\pm 0,05$) m	1452,84 ($\pm 0,05$) m
Interleave 1:	51,16 ($\pm 0,10$) m	1455,22 ($\pm 0,10$) m

Tabelle 1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Längenmessungen am 700 m Kabel (LOOP1)

4.1.2 Bestimmung der Dämpfungseigenschaften

Die Dämpfung der Faserstrecke kann aus den gemessenen Amplituden für die verschiedenen Komponenten der Ramanstreuung errechnet werden (Abb. 16). Vergleichskriterium ist jedoch die Dämpfung der Stokes-Komponente (CNTS) da die Anti-Stokes-Komponente zusätzlich temperaturabhängig ist.

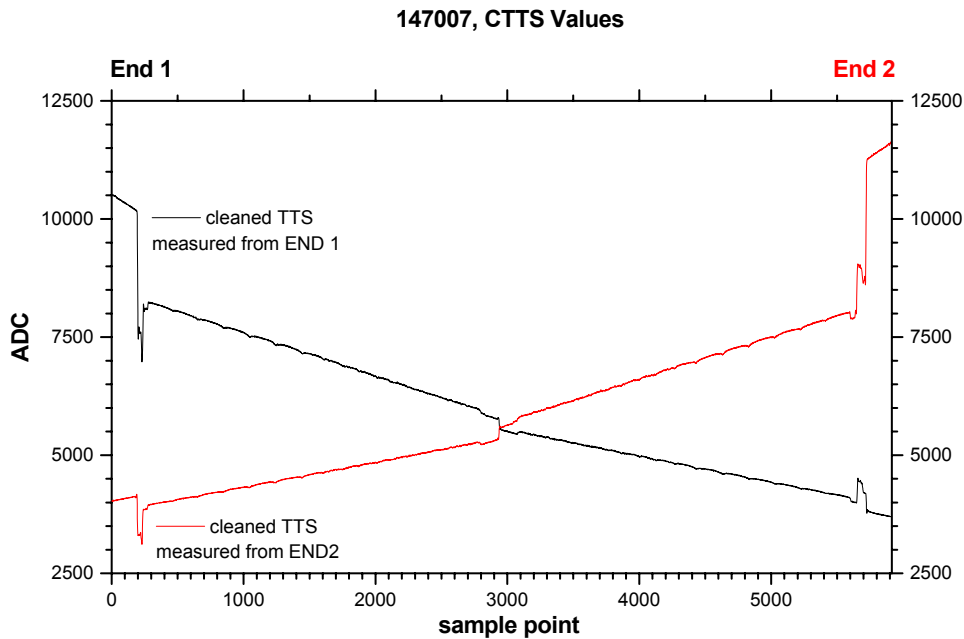


Abb. 16: Amplituden der temperatursensitiven Anti-Stokes-Komponente der Ramanstreuung. Aus dem Abfall der Amplitudenwerte (ADC) kann die Dämpfung für einzelne Faserabschnitte berechnet werden (Tabelle 2).

Signaltyp	CNTSE1	CNTSE2	CTTSE1	CTTSE2
Amplitude bei Sample point:				
1	10177,4	11205,3	10389,7	11506,4
5916	4027,8	4366,3	3645,3	3997,6
Dämpfung [dB]	-4,03	-4,09	-4,55	-4,59

Tabelle 2: Amplituden-Dämpfung für die verschiedenen Signaltypen, bestimmt aus einer Messung bei 25°C für das 700 m Kabel

Die Gesamtdämpfung des Meßsystems liegt damit für alle Signalkomponenten deutlich unterhalb des vom Hersteller für sinnvolle Temperaturmessungen vorgegebenen Grenzwertes von -20 dB.

4.1.3 Messungen bei 12,85 °C

Beispielhaft für die Vorgehensweise an den einzelnen Temperatur-Stützstellen für die Kalibrierung werden die Ergebnisse der Messungen bei 12,85 °C vorgestellt. Diese Temperatur befindet sich in etwa am unteren Ende des Kalibrierungsintervalles (8,8 bis 27 °C). Einen Überblick über das Meßergebnis zeigt die [Abb. 17](#). Deutlich zu erkennen sind die höheren Temperaturen der Referenzbereiche innerhalb des DTS-Meßgerätes am rechten und linken Rand, sowie der Bereich im Wasserbad (Bildmitte, Ausschnittvergrößerung in der [Abb. 18](#)). Anfangs- bzw. Endwerte der Referenztemperatur waren 12,849 bzw. 12,841 °C. Daraus ergibt sich eine mittlere Referenztemperatur von 12,845 °C.

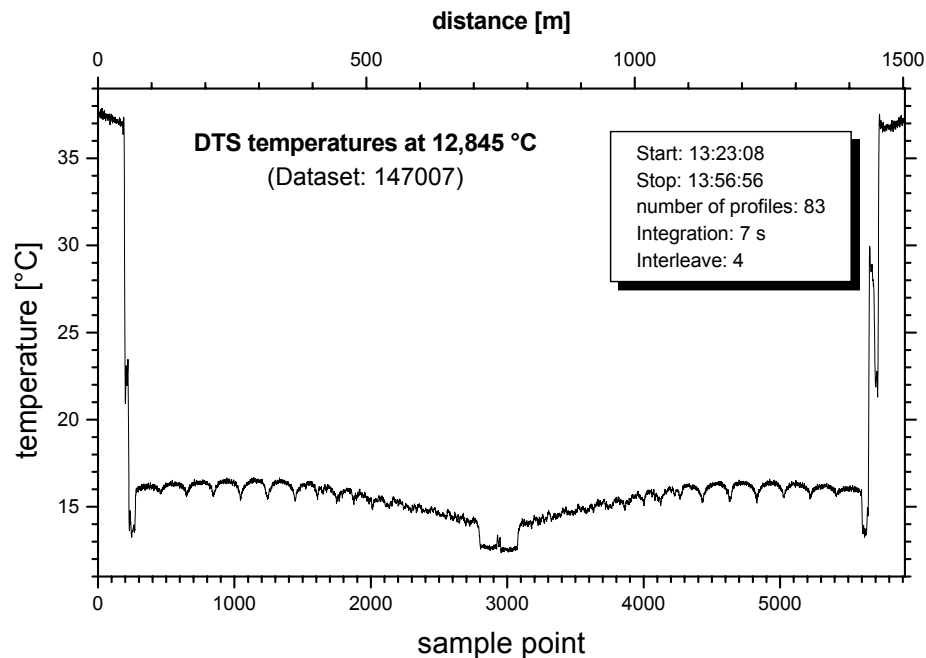


Abb. 17: Temperaturverlauf entlang des 700 m Kabels in der Klimakammer. Mittelung aller 83 Meßreihen.

Der geschwungene Verlauf im übrigen Kabelbereich ist auf den noch nicht vollständig erfolgten Angleich der auf der Kabeltrommel (s. [Abb. 11](#)) befindlichen Abschnitte des Kabels an die Kammertemperatur zurückzuführen.

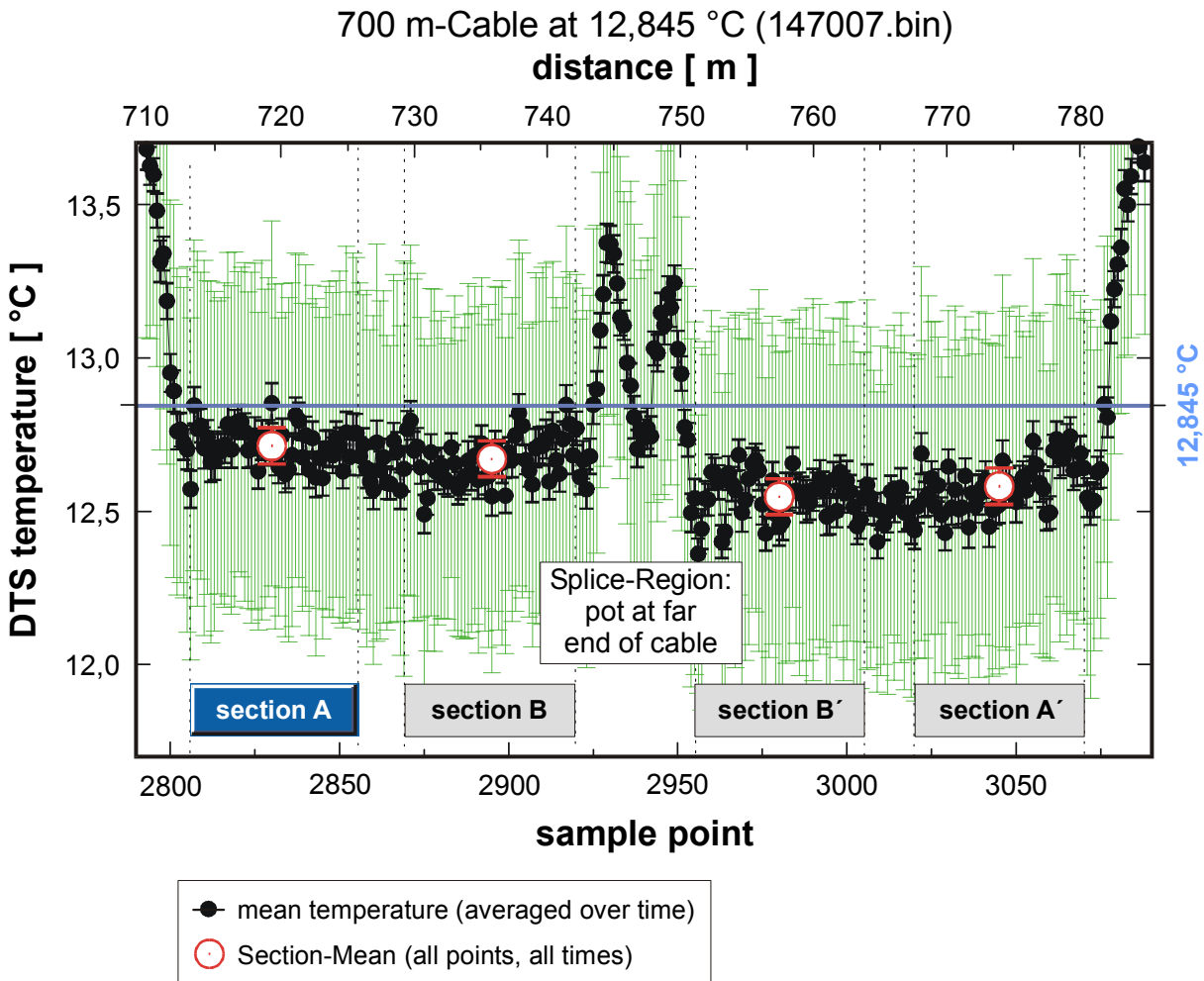


Abb. 18: Ausschnittsvergrößerung des Wasserbadbereiches (Abb. 17) für die Meßreihe bei 12,845°C. Die Messung erfolgte vor Anpassung der geräteinternen Parameter. Dies erklärt die Abweichung der Meßwerte von der Referenztemperatur.

Wie in der [Abbildung 18](#) deutlich zu erkennen ist, sind die Temperaturen innerhalb des Wasserbades für einzelne Bereiche auf geringfügig unterschiedlichem Niveau. Dies ist auf die Führung des Kabels innerhalb der Aluminiumplatten und dem Endstück zurückzuführen und in allen Meßreihen ähnlich deutlich zu erkennen. Die Bereiche A und B befinden sich jeweils zwischen 2 unterschiedlichen Platten, die Bereiche A' und B' sind die zurückgeführten Fasern zwischen diesen Platten im Anschluß an das Kabelendstück. Dieses Endstück befand sich außerhalb des Wasserbades, weshalb die Temperatur im mittleren Bereich zuerst leicht ansteigt. In der Mitte der Faserstrecke (bei 747,5 m) befindet sich die Verschweißungsstelle (Spleiß) zwischen den Fasern, die in allen Messungen deutlich zu erkennen ist. In den daran anschließenden Bereichen B' und A', wird eine leicht niedrigere Temperatur registriert. Dies wird als Dämpfungseinfluß des Spleiß gedeutet, da die Bereiche B' und A' örtlich mit den Bereichen B und A übereinstimmen (Schleifenmessung). Aufgrund dieser Um-

stände werden im folgenden nur noch die Temperaturen für den Bereich A (Abb. 19) untersucht und dargestellt. Diese Werte werden dann genutzt, um den Bereich des Kabels bis zum Endstück zu kalibrieren. Für die daran anschließende Faserstrecke kann die Kalibrierung prinzipiell nach dem gleichen Schema durchgeführt werden. Dann könnte in den Feldmessungen auch der zweite Teil der Temperaturmessungen ausgewertet werden, worauf im Moment aus Zeitgründen noch verzichtet wird.

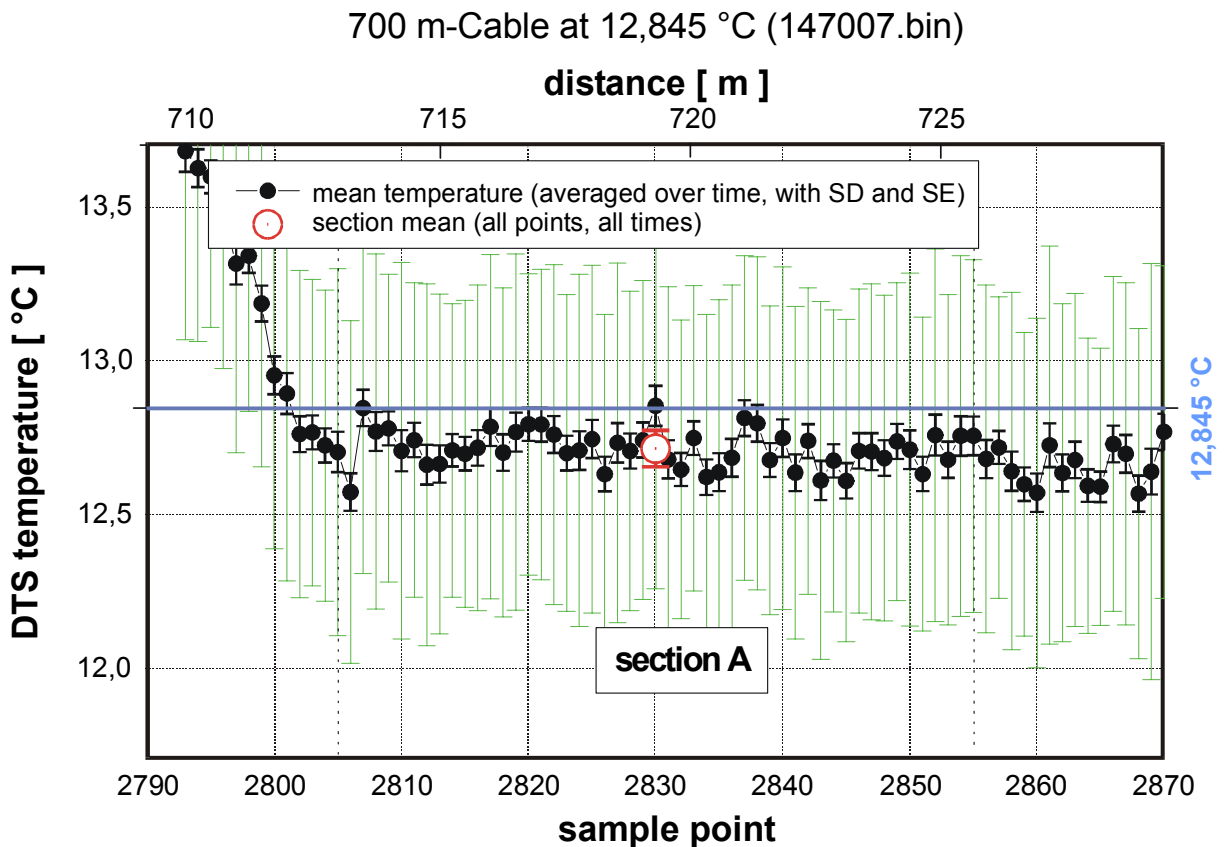


Abb. 19: Ausschnittsvergrößerung der [Abbildung 18](#) für den Bereich A innerhalb des Wasserbades. Dargestellt sind die Mittelwerte der Temperaturen aus 83 Meßreihen für die einzelnen Meßpunkte, die dazugehörigen RMS Fehler (SE, kurze Fehlerbalken) und die jeweilige Standardabweichung als Maß für die Reproduzierbarkeit (SD, lange Fehlerbalken)

4.1.4 Ergebnis der Kalibrierungen

Nach der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Vorgehensweise wurden für die einzelnen Temperaturstufen jeweils die Mittelwerte der Temperaturen im Bereich A ermittelt ([Tabelle 3](#) und [Abbildung 20](#)). Die mit dem DTS-Gerät ermittelten Temperaturen zeigen trotz einer schon sehr guten linearen Korrelation mit den Referenztemperaturen noch geringe Abweichungen von einer 45° Geraden. Durch eine Anpassung der geräteinternen Berechnungsparameter Slope (SLE) und Offset (RCT) kann eine noch geringfügig bessere Korrelation erreicht werden ([Abb. 20](#) und [21](#)).

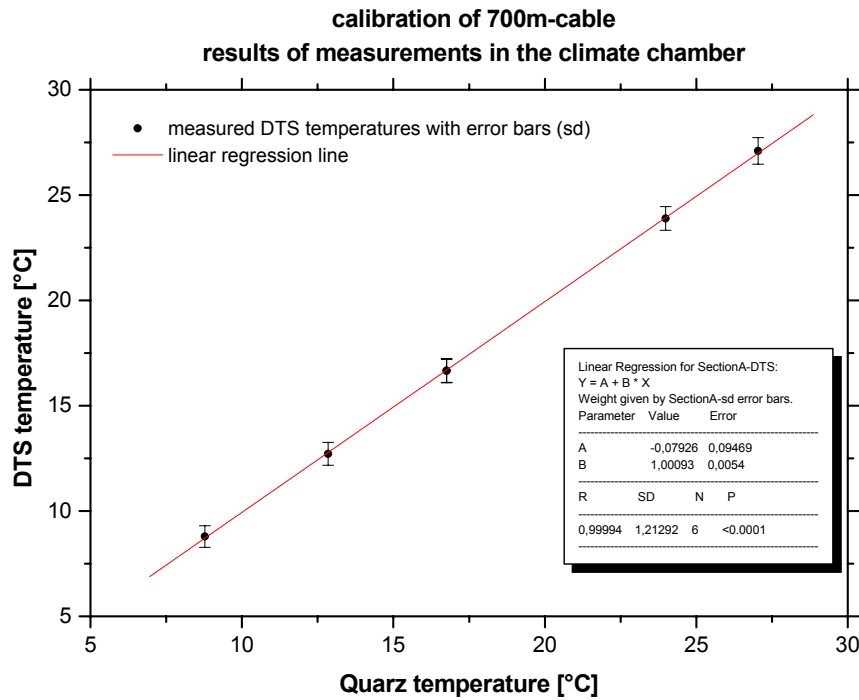


Abb. 20: Ergebnis der Kalibrierungsmessungen für das 700 m Kabel. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung aller Messungen im Bereich A für die jeweiligen Meßreihen wieder.

Messung	130007	147007	132007	133007	149007	111007
Referenztemperatur	8,78	12,845	16,755	16,75	23,989	27,04
DTS-Temperatur (Bereich A)	8,789 ± 0,007	12,71 ± 0,008	16,665 ± 0,007	16,65 ± 0,008	23,890 ± 0,009	27,095 ± 0,008
Standardabweichung	0,518	0,544	0,55	0,579	0,561	0,633
Mittelung über (Werte)	5457	4233	5763	4692	3774	5253
Minimum	6,8	10,8	14,65	14,8	21,95	24,1
Maximum	10,85	14,4	19	18,6	25,8	31,7
Bandbreite (Max-Min)	4,05	3,6	4,35	3,8	3,85	7,6
Standardabweichung (30- Minuten Mittel je Meßpunkt)	0,061	0,065	0,055	0,076	0,07	0,08
Differenzen (vor Kalibrierung)	0,009	-0,135	-0,0897	-0,1	-0,0985	0,055
Mittelwert der Differenzen (Betrag):	0,081 ± 0,018 °C Standardabweichung: 0,043					
Differenzen (nach Kalibrierung)	0,0695	-0,0652	-0,0108	-0,0209	-0,0022	0,0296
Mittelwert der Differenzen (Betrag):	0,033 ± 0,012 °C Standardabweichung: 0,028					

Tabelle 3: Zusammenstellung der Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen für das 700 m Kabel, gemessen mit Interleave 4 (0,25 m) Ortsauflösung.

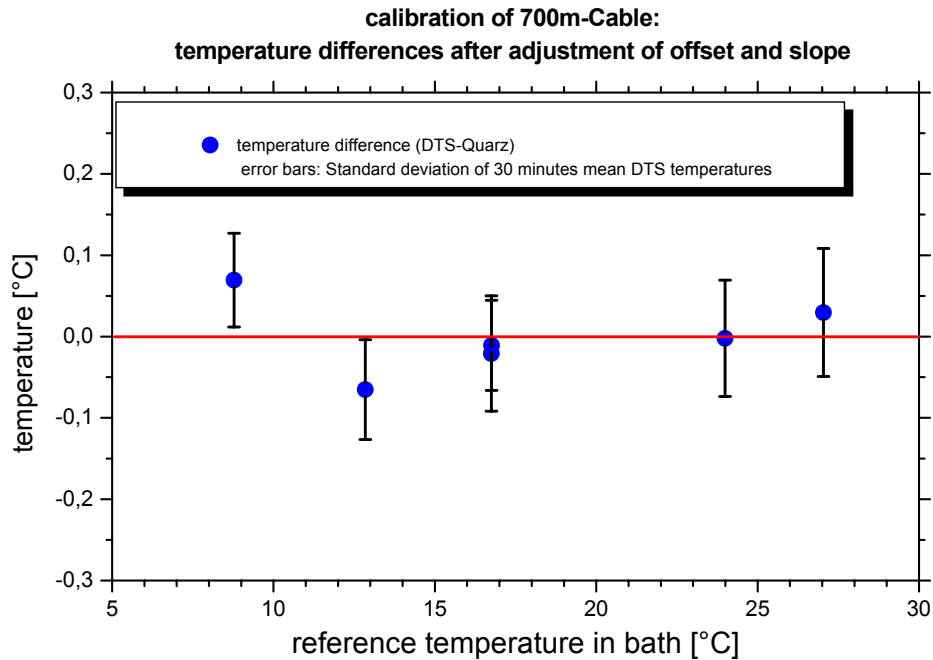


Abb. 21: Nach Anpassung geräteinterner Parameter für Offset (RCT) und Steigung (SLE) ergeben sich die dargestellten Differenzen zwischen den Temperaturen im Bereich A und den im Wasserbad gemessenen Referenztemperaturen.

Daraus ergibt sich folgendes Ergebnis aus den Kalibrierungsmessungen des 700 m Kabels: Die mit dem DTS-Meßsystem erzielbare Genauigkeit bei einer Meßdauer von ca. 30 Minuten ist $< \pm 0,08$ K mit einer Reproduzierbarkeit von $< \pm 0,075$ K.

4.1.5 Zeitliche Auflösung

Für alle Untersuchungen zeitlich veränderlicher Temperaturzustände ist es notwendig, die Genauigkeit der Temperaturmessungen für unterschiedliche Integrationsintervalle zu kennen. Testmessungen mit den vom Gerät fest vorgegebenen unterschiedlichen Integrationszeiten zeigten, daß im nachhinein gestapelte Messungen zu gleichen Ergebnissen wie solche mit äquivalent längeren Integrationszeiten liefern. Deshalb wurden alle Untersuchungen in der Folge mit der kürzesten Integrationszeit (Meßintervall 7 Sekunden) durchgeführt.

Eine erste Beurteilung der zeitlichen Auflösung ergibt die Analyse der zeitlichen Temperaturkonstanz für die Bereiche im Wasserbad. Das Referenzthermometer registrierte innerhalb der Meßdauer (ca. 30 Minuten) für die Meßreihe 147007 eine Temperaturkonstanz $< -0,02$ °C/h. Wie die Darstellung der zeitlichen Entwicklung im Bereich A (Abb. 22) zeigt, wird diese Temperaturkonstanz von dem DTS-System hervorragend wiedergegeben.

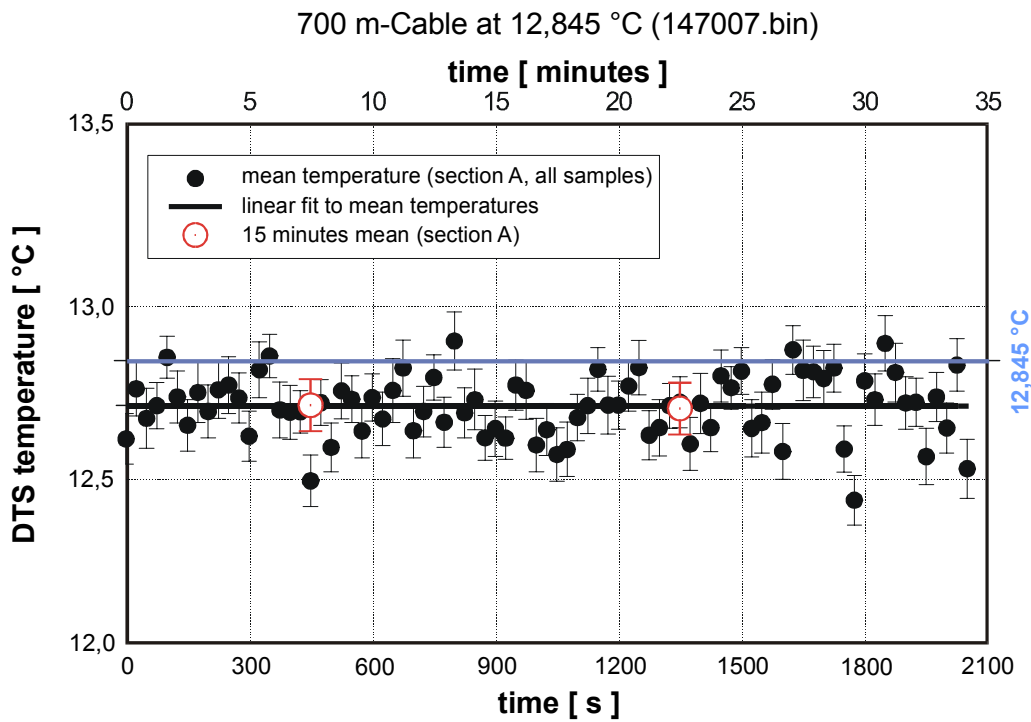


Abb. 22: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Temperaturen im Wasserbad. Die Konstanz der Wasserbadtemperatur wird sowohl durch die Mittelwerte über 15 minütige Zeitintervalle als auch durch die lineare Regression aller Meßwerte sehr gut wiedergegeben.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung für einen einzelnen Ort innerhalb des Wasserbades (Abb. 23), so ist zwar die Streuung der einzelnen Werte wesentlich größer, der Trend (konstante Umgebungstemperatur) wird jedoch weiterhin sehr genau wiedergegeben. Hieraus läßt sich die Genauigkeit einer einzelnen Temperaturmessung für eine örtliche Auflösung von ca. 0,25 m (Interleave 4) angeben:

Anzahl der Messungen:	83
Zeitintervall:	7 s
Mittelwert:	$12,67 \pm 0,05 \text{ °C}$
Standardabweichung:	0,49 °C
Bandbreite (Min-Max):	11,65 – 13,95 °C
Lineare Regression:	$T=12,64621\text{°C} + 6,49637\text{E-}4\text{°C/s} * t$

Tab. 4: Ergebnisse der Messungen für Meßpunkt 2844

700 m-Cable at 12,845 °C (147007.bin)

averaging interval: 7 s

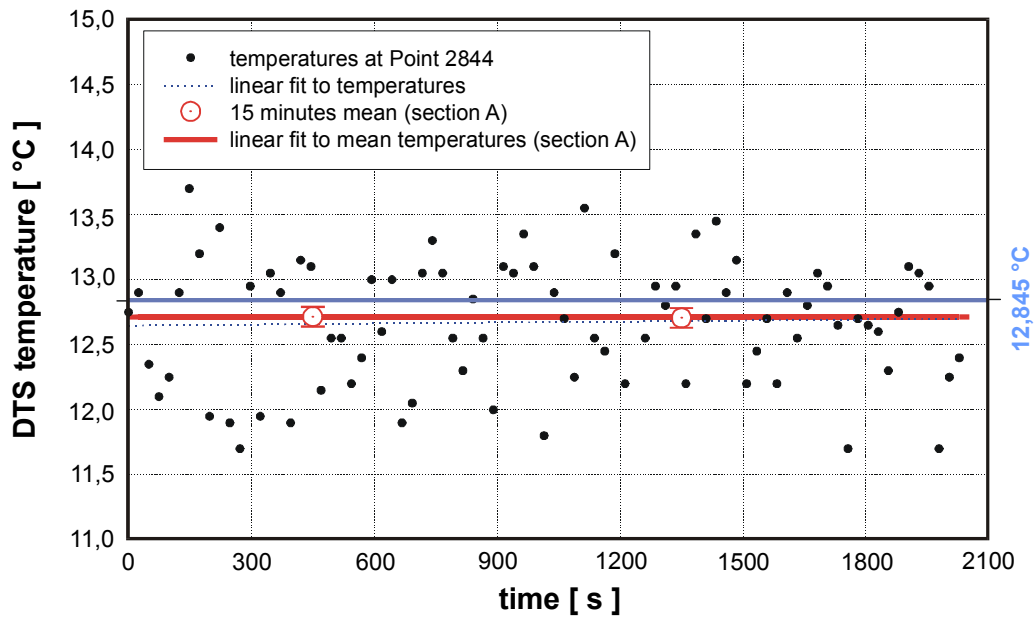


Abb. 23: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen für sample point 2844 während der Messungen im Wasserbad. Die Temperaturkonstanz des Wasserbades wird sehr gut wiedergegeben. Die Messung erfolgte vor Anpassung der geräteinternen Parameter. Dies erklärt die Differenz zwischen den Mittelwerten und der Referenztemperatur.

In den Abbildungen 24 und 25 sind die Ergebnisse der Mittelwertbildungen über 10 bzw. 20 Messungen für den selben Meßpunkt in dem Wasserbadbereich dargestellt. Die Ergebnisse der Mittelungen (stacks) sind in den Tabellen 5 und 6 zusammengefaßt.

700 m-Cable at 12,845 °C (147007.bin)

10 stacks (single integration time: 7s)

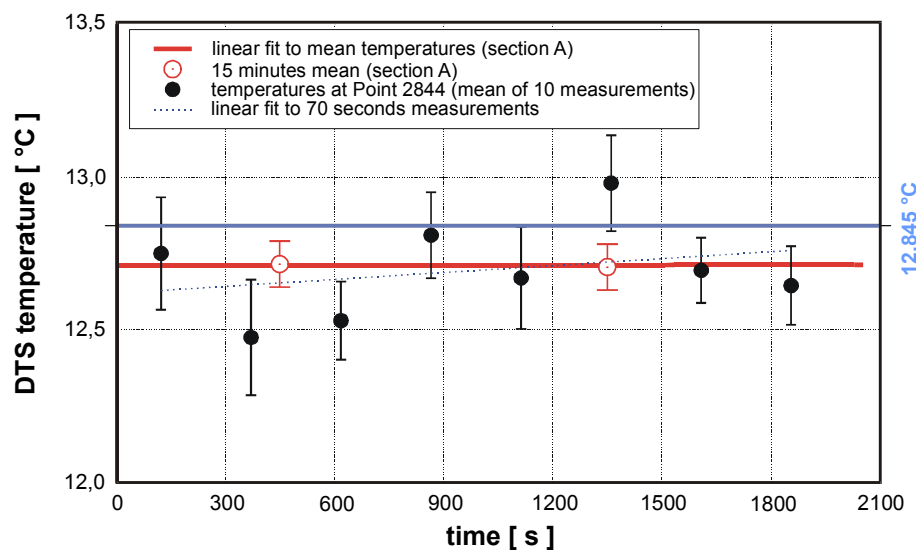


Abb. 24: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturen für sample point 2844 bei Mittelwertbildung über 10 Zeitintervalle a 7 s.

Intervallmitte [s]	Mittelwert [°C]	Standardabweichung	RMS-Fehler
123,65	12,75	0,58	0,18
370,97	12,48	0,60	0,19
618,29	12,53	0,40	0,13
865,60	12,81	0,45	0,14
1112,92	12,67	0,53	0,17
1360,24	12,98	0,50	0,16
1607,56	12,70	0,34	0,11
1854,87	12,65	0,41	0,13

Tabelle 5: Ergebnis der Mittelung über 10 Zeitintervalle für sample point 2844

Intervallmitte [s]	Mittelwert [°C]	Standardabweichung	RMS-Fehler
247,32	12,61	0,59	0,13
741,95	12,67	0,44	0,10
1236,59	12,82	0,52	0,12
1731,22	12,67	0,36	0,08

Tabelle 6: Ergebnis der Mittelung über 20 Zeitintervalle für sample point 2844

700 m-Cable at 12,845 °C (147007.bin)
20 stacks (single integration time: 7s)

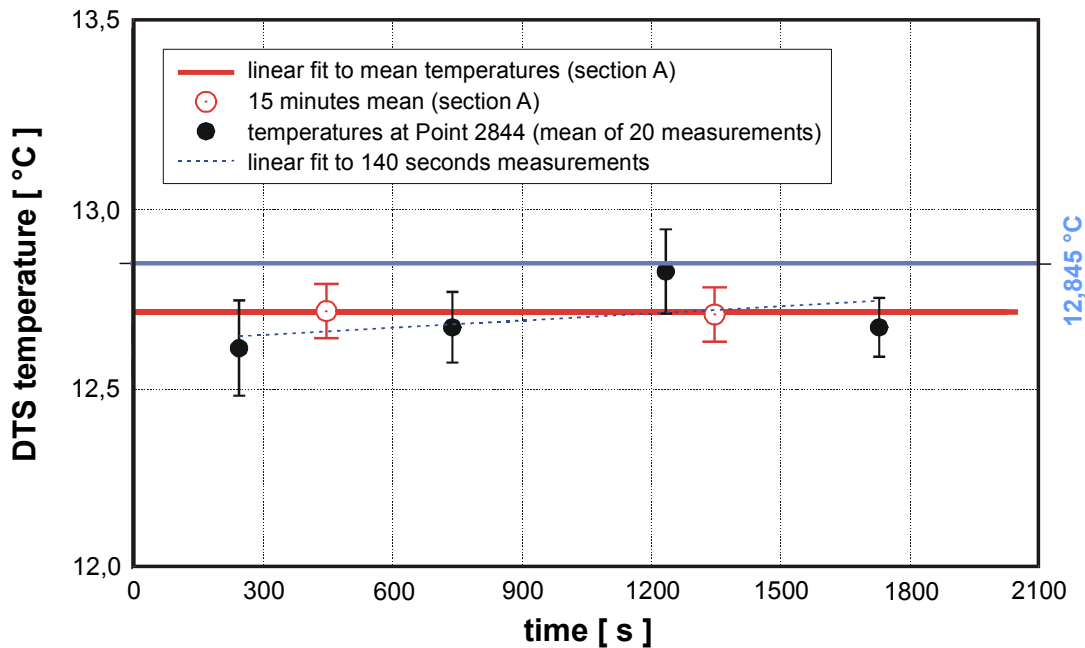


Abb. 25: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturen für sample point 2844 bei Mittelwertbildung über 20 Zeitintervalle a 7s.

Anzahl stacks	10	20
Anzahl Werte	8	4
entspricht Integrationszeit:	70 s	140 s
Mittelwert [°C]:	12,69 ± 0,06	12,69 ± 0,05
Standardabweichung:	0,16	0,09
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	12,48 – 12,98	12,61 – 12,83
Lineare Regression:	12,62°C + 8,42E-5°C/s * t	12,63°C + 1,47E-4°C * t

Tabelle 7: Ergebnis der Analyse der Stapelung (Stack) der Meßergebnisse für einen Punkt innerhalb des Wasserbads über verschiedene Zeitintervalle (sample point 2844, Messung 147007, s. Abb. 24 und 25).

Integrationsintervall [min]:	15	15
Anzahl Werte	1938	1938
Mittelwert [°C]:	12,71577 ± 0,01246	12,71558 ± 0,01232
Standardabweichung:	0,54106	0,54214
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	11,35 – 14,35	11,2 – 14,2

Tabelle 8: Ergebnis der Analyse der Stapelung der Meßergebnisse für den Bereich A über jeweils 15 Minuten (Bereich: 2805-2855, Messung 147007, s. Abb. 19 und 22).

Der Vergleich der gestapelten Temperaturen für einen Punkt (Abb. 25) mit den Mittelwerten für den gesamten Bereich A für einen Zeitbereich von jeweils 15 Minuten (Tabelle 8) zeigt, daß eine Integrationszeit von 140 s für einen Ort die zeitliche Entwicklung schon ähnlich gut abbildet.

4.1.6 Beurteilung der Datenqualität bei Feldmessungen

Abbildung 26 und Tabelle 9 zeigen, daß die Temperaturen für die Reference Coil Bereiche zur Beurteilung der Güte einer Messung herangezogen werden können, obwohl die geräteinterne Temperaturkonstanz offensichtlich etwas schlechter realisiert ist als die mit großem Aufwand hergestellte Temperaturkonstanz im Wasserbad.

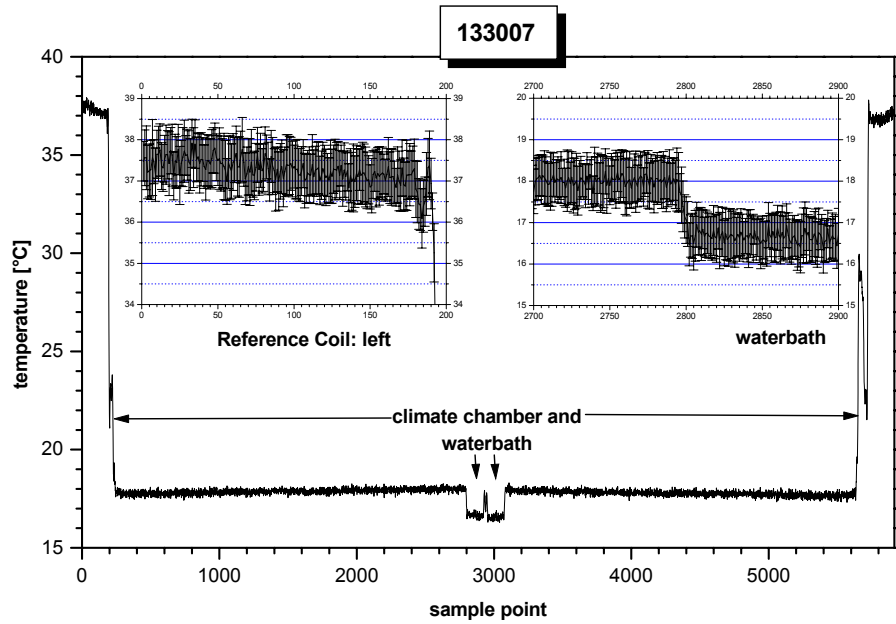


Abb. 26: Vergleichende Darstellung der Temperaturen für einen Bereich aus Klimakammer und Wasserbad mit einem gleich langen Bereich der linken Reference Coil für die Messung 133007. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der Mittelwerte wieder, Mittelung über 80 Meßzyklen a' 7s.

	Reference Coil links	Wasserbad (Bereich A)	Reference Coil rechts
Intervall	1-51	2805-2855	5864-5914
Anzahl sample points	51	51	51
Anzahl Werte	4080	4080	4080
Integrationsintervall [s]:	7	7	7
Mittelwert [°C]:	37,52578	16,65647	37,06516
RMS-Fehler:	0,01052	0,00889	0,0106
Standardabweichung:	0,67201	0,56795	0,67693
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	35,35-40,0	14,8-18,6	34,65-39,5
Differenz: Max-Min [°C]:	4,65	3,8	4,85

Tabelle 9: Statistische Analyse der Temperaturen im Bereich A (Wasserbad) und gleich langer Bereiche der geräteinternen Referenzstrecken (Messung 133007).

Die [Abbildung 27](#) zeigt Meßwerte einer Langzeittemperaturmessung mit dem 700 m Kabel in der NSF/ICDP-Bohrung auf Hawaii ([Dannowski et al., 1999](#)). Der Vergleich mit den Messungen in der Klimakammer für die Bereiche der Reference Coil zeigt, daß die Datenqualität nur unwesentlich schlechter ist ([Tab. 10](#)).

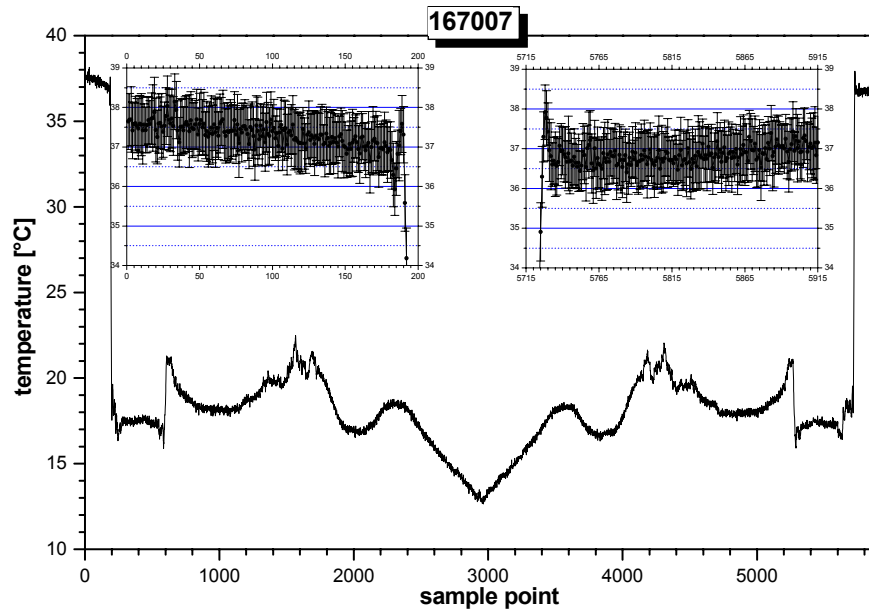


Abb. 27: Vergleichende Darstellung der Temperaturen für die Bereiche der Reference Coils für die Messung 167007 in der ICDP-Bohrung auf Hawaii. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der Mittelwerte wieder, Mittelung über 80 Meßzyklen α 7s.

Messung:	167007		133007	
	Reference Coil links	Reference Coil rechts	Reference Coil links	Reference Coil rechts
Intervall	1-51	5864-5914	1-51	5864-5914
Anzahl sample points	51	51	51	51
Anzahl Werte	4080	4080	4080	4080
Integrationsintervall [s]:	7	7	7	7
Mittelwert [°C]:	37,61005	37,04096	37,52578	37,06516
RMS-Fehler:	0,0112	0,0113	0,01052	0,0106
Standardabweichung:	0,71552	0,72163	0,67201	0,67693
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	34,65-40,05	34,65-39,8	35,35-40,0	34,65-39,5
Differenz: Max-Min [°C]:	5,4	5,15	4,65	4,85

Tabelle 10: Statistische Analyse der Temperaturen der geräteinternen Referenzstrecken der Messung 167007 in der ICDP-Bohrung auf Hawaii im Vergleich mit den Werten der Messung 133007 (Klimakammer).

5 Messungen an einem 2000 m Kabel

Das 2000 m Kabel wurde von der Firma BICC Thermoheat (UK) als Ersatz für ein nicht fristgerecht geliefertes 4 km Bohrlochmeßkabel für Messungen in der NSF/ICDP-Bohrung auf Hawaii zur Verfügung gestellt. Der Kabelaufbau ist in der [Abbildung 28](#) dargestellt.

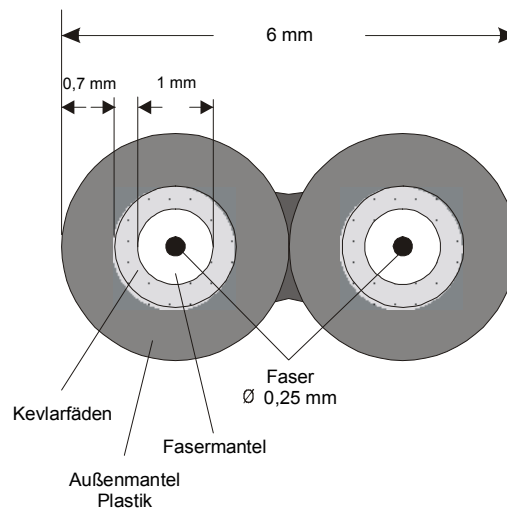


Abb. 28: Aufbau des 2000 m Kabels für faseroptische Temperaturmessungen.

Bei der verwendeten Faser handelt es sich um eine handelsübliche Mehrmodenfaser (50/125 μ m) mit Gradientenindex-Profil. Der Einsatzbereich des Kabels wird von der Firma BICC mit max. 90 °C angegeben. Auch für dieses Kabel wurde eine Kabelenddose gefertigt ([Abb. 29](#)) innerhalb derer sich der Spleiß der beiden für die Schleifenmessungen (Double-ended) verwendeten Fasern liegt.



Abb. 29: Kabelendstück des 2000 m DTS-Meßkabels.

5.1.1 Längenbestimmung

Die Längenbestimmung für das 2000m Kabel (Tab. 11) erfolgte analog zu der Bestimmung für das 700 m Kabel (s. Kap. 4.1.1) bei einer Umgebungstemperatur von ca. 22°C. Aufgrund des schlechteren Signal-Rausch Verhältnisses sind die Fehlerbereiche der Längenbestimmung (Mittelwertbildung über mehrere Meßreihen an beiden Enden von LOOP2) um den Faktor 2 größer.

	Länge Reference Coil:	Faserende bei:
Interleave 4:	50,33 ($\pm 0,05$) m	3913,77 ($\pm 0,1$) m

Tabelle 11: Zusammenstellung der Ergebnisse der Längenmessungen am 2000 m Kabel (LOOP2)

5.1.2 Bestimmung der Dämpfungseigenschaften

Die Dämpfungswerte der Faserstrecke wurden wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben ermittelt. Sie sind ca. um den Faktor 2 größer als die des 700 m Kabels (Tab. 2)

Signaltyp	CNTSE1	CNTSE2	CTTSE1	CTTSE2
Amplitude bei Sample point:				
1	8430,3	9433,1	8441,2	9481,5
15596	1043,8	1137,5	766,5	841,6
Dämpfung [dB]	-9,07	-9,19	-10,42	-10,52

Tabelle 12: Amplituden-Dämpfung für die verschiedenen Signaltypen, bestimmt aus einer Messung bei 25°C für das 2000 m Kabel

Die Gesamtdämpfung des Meßsystems liegt damit weiterhin deutlich unterhalb des vom Hersteller für sinnvolle Temperaturmessungen vorgegebenen Grenzwertes von -20 dB.

5.1.3 Messungen bei 25 °C

Beispielhaft für die Vorgehensweise an den einzelnen Temperatur-Stützstellen für die Kalibrierung werden die Ergebnisse der Messungen bei 25°C vorgestellt. Diese Temperatur befindet sich in im mittleren Bereich des Kalibrierungsintervalles (12 °C bis 41 °C). Einen Überblick über das Meßergebnis zeigt die Abb. 30. Die Anfangs-

bzw. Endwerte der Referenztemperatur waren 25,096 °C bzw. 25,078 °C. Daraus ergibt sich eine mittlere Referenztemperatur von 25,087 °C.

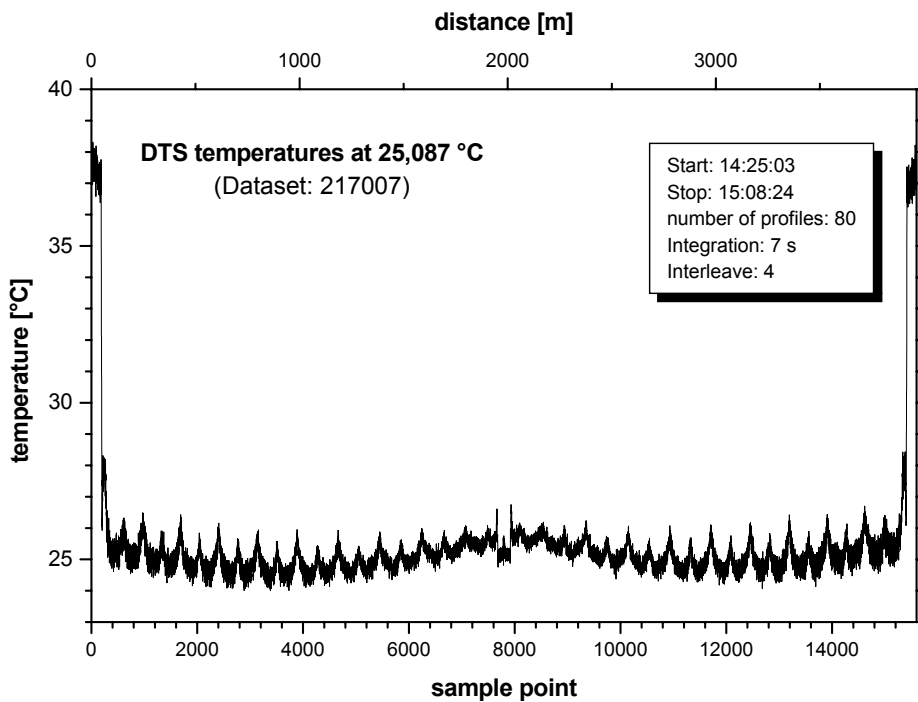


Abb. 30: Temperaturverlauf entlang des 2000 m Kabels in der Klimakammer. Mittelung aller 80 Meßreihen.

In der [Abbildung 30](#) sind deutlich die Referenzbereiche innerhalb des Meßgerätes sowie der Bereich des Wasserbades (Bildmitte) zu erkennen. Der geschwungene Verlauf im übrigen Kabelbereich ist auf den noch nicht vollständig erfolgten Angleich der auf der Kabeltrommel (s. [Abb. 11](#)) befindlichen Abschnitte des Kabels an die Kammertemperaturen zurückzuführen. Dies hat jedoch keinen Einfluß auf die Güte der Kalibrierungen, wie eine Ausschnittsvergrößerung des Bereiches des Wasserbades zeigt die [Abb. 31](#).

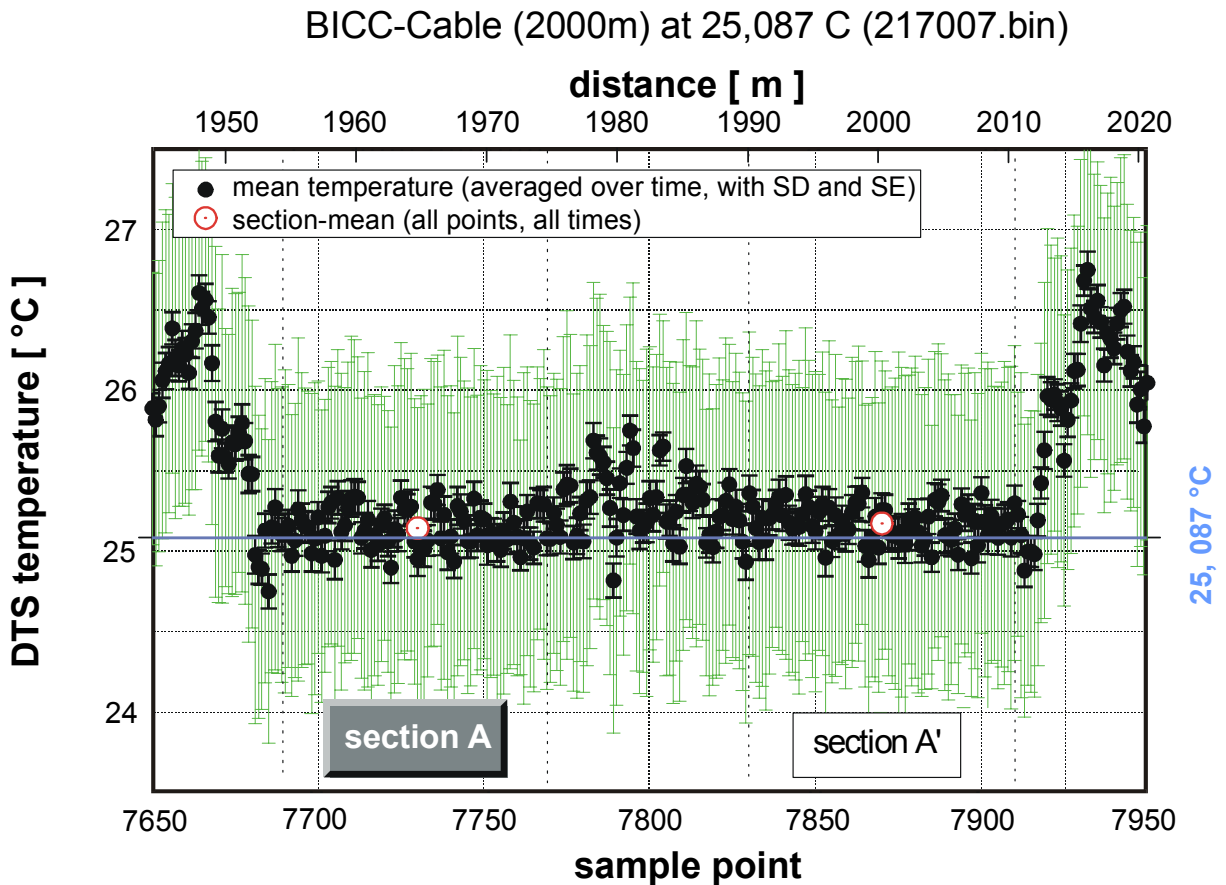


Abb. 31: Ausschnittsvergrößerung des Wasserbadbereiches für die Meßreihe 217007 bei 25,087°C.

Wie bei dem 700 m Kabel ([Abbildung 18](#)) ist die Stelle des Spleißes am Kabelende deutlich zu erkennen, der Einfluß auf die darauf folgenden Temperaturmeßwerte ist jedoch geringer. Die Streuung der Meßwerte ist im Vergleich zu denen bei den Messungen am 700 m Kabel erhöht. Der Bereich innerhalb der Aluminiumplatten scheint homogener ausgebildet zu sein. Aus diesem Grund kann für dieses Kabel eine feinere Unterteilung in Unterbereiche entfallen. Die Kalibrierungen wurden mit den Werten aus dem Bereich A ([Abb. 31](#) und [32](#)) durchgeführt.

BICC-Cable (2000m) at 25,087 C (217007.bin)

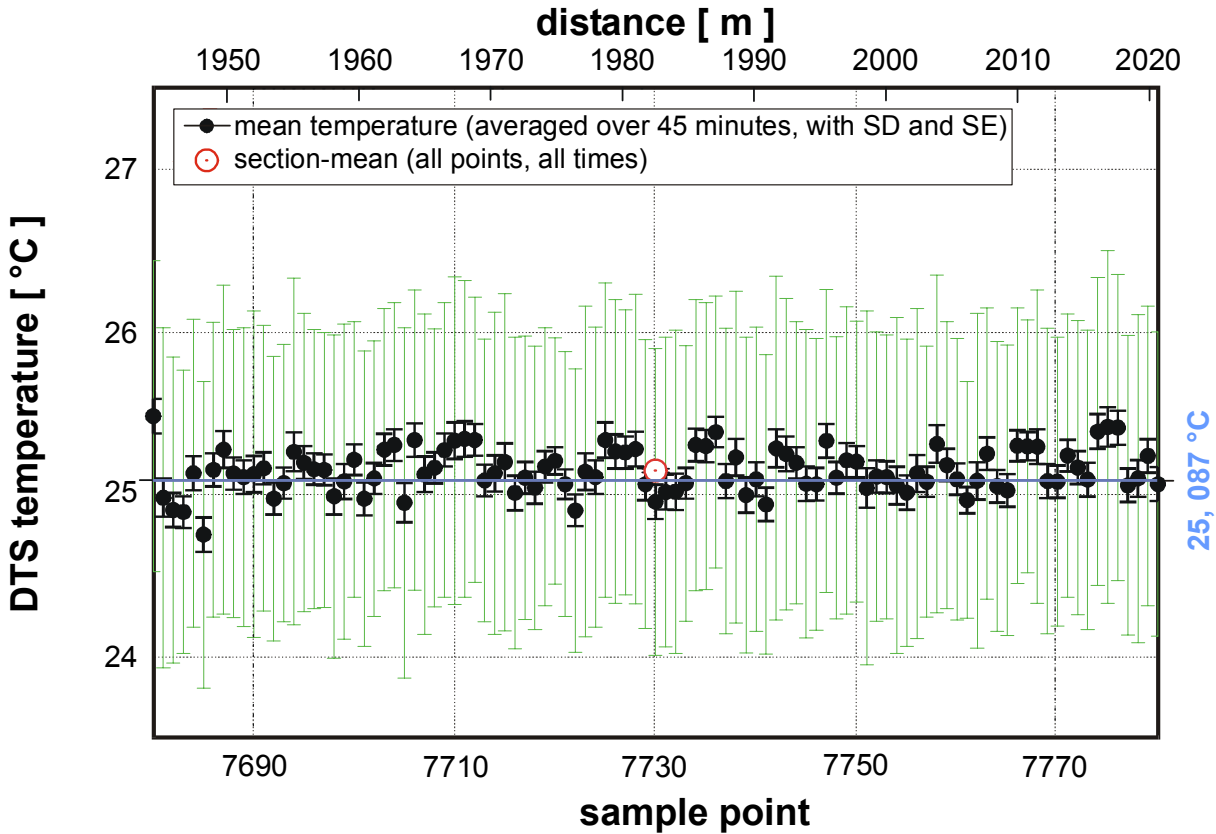


Abb. 32: Ausschnittsvergrößerung der [Abbildung 31](#) für den Bereich A innerhalb des Wasserbades. Dargestellt sind die Mittelwerte der Temperaturen aus 83 Meßreihen für die einzelnen Meßpunkte, die dazugehörigen RMS Fehler (schwarze Fehlerbalken) und die jeweilige Standardabweichung als Maß für die Reproduzierbarkeit (grüne Fehlerbalken)

5.1.4 Ergebnis der Kalibrierungen

Analog der Vorgehensweise in [Abschnitt 4.1.4](#) für das 700m Kabel werden erst die Ergebnisse der Kalibrierungen für das untersuchte Temperaturintervall dargestellt. Anschließend erfolgt eine Beurteilung der zeitlichen Auflösung.

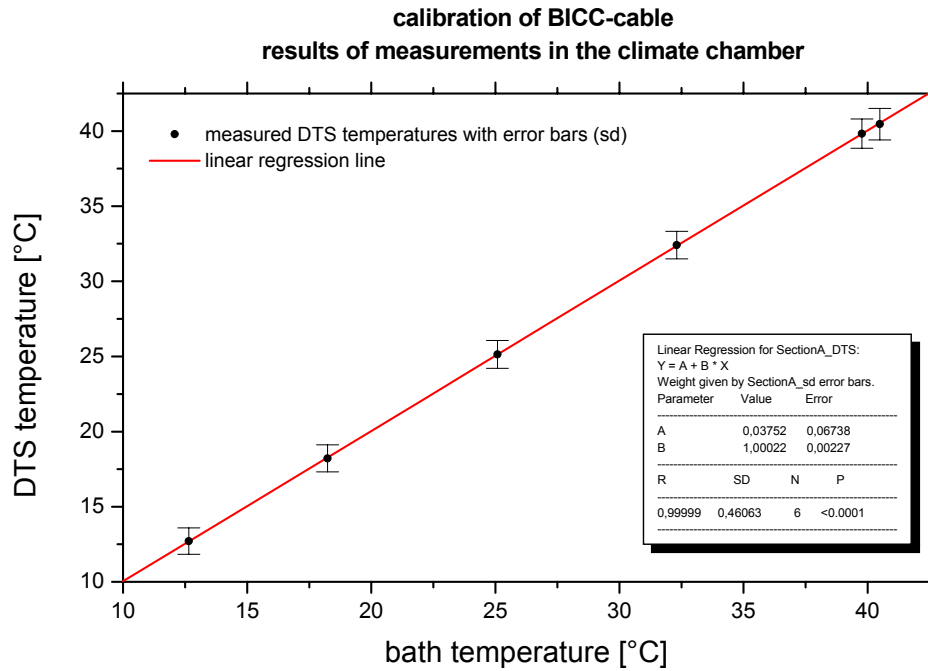


Abb. 33: Ergebnis der Kalibrierungsmessungen für das 700 m Kabel. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung aller Messungen im Bereich A für die jeweiligen Meßreihen wieder.

Messung:	215007	216007	217007	219007	225007	212007
Referenztemperatur	12,65	18,24	25,086	32,31	39,77	40,49
DTS-Temperatur (Bereich A)	12,71 ± 0,011	18,22 ± 0,011	25,14 ± 0,011	32,41 ± 0,011	39,83 ± 0,010	40,46 ± 0,009
Standardabweichung	0,88	0,90	0,93	0,92	0,97	1,05
Mittlung über (Werte)	6480	6237	6480	6804	8829	12555
Minimum	9,25	15,2	22,2	29	36,1	36,35
Maximum	15,85	21,2	28,85	35,6	43,35	44,85
Bandbreite (Max-Min)	6,6	6	6,65	6,6	7,25	8,5
Standardabweichung (30- Minuten Mittel je Meßpunkt)	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,14
Differenzen (vor Kalibrierung)	0,06	-0,02	0,054	0,1	0,06	-0,03
Mittelwert der Differenzen (Betrag):	0,054 ± 0,011 °C Standardabweichung: 0,028					
Differenzen (nach Kalibrierung)	0,025	-0,053	0,022	0,07	0,031	-0,059
Mittelwert der Differenzen (Betrag):	0,043 ± 0,008 °C Standardabweichung: 0,02					

Tabelle 13: Zusammenstellung der Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen für das 2000 m Kabel.

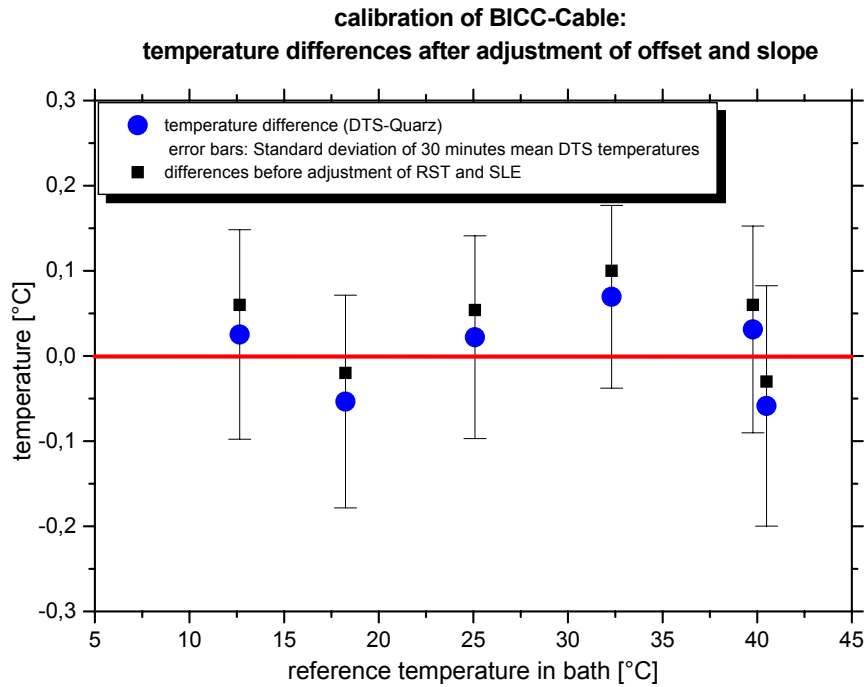


Abb. 34: Differenzen zwischen den DTS-Temperaturen im Bereich A und den Referenztemperaturen vor und nach der Anpassung der geräteinterner Parameter für Offset (RCT) und Steigung (SLE).

Es ergibt sich folgendes Ergebnis aus den Kalibrierungsmessungen des 2000 m Kabels: Die mit dem DTS-Meßsystem erzielbare Genauigkeit bei einer Meßdauer von ca. 30 Minuten ist $< \pm 0,1$ K mit einer Reproduzierbarkeit (Standardabweichung) von $< \pm 0,15$ K.

5.1.5 Zeitliche Auflösung

Analog zur Vorgehensweise beim 700 m Kabel wurde zuerst eine Analyse der zeitlichen Temperaturkonstanz für die Bereiche im Wasserbad durchgeführt. Das Referenzthermometer registrierte innerhalb der Meßdauer (ca. 30 Minuten) für die Meßreihe 217007 eine Temperaturkonstanz $< -0,05$ °C/h. Wie die Darstellung der zeitlichen Entwicklung im Bereich A (Abb. 34) zeigt, wird diese Temperaturkonstanz von dem DTS-System, trotz einer einzelnen Meßreihe (bei 300 s, s. Abb. 34), die durchgängig höhere Temperaturen aufwies, sehr gut wiedergegeben.

BICC-Cable (2000m) at 25,087 C (217007.bin)

temperatures in section A

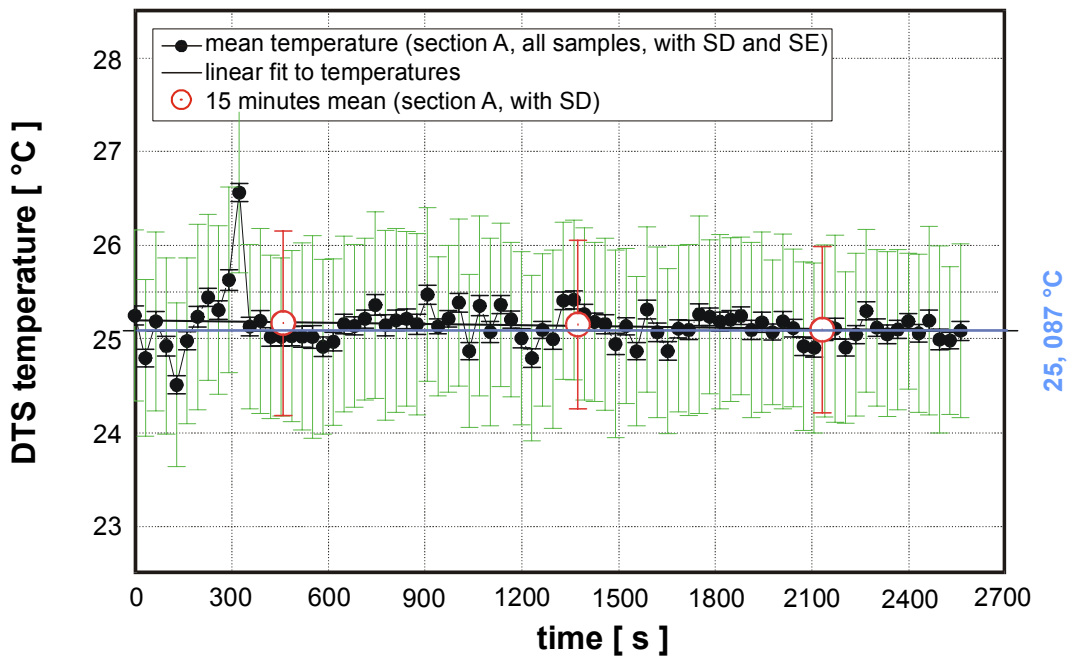


Abb. 34: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Temperaturen im Wasserbad. Die konstante Wasserbadtemperatur wird sowohl durch die Mittelwerte über 15 minütige Zeitintervalle als auch durch die lineare Regression aller Meßwerte sehr gut wiedergegeben.

BICC-Cable (2000m) at 25,087 C (217007.bin)

temperatures at point 7695, integration time: 7s

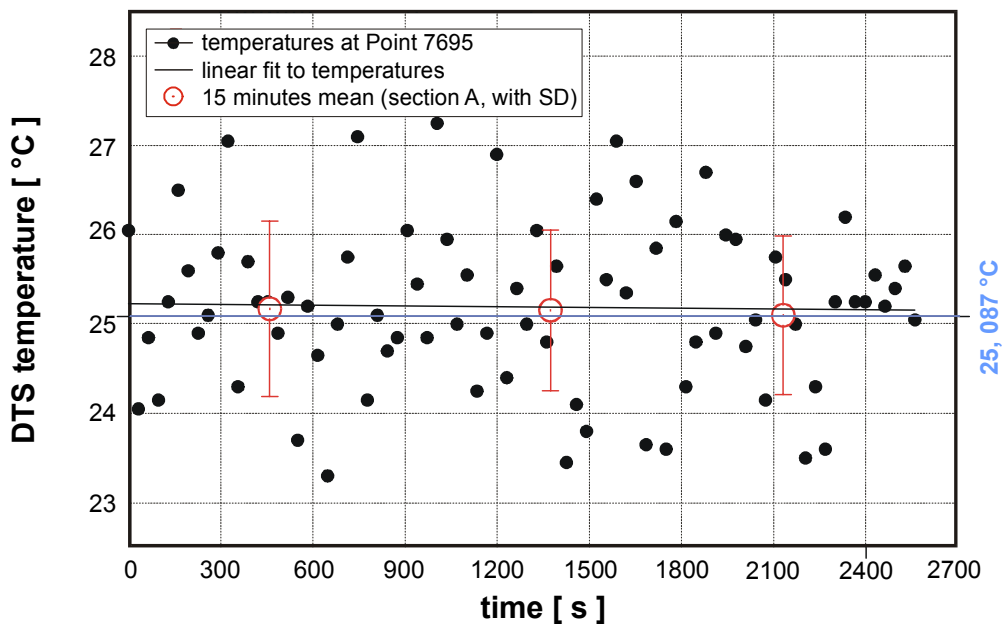


Abb. 35: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen für Meßintervall 7695 während der Messungen im Wasserbad. Die Temperaturkonstanz des Wasserbades wird sehr gut wiedergegeben.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung für einen einzelnen Ort innerhalb des Wasserbades (Abb. 35), so ist zwar die Streuung der einzelnen Werte wesentlich größer, der Trend (konstante Umgebungstemperatur) wird jedoch weiterhin sehr genau wiedergegeben. Hieraus läßt sich die Genauigkeit einer einzelnen Temperaturmessung für einen Meßbereich von 1m und einer örtlichen Auflösung von ca. 0,25 m (Interleave 4) angeben:

Anzahl der Messungen:	80
Zeitintervall:	7 s
Mittelwert:	$25,19 \pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$
Standardabweichung:	$0,92 \text{ } ^\circ\text{C}$
Bandbreite (Min-Max):	$23,3 - 27,35 \text{ } ^\circ\text{C}$
Lineare Regression:	$T=25,23^\circ\text{C} - 2,84804\text{E-}5 \text{ } ^\circ\text{C/s} * t$

Tab. 14: Ergebnisse der Messungen für das Meßintervall 7695

BICC-Cable (2000m) at 25,087 C (217007.bin)
10 stacks (single integration time: 7s)

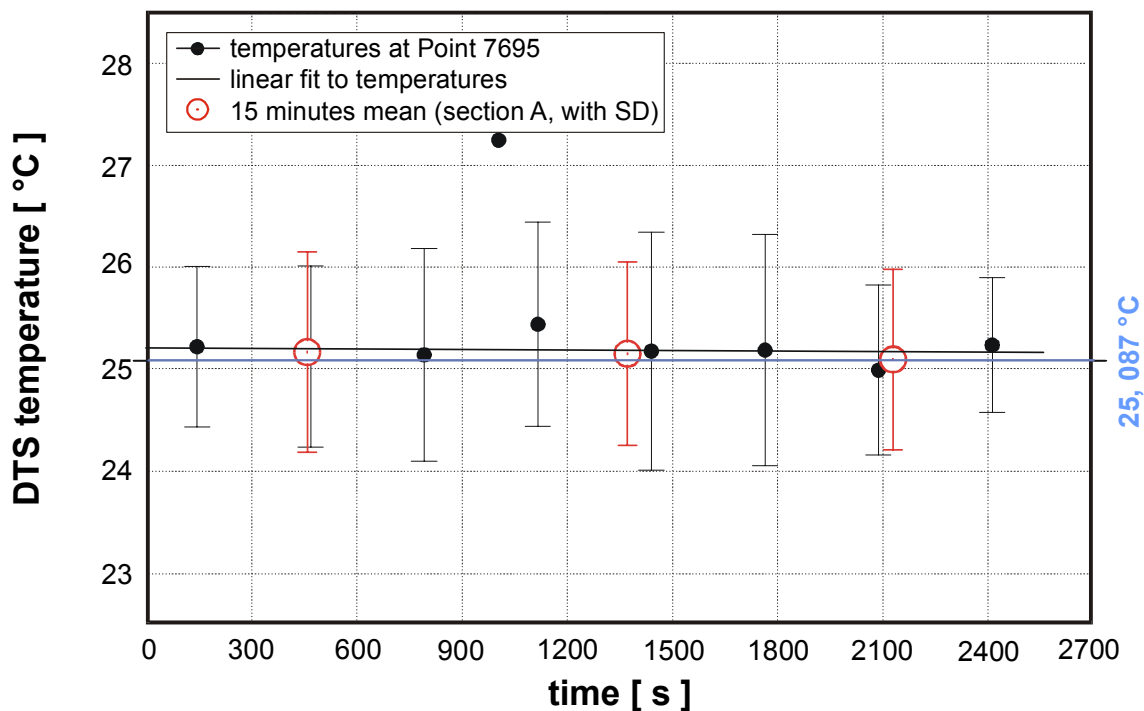


Abb. 36: Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Temperaturen für Meßintervall 7695 bei Mittelwertbildung über 10 Zeitintervalle a' 7 s.

Intervallmitte [s]	Mittelwert [°C]	Standardabweichung	RMS-Fehler
145,74	25,23	0,79	0,29
469,62	25,13	0,89	0,28
793,49	25,15	1,04	0,33
1117,39	25,45	1,00	0,32
1441,24	25,18	1,17	0,37
1765,12	25,19	1,13	0,39
2088,99	25,00	0,83	0,26
2412,89	25,24	0,66	0,21

Tabelle 15: Ergebnis der Mittelung über 10 Zeitintervalle für sample point 7695

Intervallmitte [s]	Mittelwert [°C]	Standardabweichung	RMS-Fehler
291,49	25,18	0,82	0,18
939,24	25,30	1,01	0,23
1586,99	25,19	1,12	0,25
2234,74	25,12	0,74	0,17

Tabelle 16: Ergebnis der Mittelung über 20 Zeitintervalle für sample point 2844

BICC-Cable (2000m) at 25,087 C (217007.bin)
20 stacks (single integration time: 7s)

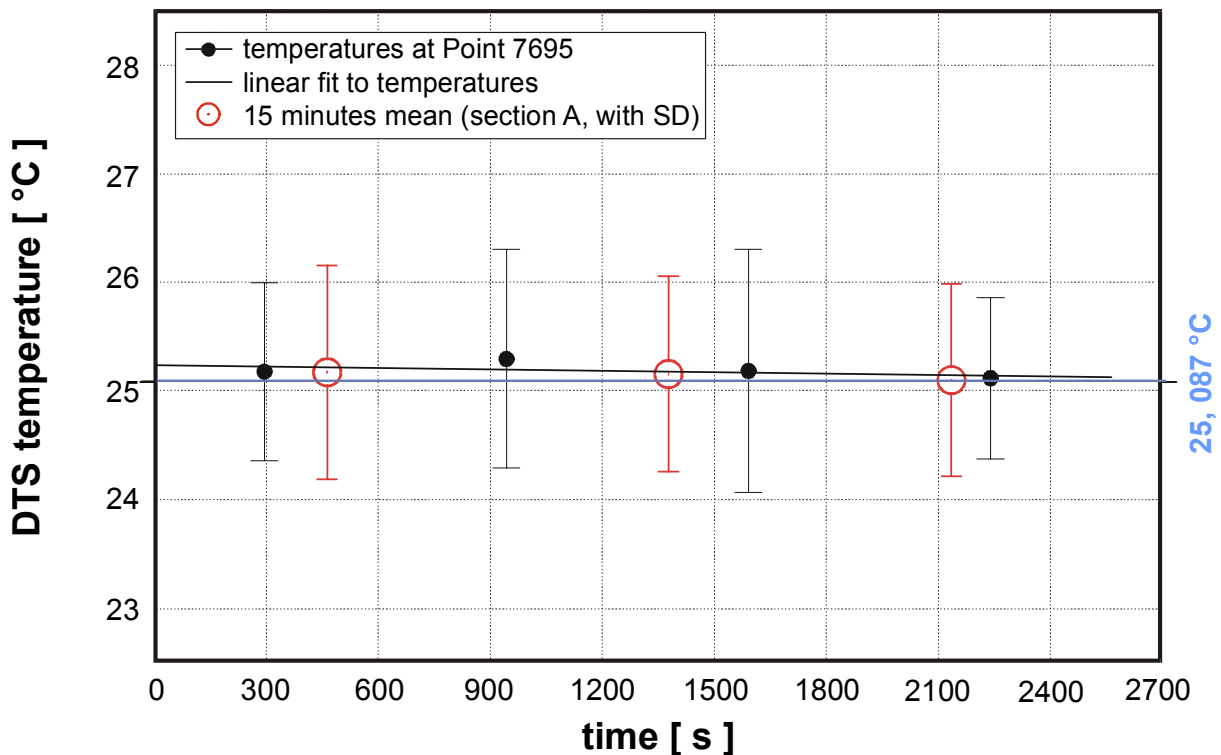


Abb. 37: Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Temperaturen für sample point 7695 bei Mittelwertbildung über 20 Zeitintervalle a' 7s.

Anzahl stacks	10	20
Anzahl Werte	8	4
entspricht Integrationszeit:	70 s	140 s
Mittelwert [°C]:	25,19 ± 0,04	25,19 ± 0,04
Standardabweichung:	0,13	0,07
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	25,00 – 25,45	25,12 – 25,30

Tabelle17: Ergebnis der Analyse der Stapelung (Stack) der Meßergebnisse für einen Punkt innerhalb des Wasserbads über verschiedene Zeitintervalle (sample point 7695, Messung 217007, s. Abb. 36 und 37).

Integrationsintervall [min]:	15	15	15
Anzahl Werte	2268	2268	1944
Mittelwert [°C]:	25,17 ± 0,02	25,16 ± 0,02	25,10 ± 0,02
Standardabweichung:	0,98	0,899	0,89
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	22,2 – 28,85	22,4 – 28,0	22,35 – 28,2

Tabelle18: Ergebnis der Analyse der Stapelung der Meßergebnisse für den Bereich A über jeweils 15 Minuten (Bereich: 7690-7770, Messung 217007, s. Abb. 34 bis 37).

Auch für das 2000 m Kabel geben die Stapelungen von 20 Zeitintervallen a' 7s für das Meßintervall 7695 (Tab. 17) den 15 minütigen Mittelwert (Tab. 18) sehr gut wieder.

5.1.6 Beurteilung der Datenqualität bei Feldmessungen

Vergleicht man mit den Analysen für eine Messung mit dem 700m Kabel (Tab. 20, s.a. Tab. 10) so wird der höhere Rauschpegel für das längere Meßkabel deutlich. Für die Bereiche Wasserbad und Reference Coil, ist für das 2000 m Kabel ebenfalls deutlich die geringere Streuung der Werte im Wasserbad zu erkennen (Tab. 19).

In der Tabelle 21 sind die entsprechenden Analysen einer Messung in der ICDP-Bohrung auf Hawaii zusammengestellt. Der Vergleich für eine Mittelung über die Referenzstrecken zeigt deutlich eine um den Faktor 3 höhere Standardabweichung. Eine Überprüfung der Messung ergab eine nicht korrekt bestimmte Faserlänge, die im nachhinein korrigiert werden mußte.

	Reference Coil links	Bereich A (Wasserbad)	Reference Coil rechts
Anzahl sample points	81	81	81
Anzahl Werte	6480	6480	6480
Integrationsintervall [s]:	7	7	7
Mittelwert [°C]:	37,59	25,14	37,35
RMS-Fehler:	0,017	0,011	0,018
Standardabweichung:	1,36	0,93	1,42
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	33,1-43,6	22,2-28,85	31,7-42,35
Differenz: Max-Min [°C]:	10,5	6,65	10,65

Tab. 19: Statistische Analyse der Temperaturen im Bereich A (Wasserbad) und gleich langer Bereiche der geräteinternen Referenzstrecken (Messung 217007).

	Reference Coil links	Reference Coil rechts	Reference Coil links	Reference Coil rechts
Anzahl sample points	51	51	81	81
Anzahl Werte	4080	4080	6480	6480
Integrationsintervall [s]:	7	7	7	7
Mittelwert [°C]:	37,61	37,04	37,54	36,97
RMS-Fehler:	0,01	0,01	0,009	0,009
Standardabweichung:	0,72	0,72	0,72	0,73
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	34,65-40,05	34,65-39,8	34,65-40,05	33,85-39,8
Differenz: Max-Min [°C]:	5,4	5,15	5,4	5,95

Tabelle 20: Statistische Analyse der Temperaturen der geräteinternen Referenzstrecken (Messung 167007, s.a. [Tab. 10](#)).

	Reference Coil links	Reference Coil rechts
Anzahl sample points	81	81
Anzahl Werte	6480	6480
Integrationsintervall [s]:	7	7
Mittelwert [°C]:	37,56	37,36
RMS-Fehler:	0,03	0,03
Standardabweichung:	2,43	2,62
Bandbreite (Min-Max) [°C]:	26,5-47,35	27,6-46,65
Differenz: Max-Min [°C]:	20,85	19,05

Tabelle 21: Statistische Analyse der Temperaturen der geräteinternen Referenzstrecken der Messung 269007 in der ICDP-Bohrung auf Hawaii. Der Vergleich mit einer Messung mit dem 700 m Kabel (Tab. 20) zeigt um den Faktor 3 höhere Standardabweichungen für die Referenzstrecken.

Zusammenfassung und Ausblick

In der Klimakammer des GFZ wurden Meßbedingungen geschaffen, die eine genaue Kalibrierung faseroptischer Bohrlochmeßkabel für Temperaturmessungen gestatten. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wurden vorhandene Meßkabel kalibriert und gleichzeitig eine Systematik für zukünftige Hochtemperatur-Kalibrierungen entwickelt.

Für die Auswertung von kontinuierlich gewonnenen Temperaturlogs mittels der DTS-Technik ist entscheidend, daß die erzielbaren Genauigkeiten zum einen von der Länge der verwendeten Faser abhängen. Die andere maßgebliche Größe ist die Integrationszeit, innerhalb derer die Temperaturen ermittelt werden. Längere Integrationszeiten liefern zwar genauere Temperaturen, zur Erfassung schneller zeitlicher Veränderungen sind sie weniger geeignet, als eine Serie kürzerer Meßreihen. Durch nachträgliche Stapelung lassen sich dann wiederum der Problemstellung angepaßte Zeitfenster auswerten.

Der Vergleich der Referenzstrecken während der Kalibrierungen mit denen von Messungen im Bohrloch erlaubt eine Beurteilung der Meßgüte.

Die erreichbare Genauigkeit für Messungen an einem 700m Bohrlochmeßkabel für ein Zeitintervall von 30 Minuten ist $< \pm 0,08 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Reproduzierbarkeit (Standardabweichung) von $< 0,075 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Für ein jedes einzelnes Meßintervall im 0,25 m Abstand beträgt die Genauigkeit $\pm 1,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für Meßzeiten von 7s bzw. $\pm 0,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für 70s und $< \pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für 140 s.

Für das untersuchte 2000m Kabel ergaben sich folgende Genauigkeiten: Für Zeitintervalle von 30 Minuten $< \pm 0,1$ bei einer Reproduzierbarkeit von $< 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Für ein einzelnes Meßintervall beträgt die Genauigkeit $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für Meßzeiten von 7s bzw. $\pm 0,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für 70s und $< \pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für 140 s.

Die Temperaturkonstanz der geschaffenen Referenztemperatur ist deutlich höher als die der geräteinternen Referenzbereiche. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Messungen als Grundlage für ein externes Processing der vom Meßgerät erfaßten Rohdaten zu verwenden. So können z.B. verschiedene Filterverfahren auf ihre Anwendbarkeit getestet werden und dadurch u.U. die Aussagefähigkeit der transienten Daten gesteigert werden.

6 Literatur

- Dannowski, G., Schrötter, J., Erbas, K., Förster, A., and Huenges, E., 1999, Faseroptisches Temperatur-Monitoring nach der ersten Phase der ICDP-Tiefbohrung auf Hawaii, ICDT/KTB Kolloquium, Bochum, Germany, Wiss. Progr. und Abstracts, p. 49.
- Förster, A., Schrötter, J., 1997a, Distributed optic-fibre temperature sensing (DTS): a new tool for determining subsurface temperature changes and reservoir characteristics, Proc. Twenty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., Stanford (CA), 253-258.
- Förster, A., Schrötter, J., Merriam, D.F., Blackwell, D.D., 1997b, Application of optical-fibre temperature logging, example in a sedimentary environment, *Geophysics*, 62, 4, 1107-1113.
- Hartog A., Gamble, G., 1991, Photonic distributed sensing: *Physics World*, 3, 45-49.
- Rogers, A. J., 1988, Distributed optical-fibre sensors for the measurement of pressure, strain and temperature, *Phys. Rept.*, 169, p.99-143.
- Rummel, F, Kappelmeyer, O., 1998, Untersuchungen zur Reiß- und Klufthydraulik im Kristallin der Bohrungen Soultz sowie Modellierung eines HDR-Wärmetauschers zur Nutzung der Erdwärme aus dem heißen Untergrund, Abschlußbericht zum BMBF Projekt: BEO 0326690 B, MeSy GmbH, Bochum, p. 47.
- Wisian, K. W., Blackwell, D. D., Bellani, S., Henfling, J. A., Normann, R. A., Lysne, P. C., Förster, A., and Schrötter, J., 1998, Field comparison of conventional and new technology temperature logging systems: *Geothermics*, v. 27, no. 2, p. 131-141.
- York Sensors, 1998, DTS 800 User Manual, York Sensors Limited, United Kingdom.

7 Anhang A: Datenblatt der Kalibrierung der Firma York Sensors

DTS 800 - Calibration Sheet.

DTS 800 Serial number: 8021029 Optics Module Serial number: 194566A3-026

Number of Interleaves 1
 Number of Sections 2
 Number of Loops 2
 Software System version number V2.5

Reference Coil Signal Levels

The signal levels are measured using the NTS CRD display trace when the NTS MAT value = 19

The Y amplitude is recorded when the cursor is set to 0m and the machine has finished its temperature stabilisation routine

	End:1	End:2
Fibre		
1	15950 ADC counts	16000 ADC counts
2	15800 ADC counts	15500 ADC counts
3	N/A ADC counts	N/A ADC counts
4	N/A ADC counts	N/A ADC counts

QA Temperature Noise performance

QA fibre at room temperature (approx 20 deg C)

Measurement time	45 secs
Fibre length	4 Km
Temperature repeatability during 20 measurements	0.065deg C
Standard deviation over whole length of fibre	0.324deg C
Average temperature difference across 20 measurements	0.050deg C
Mean reference coil difference across 20 measurements	-0.290deg C
Mean profile curvature across 20 measurements	-0.280deg C

Spatial resolution, TTS trace = 1.19 m

Spatial resolution, NTS trace = 1.24 m

Calibration

Calibrator Ser. No: STJ 041

Fibre type: Corning

Fibre size: 50/125 micron

Final Check: All temperatures in deg C.

Calib setting	Calib temp	Measured temp (DTS 800)	Error
Low	-0.97	-1.44	-0.47
Middle	40.74	41.18	0.44
High	85.18	84.54	-0.64

	Low	Middle	High
Temperature variation across 20 measurements SD<0.1	0.038	0.044	0.047
Temperature variation along fibre max SD<0.9	0.166	0.407	0.381
Mean reference coil difference across 20 measurements	0.33		

Elapsed time indicator = 32541.61 hours

Engineer: 059

Date: 15 December 1998

8 Anhang B: Darstellung der verwendeten Messungen

Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aller für die aufgeführten Kalibrierungen benutzten Meßreihen.

