

Charakterisierung der Präzisionswiderstände des Spannungsteilers für CRYRING

Bachelorarbeit

Ilian Denesjuk

Westfälische-Wilhelms-Universität Münster

Institut für Kernphysik

AG Prof. Dr. C. Weinheimer

Mai 2016

Referent: Dr. V. Hannen

Koreferent: Prof. Dr. C. Weinheimer

Betreuer: D. Winzen

Plagiatserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über die

Charakterisierung der Präzisionswiderstände des Spannungsteilers für CRYRING

selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Unterschrift :

Ort, Datum :

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

Unterschrift :

Ort, Datum :

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Ionen-Speicherring CRYRING	2
3	Entwurf des neuen Spannungsteilers	4
3.1	Funktionsweise	4
3.2	Der K35 Spannungsteiler des KATRIN Experiments	5
3.3	Design des Spannungsteilers für CRYRING	9
4	Aufwärmverhalten der Widerstände	10
4.1	Messaufbau	10
4.2	Ergebnisse	14
4.3	Vergleich mit alten Messungen	15
4.4	Schlussfolgerung	19
5	Temperaturkoeffizient der Widerstände	21
5.1	Messaufbau	21
5.2	Ergebnisse	22
5.3	Schlussfolgerung	24
6	Betrieb des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen	26
7	Vergleich der verschiedenen Präzisionsmultimeter	28
7.1	Allan-Varianz und Allan-Abweichung	28
7.2	Messaufbau	29
7.3	Ergebnisse	29
8	Zusammenfassung und Ausblick	31
	Literaturverzeichnis	33
	Anhang	35

1 Einleitung

Die Physik der kleinsten Teilchen fasziniert seit langer Zeit die Menschheit. Schon im antiken Griechenland befassten sich Philosophen mit dem Gedanken, dass Materie aus unteilbaren Grundbausteinen besteht. Ende des 19. Jahrhunderts wiesen erste Experimente auf das Elektron [Tho97] hin, danach auf den Atomkern [Rut11] und im weiteren Verlauf wurden immer mehr Teilchen entdeckt und bestimmt. Im Ionen-Speicherring CRYRING sollen exotische Ionen und auch Anti-Protonen erforscht werden. Dafür wird für den Elektronenkühler, der für das Reduzieren der Divergenz, des Querschnitts und der Energiebreite des Ionenstrahls im Speicherring benutzt wird, ein Präzisionsspannungsteiler benötigt, um die Geschwindigkeiten der beschleunigten Elektronen genau zu bestimmen.

Nach dem erfolgreichen Bau der K35 [Thu09] und K65 [Bau13] Spannungsteiler im Institut für Kernphysik an der Uni Münster für das KATRIN Experiment, wurde beschlossen einen Spannungsteiler für CRYRING an FAIR¹ an der GSI² Darmstadt zu bauen. Als Anforderung soll mindestens die maximale Elektronenkühler Spannung von 20 kV im einstelligen ppm³-Bereich gemessen werden können. Kommerzielle Spannungsteiler bieten nicht die gefragte Genauigkeit, sodass nun in Münster ein weiterer Spannungsteiler entstehen soll. Beim Bau des K35 Spannungsteilers wurden nur 100 der 200 bestellten Vishay VHA518-11 Präzisionswiderstände verbaut. Es stehen somit genügend Widerstände für den Bau des neuen Spannungsteilers zur Verfügung.

In dieser Arbeit wird zu Beginn der Ionen-Speicherring CRYRING erläutert und danach wird über den Entwurf des neuen Spannungsteilers berichtet. Da der Entwurf natürlich auf den beiden bereits gebauten Vorgänger-Spannungsteilern basiert, vor allem aber auf dem Entwurf des K35 Spannungsteilers, wird dieser zunächst beschrieben. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Vishay Präzisionswiderstände darauf untersucht ob diese in das Konzept des neuen Spannungsteilers für CRYRING passen und wie sich die Lagerung auf die Widerstände in Form von einem Alterungsprozess ausgewirkt hat. Zum Schluss wird noch ein Vergleich unterschiedlicher Präzisionsmultimeter durchgeführt.

¹Facility for Antiproton and Ion Research

²Gesellschaft für Schwerionenforschung

³parts per million

2 Der Ionen-Speicherring CRYRING

Anfang der 90er Jahre wurde in Stockholm am Manne Siegbahn Laboratory der Speicherring CRYRING erstmals in Benutzung genommen. Im Jahr 2009 nach etwa 20 Jahren wurden die Experimente am CRYRING aufgrund von finanziellen Schwierigkeiten eingestellt. Das führte dann zu der Überlegung CRYRING an die GSI Darmstadt zu transportieren, was zwischen 2012 und 2013 geschah, und in die geplante FAIR Anlage zu integrieren. [Lab14]

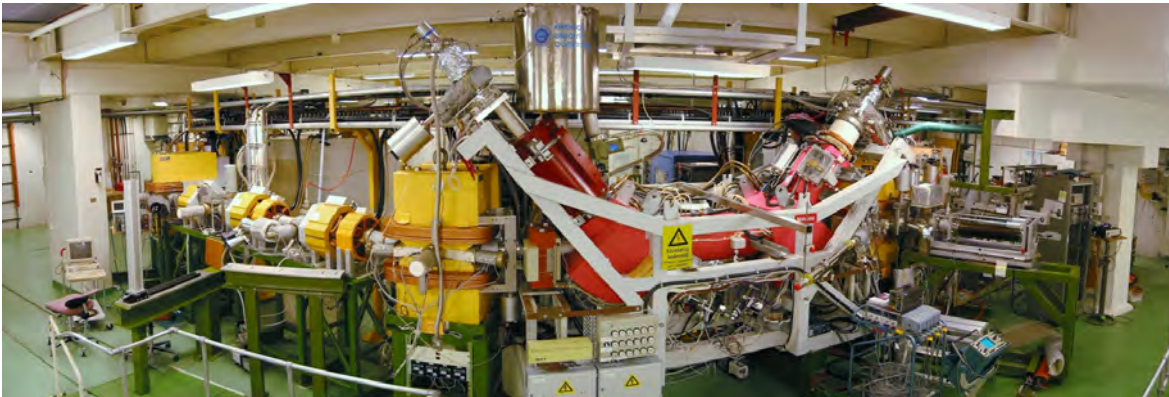


Abbildung 2.1: Seitenaufnahme des Ionen-Speicherrings CRYRING vom Aufbau am Manne Siegbahn Laboratory in Stockholm [Lab14].

Der Ionen-Speicherring CRYRING ist auf Ionen-Energien von 14 MeV/u bis 300 keV/u ausgerichtet. Im Vergleich zum ESR⁴, der auch an der GSI zu finden ist und für Ionen mit einer unteren Grenze von 4 MeV/u konzipiert ist, bietet CRYRING die Möglichkeit Ionen mit Energien von minimal 300 keV/u unterzubringen. Damit ergänzen sich beide Speicherringe mit dem ESR als hochenergetischem Speicherring und dem CRYRING als niederenergetischem Speicherring.

Beide Speicherringe besitzen einen Elektronenkühler, um die gespeicherten Ionen zu kühlen. Dabei wird ein monoenergetischer Elektronenstrahl produziert, der mit dem Ionenstrahl überlagert wird und somit die Breite der Geschwindigkeitsverteilung der Ionen reduziert. Wichtig ist dabei zu wissen mit welcher Geschwindigkeit sich die Elektronen bewegen, damit man den Effekt auf den Ionenstrahl nachvollziehen kann. Die Beschleunigungsspannung, die am Elektronenkühler anliegt, soll dafür mit einer Präzision < 10 ppm gemessen werden. Deshalb ist ein Präzisionsspannungsteiler notwendig. Während des LIBELLE Experiments am ESR im Jahre 2011 wurde dies beim Messen des 2s Hyperfein-Übergangs in lithium-ähnlichem Bismuth deutlich. Dieser Übergang wurde erstmals in einer Laserspektroskopie-Messung aufgezeichnet, jedoch limitierte die unzureichende Information über die Spannung am Elektronenkühler die Präzision

⁴Experimental Storage Ring

des Experiments [Loc14]. Nach Wiederholung des Experiments im Jahre 2014 mit einem bei der PTB ausgeliehenen Präzisionsspannungsteiler wurden Ergebnisse mit einer Unsicherheit im Bereich $< 10^{-5}$ erzielt [Ull15]. Deswegen wird im Institut für Kernphysik an der Uni Münster nun ein Präzisionsspannungsteiler für CRYRING gebaut.

3 Entwurf des neuen Spannungsteilers

Der Entwurf des neuen Spannungsteilers für CRYRING ist dem K35 Spannungsteiler für KATRIN sehr ähnlich. In diesem Kapitel wird zunächst auf die allgemeine Funktionsweise eines Spannungsteilers eingegangen. Danach wird der K35 Spannungsteiler erläutert und zum Schluss wird das Design des neuen Spannungsteilers für CRYRING erwähnt.

3.1 Funktionsweise

Ein simpler Spannungsteiler besteht aus zwei in Reihe geschalteten Widerständen. Werden zwei identische Widerstände verwendet, so teilt sich die Spannung auf beide Widerstände gleichmäßig auf. Bei einem Spannungsteiler nutzt man aus, dass bei einem niederohmigen Widerstand in Verbindung mit einem hochohmigen Widerstand eine niedrige Spannung beim ersten und eine hohe Spannung beim zweiten Widerstand abfällt. In der Praxis wird bei einem Spannungsteiler der hochohmige Widerstand durch viele in Serie geschaltete Widerstände realisiert, damit die am einzelnen Widerstand abfallende Spannung reduziert wird. In Gleichung (1) sieht man die Berechnung für den Maßstabsfaktor für Verbindungen von Widerständen. Dabei ist $R_{präz}$ ein Präzisionswiderstand aus der Widerstandskette und R_{ref} ein Beispiel für einen niederohmigen Widerstand mit der Spannung U_{out} am zugehörigen Messabgriff. U_{in} steht für die Eingangsspannung am Spannungsteiler.

$$M = \frac{n \cdot R_{präz} + R_{ref}}{R_{ref}} = \frac{R_{ges}}{R_{ref}} = \frac{U_{in}}{U_{out}} \quad (1)$$

Um eine Spannung von 10 kV mit einem Präzisionsmultimeter im 10 V Bereich zu messen, braucht man einen Messabgriff mit einem Maßstabsfaktor von $M = 1000$. Die bei der Charakterisierung der Widerstände und bei den Messungen am Spannungsteiler verwendeten Präzisionsmultimeter sind das Fluke 8508A und das Agilent bzw. Keysight⁵ 3458A. Der genaueste Messbereich des Fluke 8508A befindet sich unterhalb von 20 V und der des Agilent 3458A unterhalb von 12 V. Weswegen eine an einen Spannungsteiler angelegte Hochspannung auf eine Spannung von etwa 10 V runter geteilt wird, um diese dann im ppm-Bereich messen zu können.

Bei einem Präzisionsspannungsteiler werden in der Widerstandskette Präzisionswiderstände verbaut. Diese besitzen eine sehr niedrige Temperaturabhängigkeit und bilden daher den wichtigsten Teil des Spannungsteilers für das Messen von runter geteilten Hochspannungen. Die Kenndaten zu den im K35 Spannungsteiler und im neuen CRYRING Spannungsteiler verwendeten Präzisionswiderständen befinden sich in Tab. 3.1.

⁵Früher Agilent bzw. HP

3.2 Der K35 Spannungsteiler des KATRIN Experiments

Der K35 Spannungsteiler besitzt zwei Widerstandsketten. In der primären Widerstandskette sind 100 $1,84\text{ M}\Omega$ Vishay VHA518-11 Präzisionswiderständen verbaut. Diese Widerstände sind hermetisch versiegelt und nach dem "Bulk Metal Foil" Prinzip der Firma Vishay gebaut [Vis14]. Innerhalb des zylindrischen Gehäuses aus verzinnemtem Messing befinden sich Widerstandschips, die aus Keramikplättchen mit aufgebrachter Metallfolie bestehen, was in Abb. 3.1 zu sehen ist.

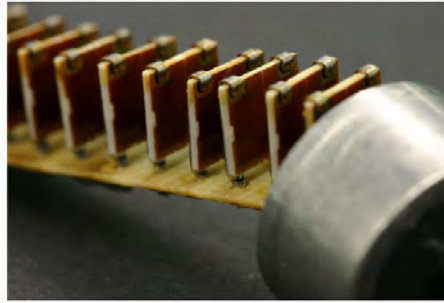


Abbildung 3.1: Ansicht auf die inneren Komponenten eines Vishay Präzisionswiderstands [Thu07].

Bei Belastung des Widerstands erwärmen sich die Widerstandschips und dehnen sich dementsprechend mit der Metallfolie aus. Die Keramikplatte jedoch unterliegt einer geringeren Wärmeausdehnung, sodass diese der Wärmeausdehnung der Metallfolie entgegenwirkt. Somit wird ein möglichst stabiler Widerstandswert erzeugt, der auch bei Erwärmung nur geringe Abweichungen aufzeigt. Abgeschirmt wird das Innere des Widerstands durch eine Kunststoffummantlung. Der Raum innerhalb des Widerstands wird mit Öl befüllt, damit eine gute Wärmeleitfähigkeit im Widerstand vorhanden ist. In Tab. 3.1 sind die Herstellerdaten der Vishay VHA518-11 Präzisionswiderstände zu finden.

Widerstand	$1,84\text{ M}\Omega$
Widerstands Toleranz	$0,1\%$
Max. Spannung	600 V
Temperaturabhängigkeit	$< 2\text{ ppm/K}$
Spannungsabhängigkeit	$< 0,1\text{ ppm/V}$
Induktivität	$0,08\text{ }\mu\text{H}$
Kapazität	$0,5\text{ pF}$
Stabilität bei Lagerung	$\pm 5\text{ ppm/Jahr}$

Tabelle 3.1: Herstellerdaten zu den Vishay VHA518-11 Präzisionswiderständen [Vis14].

Beim Bau des K35 Spannungsteilers wurde die Aufwärmabweichung der Widerstände vermessen. Dabei wurde auf Reproduzierbarkeit und Abweichungen im niedrigen ppm-

Bereich geachtet. Da eine Auswahl von 200 Vishay VHA518-11 Präzisionswiderständen gekauft wurde, von denen nur 100 verbaut werden sollten, wurden Paare ausgesucht, die aufgrund von entgegengesetztem Aufwärmverhalten zusammen ein Aufwärmverhalten im sub-ppm-Bereich aufweisen, was in Abb. 3.2 dargestellt ist [Thu07].

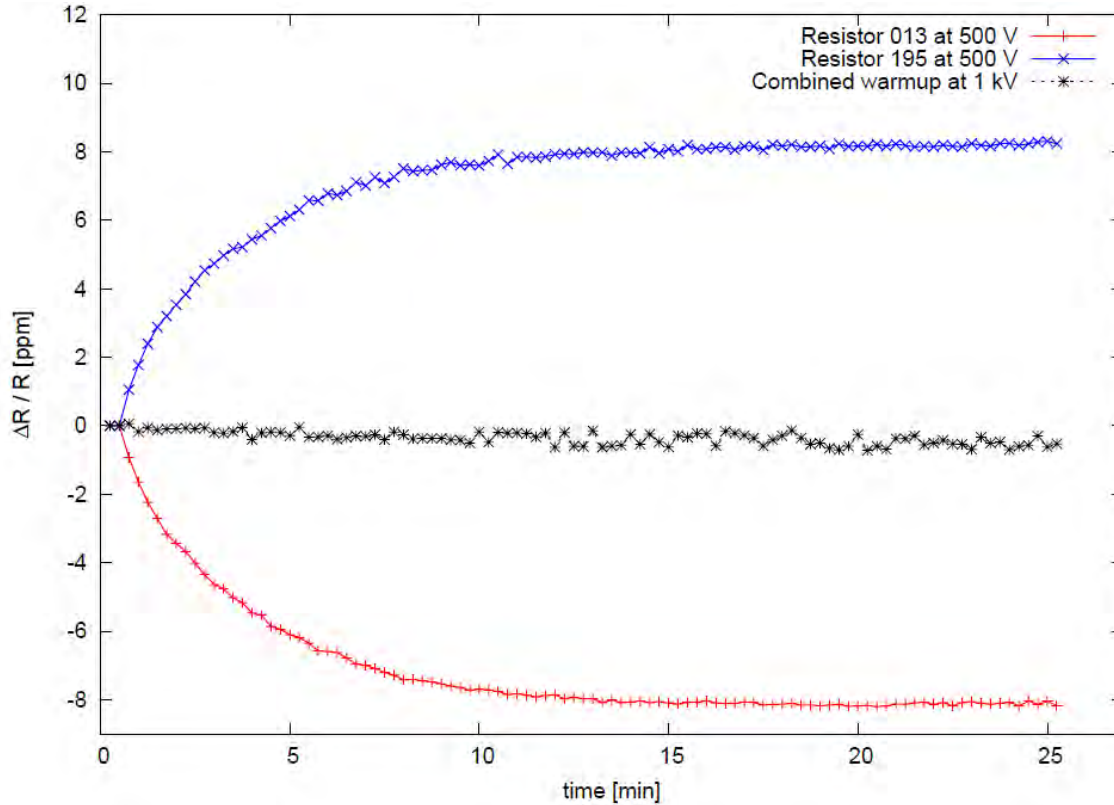


Abbildung 3.2: Kombiniertes Aufwärmverhalten zweier Widerstände mit entgegengesetztem Aufwärmverhalten [Thu07].

Der Messabgriff der primären Widerstandskette wurde mittels 6 niederohmiger 140 kΩ Widerständen realisiert. Ein 1:100 Maßstabsfaktor wird zudem durch Messung der Spannung am letzten der 100 Präzisionswiderstände ermöglicht. Für die Maßstabsfaktoren von 1:1972 und 1:3944 werden zweimal drei der 140 kΩ Widerständen parallel geschaltet, sodass eine Reihenschaltung aus zwei Parallelschaltungen von je drei Widerständen vorhanden ist. Für den 1:1972 Messabgriff wird die Spannung über alle sechs Widerstände und für den 1:3944 Messabgriff wird die Spannung über drei Widerstände gemessen. Eine Parallelschaltung wird verwendet um sicherzustellen, dass bei Defekt eines Widerstandes keine Hochspannung am Eingangswiderstand des Präzisionsmultimeters anliegt. [Thu07]

Im Spannungsteiler selbst sind 5 Kupferelektroden verbaut, die in Abb. 3.4 zu sehen sind. Diese dienen zur Abschirmung der Präzisionswiderstände vor dem Erdpotenzial, welches am Zylindrischen Behälter angelegt ist, und zum Bilden eines homogenen

elektrischen Feldes [Thu07]. Neben der primären Widerstandskette von 100 Vishay VHA518-11 Präzisionswiderständen sind noch vier weitere hochohmige 44 M Ω Caddock MX480 Hochspannungswiderstände parallel verbaut worden. Diese verbinden die fünf Kupferelektroden und dienen zum Erzeugen eines Potentials auf den Kupferelektroden, welches dem Potenzial in der primären Widerstandskette entspricht, damit Kriechströme verhindert werden. Zudem kann die sekundäre Widerstandskette unabhängig von der Primären Widerstandskette zum Messen einer angelegten Hochspannung genutzt werden. Dazu sind an der untersten Kupferelektrode zwei parallel geschaltete 45 k Ω Caddock MS260 Hochspannungswiderstände verbaut, die die Verbindung mit der Erde gewährleisten. Ein Messabgriff an den zwei parallel geschalteten Widerständen ermöglicht eine Messung mit einem Maßstabsfaktor von etwa 1:3911. Damit kann die Spannung mit einer Genauigkeit im 100 ppm-Bereich überwacht werden. Wichtig ist auch zu erwähnen, dass an jedem hochohmigen Widerstand der sekundären Widerstandskette parallel ein Vishay MKT 1816-225/117-2 Hochspannungskondensator mit einer Kapazität von 2,5 nF und einer Spannungsfestigkeit von 10 kV verbaut ist. Dadurch wird Spannungsschwankungen und Spannungsspitzen vorgebeugt, um die primäre Widerstandskette zu schützen [Thu07]. Das endgültige Schaltbild des Spannungsteilers befindet sich in Abb. 3.3.

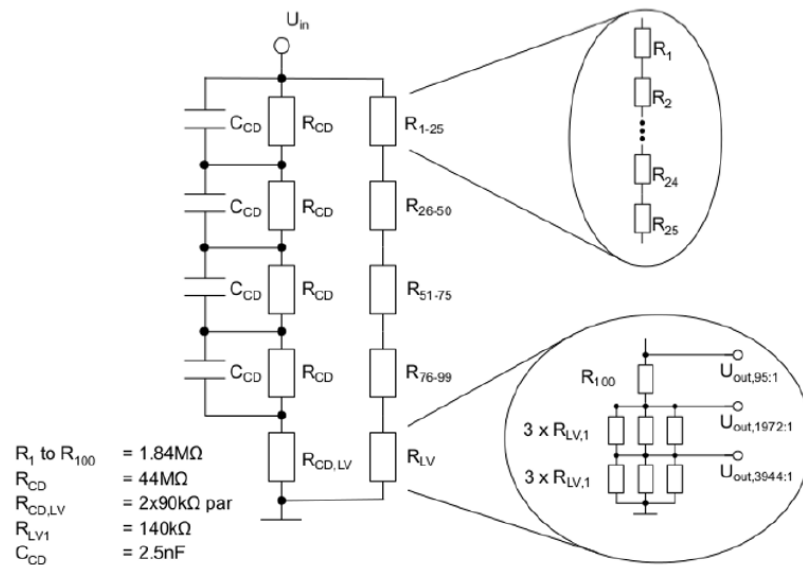


Abbildung 3.3: Gesamtes Schaltbild des K35 Spannungsteilers. Zu sehen sind die primäre und sekundäre Widerstandskette mit jeweils zugehörigem Messabgriff [Thu07].

Der K35 Spannungsteiler ist von einem abgedichteten zylindrischen Edelstahlbehälter zur EMV⁶-Abschirmung und Temperaturstabilisierung umgeben. Als Füllgas wurde

⁶Elektromagnetische Verträglichkeit beschreibt die Fähigkeit die Umgebung nicht durch elektrische und elektromagnetische Effekte zu stören oder von der Umgebung dadurch gestört zu werden

trockener Stickstoff verwendet und auf $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ stabilisiert. Von außen wird der Behälter noch mit Armaflex-Schaum isoliert, um vor thermischen Außeneinwirkungen zu schützen und zum Stabilisieren der Innentemperatur beizutragen [Thu07].

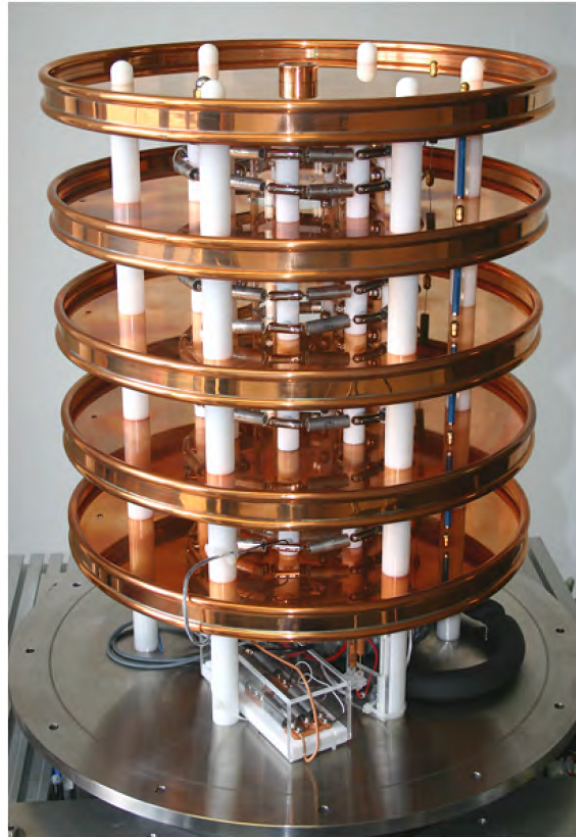


Abbildung 3.4: Aufbau des Spannungsteilers ohne äußeren Abschirmbehälter [Thu07].

Um grundsätzlich Kriechströme und Korona-Entladungen zu vermeiden, werden keine Bauteile mit spitzen Kanten verwendet. Des Weiteren werden die Kontakte der Widerstände der primären Widerstandskette in Edelstahlverbindungen an PTFE⁷-Halterungen durch Quetschen mit einer Schraube in einer Bohrung befestigt. Die Kupferelektroden selbst werden von POM⁸-Halterungen getragen und voneinander getrennt. Verbaut sind die Widerstände der primären Widerstandskette spiralförmig zu je 25 Widerständen zwischen zwei Kupferelektroden [Thu07].

Der zylindrische Behälter mit Spannungsteiler befindet sich auf einem KANYA Gerüst mit Rollen, was eine Mobilität des Aufbaus ermöglicht. Auf der unteren Ebene des Gerüsts unterhalb des Behälters befinden sich die Messgeräte und Steuerkomponenten. Die Temperaturstabilisierung wird mit einem West 4100 PID⁹-Regler erreicht,

⁷Polytetrafluorethylen ist in der Hochspannungstechnik aufgrund von Teilentladungsfestigkeit und geringer Haftbeständigkeit von Oberflächen-Verschmutzung ein sehr geeigneter elektrischer Isolator

⁸Polyoxymethylen ist ein guter Isolator, aber weist im Vergleich zu PTFE ein deutlich stabileres mechanisches Verhalten auf

⁹Parallel-, Integral- und Differentialregelung

der einen PT100-Sensor innerhalb des Spannungsteilers ausliest. Durch Heizwiderstände und Peltier-Elemente werden Erwärmung und Kühlung des Stickstoffs im Behälter erreicht [Thu07].

3.3 Design des Spannungsteilers für CRYRING

Die Vorgaben für den Spannungsteiler für CRYRING sind den Werten des K35 Spannungsteilers sehr ähnlich. Es ist ein Aufbau gefragt, der genauso Kriechströme und Korona-Entladungen verhindert. Der Innenraum des Spannungsteilers soll EMV-abgeschirmt sein und eine Temperaturstabilisierung von 0,5% aufweisen. Ebenso sollen eine sekundäre Widerstandskette verbunden mit Kupferelektroden zum Erzeugen eines geeigneten Potenzials und Hochspannungskondensatoren, die vor Spannungsschwankungen und Spannungsspitzen schützen sollen, verbaut werden. [HNR⁺15]

Für die primäre Widerstandskette werden die 100 übrigen Vishay VHA518-11 Präzisionswiderstände untersucht. Dabei ist es wichtig, dass diese reproduzierbare Ergebnisse für ihre Aufwärmabweichung besitzen und Abweichungen im einstelligen ppm-Bereich aufweisen. Das Ziel ist es auch hier die Widerstände in Paaren mit jeweils entgegengesetztem Aufwärmverhalten zu verbauen. Verbaut werden alle Widerstände die nach der Charakterisierung als stabil und geeignet bewertet werden.

Bei etwa 80 verbauten Widerständen entspricht die nach den Herstellerdaten maximale am Spannungsteiler erlaubte Spannung 48 kV. Um die Widerstände jedoch bei Spannungsspitzen nicht zu beschädigen wird so wie beim K35 Spannungsteiler auch hier eine deutlich geringere maximale Spannung angegeben. Nach den Anforderungen für den CRYRING Spannungsteiler sollte mindestens die maximale Spannung des Elektronenkühlers von 20 kV angelegt werden können. Der Messabgriff wird ähnlich zum Messabgriff des K35 Spannungsteilers realisiert [Thu07]. Wie der Maßstabsfaktor aussehen soll ist noch unklar, da noch keine genau Anzahl an Widerständen, die verwendet werden, verfügbar ist. Die Spannung am Messabgriff sollte jedoch im Bereich von 10 V liegen. Zum Messen am Messabgriff wird ein Keysight 3458A Präzisionsmultimeter verwendet, was eine der besten kommerziellen Lösungen zum vermessen des 10 V Bereichs darstellt.

4 Aufwärmverhalten der Widerstände

In diesem Kapitel wird das Aufwärmverhalten der Vishay VHA518-11 Präzisionswiderstände thematisiert. Es wird zunächst der Messaufbau beschrieben. Danach werden die Messergebnisse präsentiert und mit den alten Messungen für den K35 Spannungsteiler verglichen. Zum Schluss wird mithilfe der Messergebnisse noch der Entwurf des neuen Spannungsteilers erweitert.

4.1 Messaufbau

Der Messaufbau zum Vermessen des Aufwärmverhaltens der Präzisionswiderstände entspricht dem gleichen Messaufbau der damaligen Messungen des Aufwärmverhaltens für den K35 Spannungsteiler, sodass eine Vergleichbarkeit der neuen Messungen mit den alten Daten gewährleistet ist. Alle für die Messung relevanten Komponenten befinden sich in einem abgeschirmten Messschrank wie in Abb. 4.3 zu sehen ist. Des Weiteren befindet sich das Hochspannungslabor des Instituts für Kernphysik an der Uni Münster in einem klimatisierten Raum, in welchem die Raumtemperatur zwischen 17°C und 20°C betrug.

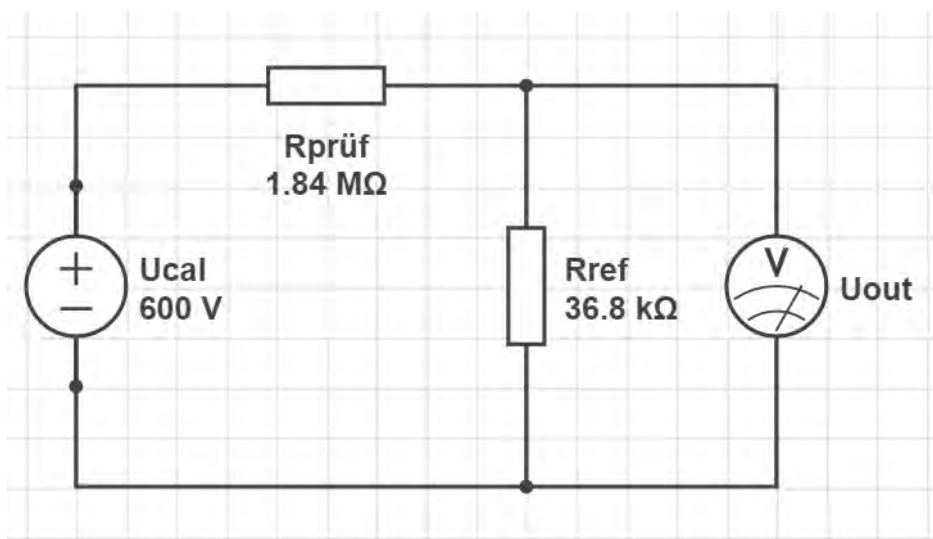


Abbildung 4.1: Schaltbild der sich im Messkasten befindenden Messschaltung.

Die Messschaltung selbst befindet sich in einer temperaturstabilisierten und EMV-abgeschirmten Box innerhalb des Schrankes. Sie besteht aus einem einfachen Spannungsteiler also einer Reihenschaltung des zu vermessenden $1,84\text{ M}\Omega$ Präzisionswiderstands (Prüfwiderstand) und eines $36,8\text{ k}\Omega$ Vishay VHA 518 Referenzwiderstands. In Abb. 4.1 ist die entsprechende Messschaltung mit Messabgriff zu sehen. Abb. 4.2 zeigt dann die tatsächliche Konstruktion. Es befinden sich Heizwiderstände und ein Lüfter an der Rückwand, ein PT1000 Temperatursensor an einer PTFE-Halterung in der Mitte der Box, der Referenzwiderstand an einer PTFE-Halterung und ein Magazin aus 6

Prüfwiderständen die jeweils einzeln mit dem Referenzwiderstand in Reihe geschaltet werden können. Die Verbindung zum Messabgriff, zur Erdung und zur Spannungsquelle wurden mit Kupferkabeln realisiert.

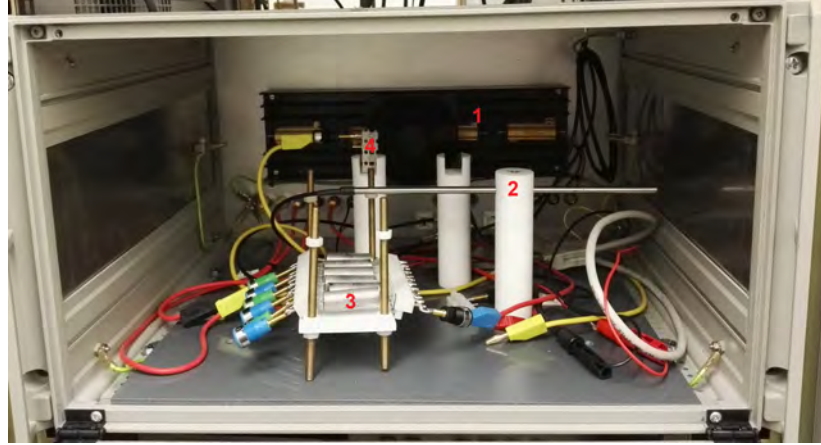


Abbildung 4.2: Temperaturstabilisierter Kasten mit Messschaltung. (1. Heizwiderstände mit Lüfter, 2. PT1000 Temperatursensor, 3. Magazin mit 6 Präzisionswiderständen, 4. Referenzwiderstand mit Halterung)

Bei einer Belastung von 600 V fallen am Prüfwiderstand ca. 588,2 V bei einer Leistung von ca. 188 mW ab. Dementsprechend fallen am Referenzwiderstand ca. 11,8 V bei einer Leistung von ca. 0,56 mW ab. Die Messschaltung ist somit ein Spannungsteiler mit Maßstabsfaktor 1:51. Gemessen wird die am Referenzwiderstand abfallende Spannung mit dem Agilent 3458A Präzisionsmultimeter im ppm-Bereich. Aufgrund der geringen Leistung am Messwiderstand, kann dessen Aufwärmung vernachlässigt werden und der entsprechende Widerstand wird als konstant angenommen, sodass jegliche Änderung der Spannung im ppm-Bereich auf das Aufwärmverhalten des Prüfwiderstands zurückzuführen ist. Nach Gleichung (1) lässt sich der Maßstabsfaktor mittels der Werte der verbauten Widerstände berechnen. Weil der Referenzwiderstand als konstant angenommen wird und man nur die relative Änderung des Prüfwiderstands betrachten möchte, kann man die Näherung aus Gleichung (2) zum bestimmen der Aufwärmabweichung nutzen. Betrachtet wird somit die relative Änderung des Prüfwiderstands im ppm-Bereich bei einer Belastung mit 600 V, was auch als Aufwärmverhalten bezeichnet wird. U_{out} ist die am Messabgriff gemessene Spannung zur Zeit $t = 15$ Sekunden und $U'_{out}(t)$ ist die momentane Spannung während der fortlaufenden Messung. Dementsprechend beschreibt $R_{prüf}$ den Widerstandswert des zu prüfenden Widerstands bei $t = 15$ Sekunden und $R'_{prüf}(t)$ den Widerstandswert bei fortlaufender Messung.

$$\frac{\Delta R_{prüf}}{R_{prüf}} = \frac{R'_{prüf}(t)}{R_{prüf}} - 1 = \frac{U_{out}}{U'_{out}(t)} - 1 \quad (2)$$

Um sicherzugehen, dass auch tatsächlich nur das Aufwärmverhalten der Prüfwiderstände für die Änderungen der Spannung im ppm-Bereich verantwortlich ist, müssen die Spannungsquelle sowie die Präzisionsmultimeter sub-ppm genaue Spannungen liefern bzw. messen können. Der Fluke 5720A Kalibrator dient als Spannungsquelle und wird mithilfe des Fluke 8508A Präzisionsmultimeters mit einem dazwischen geschalteten Fluke 752A Referenzteiler auf Stabilität im sub-ppm-Bereich überwacht. Um die Stabilität des Kalibrators zu gewährleisten wurde darauf geachtet, dass er einen Tag vor der Messung bereits eingeschaltet wird und Nachts zwischen Messungen eingeschaltet bleibt, da es ansonsten zu Spannungsschwankungen kommen kann. Treten dennoch Schwankungen der Kalibratorspannung auf, dann ist das in der Messung klar zu erkennen, weshalb die Messung in solchen Fällen wiederholt wurde. Bei nicht erklärbaren Schwankungen ohne dass die Kalibratorspannung schwankt wurde der Widerstand, falls nach erneuter Messung keine Verbesserung aufgetreten ist, als instabil gewertet. Zusätzlich ist es wichtig zu erwähnen, dass alle ausgehenden Signale galvanisch getrennt werden bevor diese vom Computer ausgewertet werden.

Es wird der 1:100 Messabgriff des Fluke Referenzteilers benutzt, um so den genaueren 10 V Bereich des Fluke Präzisionsmultimeters nutzen zu können. Der Messabgriff am Referenzwiderstand wurde mit dem Agilent 3458A Präzisionsmultimeter überwacht. Da die Messschaltung einem 1:51 Spannungsteiler entspricht, wird hier kein weiterer Referenzteiler benötigt um in einen genaueren Messbereich zu gelangen.

Gesteuert wird die Messung durch ein Labview Programm, welches auch schon bei den Messungen des K35 Spannungsteilers benutzt wurde. Es wurde nur leicht an diesen Messaufbau angepasst, sodass ein Vergleich zwischen den Messungen noch gut möglich ist. Nach Starten des Labview Programms wird die PID-Temperatursteuerung aktiviert, welche den Agilent 34970A Multiplexer anspricht, der ein EA PS 32 05 Netzteil steuert, das dann die Heizwiderstände innerhalb der Messbox erwärmt. Ein PT1000 Temperatursensor innerhalb der Messbox wird vom Multiplexer ausgelesen und von der PID-Regelung zum Steuern der Temperatur verwendet. Erreicht wird eine Temperaturgenauigkeit von $0,1^{\circ}\text{C}$. Zunächst werden die Messungen bei 25°C betrieben, was in etwa einer Stunde durch Erwärmen von der Raumtemperatur aus erreicht werden kann. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass ein Magazin mit 6 Prüfwiderständen über einen längeren Zeitraum auf 25°C stabilisiert wird.

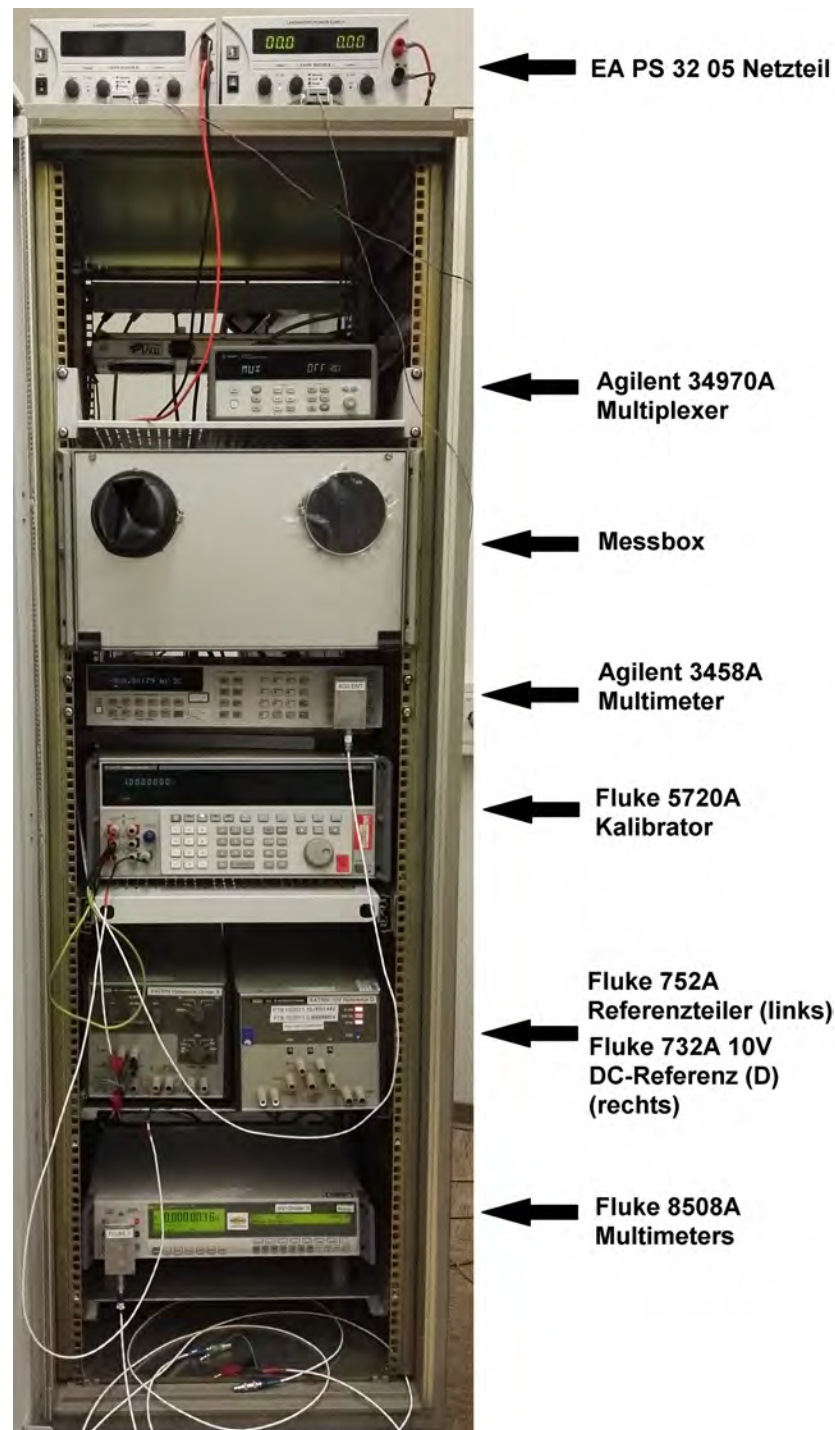


Abbildung 4.3: Schrank mit Präzisions-Messaufbau.

Nach Stabilisierung der Temperatur wird eine Messung mit einer Laufzeit von 30 Minuten gestartet. Der Kalibrator wird vom Labview Programm ab dem Zeitpunkt $t_0 = 0$ Sekunden gestartet. Das Messintervall beträgt 15 Sekunden. Dabei misst das Fluke Präzisionsmultimeter mit 8,5 Stellen im Fast-Mode und das Agilent Präzisionsmultimeter mit 160 NPLCs¹⁰, was auch 8,5 Stellen entspricht. Der erste Messwert wird verworfen,

¹⁰Number of Power Line Cycles, beschreibt die Integrationszeit des Agilent bzw. Keysight Multimeters

sodass der zweite Messwert bei Sekunde 15 als Referenzwert für die Berechnung der ppm Abweichung genommen wird. Als Resultat wird ein je nach Prüfwiderstand steigender oder sinkender Verlauf erwartet, der nach 15 Minuten ein Plateau erreicht, was dann letztendlich der absoluten ppm-Abweichung des Widerstands entspricht.

4.2 Ergebnisse

Da unklar war wie sich der Alterungsprozess auf die Prüfwiderstände auswirken würde, wurden alle vorhandenen Widerstände mindestens einmal vermessen. Die gemittelte Aufwärmabweichung ab Minute 15 aller Widerstände in ppm kann in der Tabelle im Anhang und als Übersicht im Histogramm in Abb. 4.4 betrachtet werden. Sie ist zusammen mit der Standardabweichung farbig in Abb. 4.5 gekennzeichnet. Außerdem wurde in allen Graphen für die Aufwärmabweichung ab Minute 15 linear gefittet. An den Parametern des Fits können die Aufwärmabweichung, das ist der y-Achsenabschnitt der Gerade, und die Steigung, welche ein Maß für die Stabilität des Widerstands angibt, abgelesen werden.

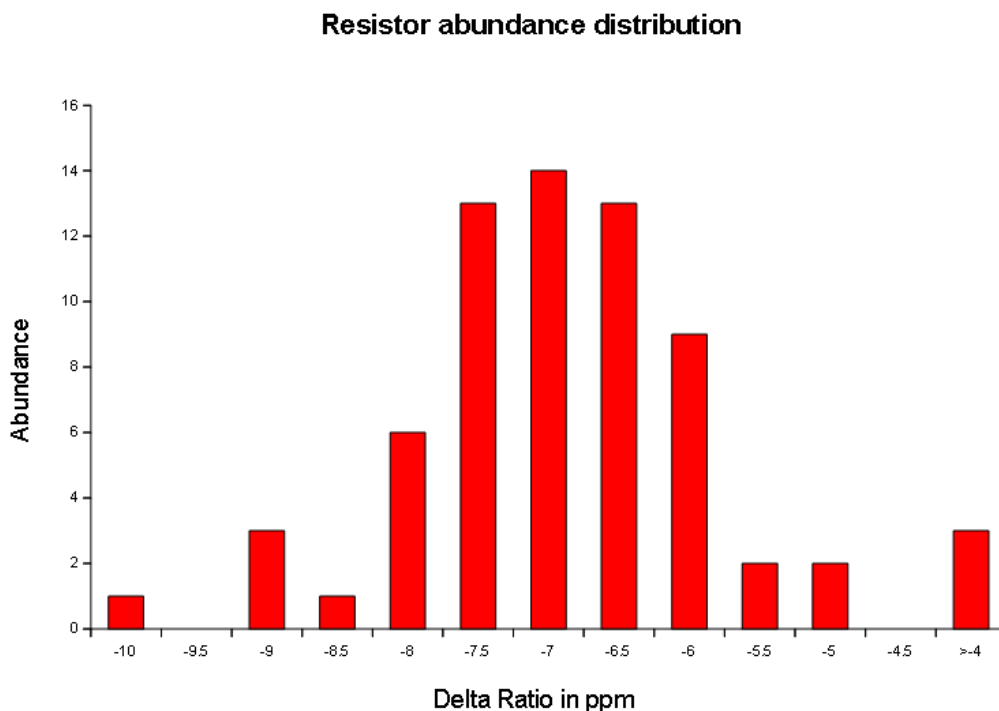


Abbildung 4.4: Histogramm zur mittleren Aufwärmabweichung aller vermessenen Widerstände.

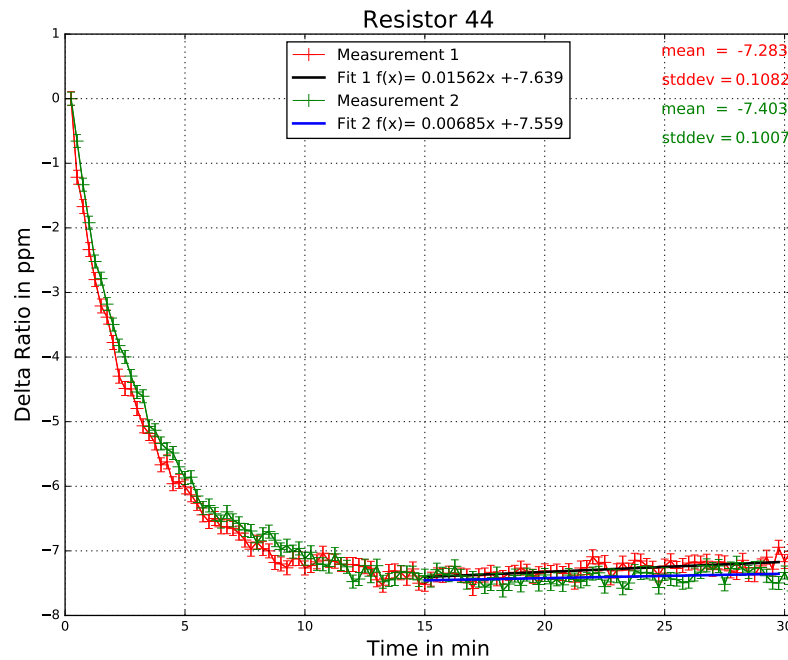


Abbildung 4.5: Aufwärmverhalten des Widerstands 44.

Das Histogramm zeigt sehr deutlich, dass ausschließlich negativ abweichende Widerstände vorhanden sind. Die ursprüngliche Überlegung der sich gegenseitig aufhebenden Paare, wie es beim K35 gemacht wurde, ist somit nicht möglich. Der Großteil der Widerstände weist eine Aufwärmabweichung zwischen -6 ppm und -8 ppm auf.

Als Beispiel in Abb. 4.5 wurde die grafische Darstellung der Aufwärmabweichung des Widerstands 44 herausgesucht. Dieser Widerstand wurde zwei mal an jeweils unterschiedlichen Tagen vermessen. Die Messwerte beider Messungen liegen sehr dicht aneinander, sodass die gemittelten Werte ab Minute 15 beider Messungen nur um 0,12 ppm abweichen. Das zeigt die Reproduzierbarkeit der Messung der Aufwärmabweichung. Alle weiteren Graphen zu den Messungen des Aufwärmverhaltens können dem Anhang mit zugehöriger Nummernbezeichnung des Widerstands entnommen werden.

4.3 Vergleich mit alten Messungen

Die Vishay VHA518-11 Präzisionswiderstände wurden im Jahr 2003 gekauft und erstmals in der Dissertation von Thomas Tümmeler aus dem Jahr 2007 untersucht. Daraus können Daten zum Vergleich mit den aktuellen Messungen entnommen werden. Zu Vermuten ist eine Änderung der Aufwärmabweichung durch Alterung der Widerstände, da diese das letzte Mal vor etwa 10 Jahren vermessen wurden. [Thu07]

Im direkten grafischen Vergleich fällt auf, dass sich bei gelungenen stabilen Messungen die Mittelwerte ab Minute 15 der aktuellen Messungen im Vergleich zu den Mittelwerten ab Minute 15 der alten Messungen um einen Wert von 2 ppm bis 3 ppm ins Positive verschoben haben. In Abb. 4.6 und 4.7 sind die alten und neuen Messwerte zur Aufwärmabweichung der Widerstände 84 und 76 zusehen. Die Differenz zwischen den ab Minute 15 gemittelten Werten für die Aufwärmabweichung ist jeweils farbig in den Graphen zu finden. Alle weiteren Graphen zum Vergleich der alten mit den aktuellen Messungen befinden sich im Anhang.

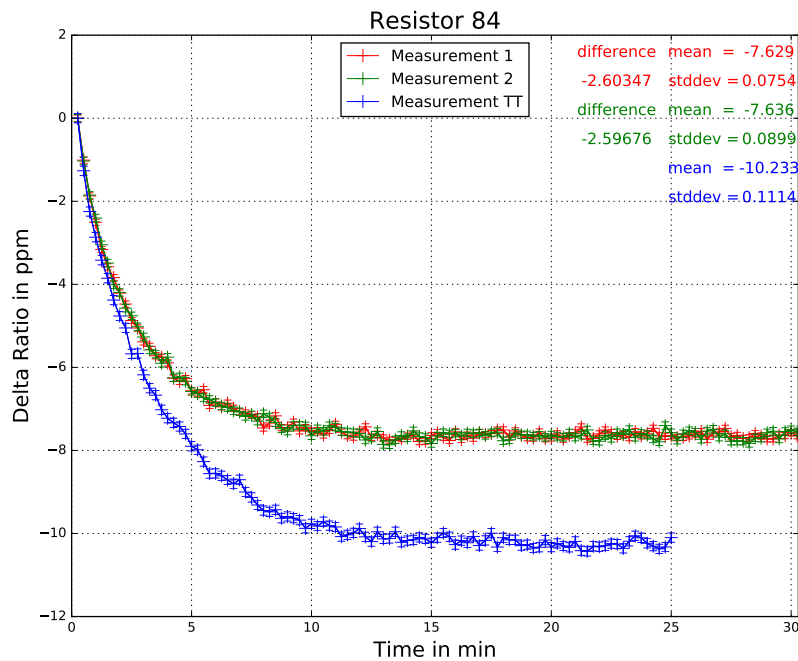


Abbildung 4.6: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 84.

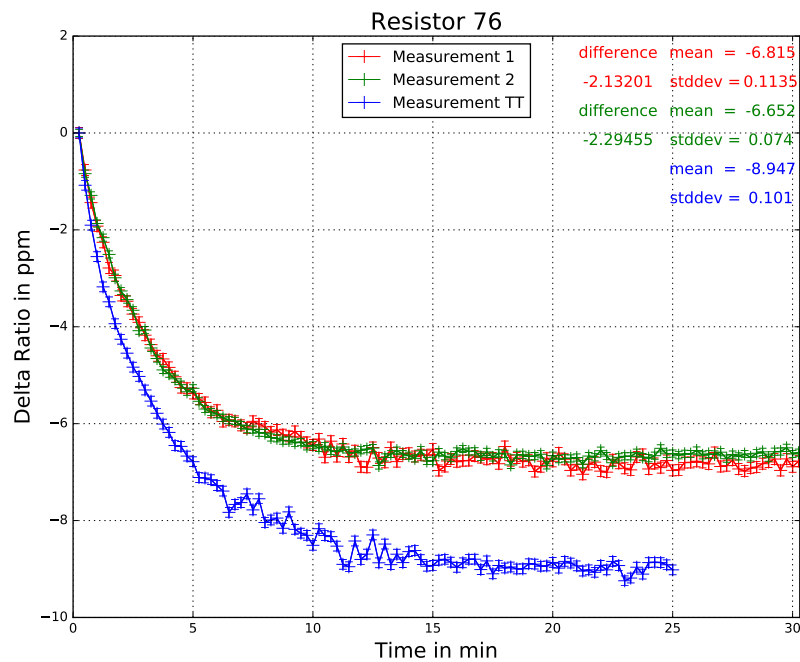


Abbildung 4.7: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 76.

Ein Überblick über die Differenz der Aufwärmabweichung zwischen alten und neuen Messungen befindet sich im Histogramm in Abb. 4.8. Es wird deutlich, dass der Großteil der Messungen einen Unterschied der Aufwärmabweichung von 2 ppm bis 3 ppm in positive Richtung hin besitzt.

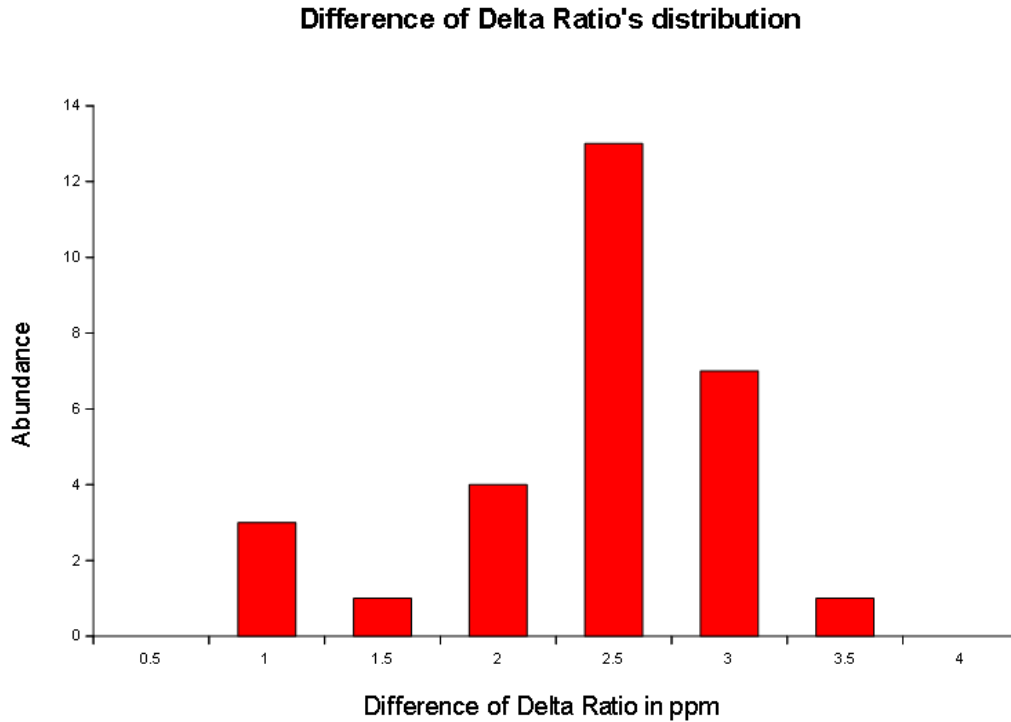


Abbildung 4.8: Histogramm zur Differenz der mittleren Aufwärmabweichung zwischen alten und neuen Messungen.

Das gibt einen Hinweis darauf, dass die Widerstände tatsächlich durch einen Alterungsprozess nun eine geringere Aufwärmabweichung aufweisen. Es ergibt sich jedoch eine Unsicherheit, weil bei den alten Messungen nicht genau bekannt ist welche Zeit zwischen Einschalten der Spannung und Messen des Referenzspannungswerts zum Bestimmen der relativen Aufwärmabweichung der Widerstände liegt. Eine Änderung der relativen Aufwärmabweichung ins Positive ist auch zu erwarten, wenn bei den alten Messungen eine geringere Zeit zwischen Einschalten der Spannung und Messen des Referenzspannungswerts als bei den aktuellen Messungen, die eine Zeit von 15 s zwischen Einschalten und Messen besitzt, vergeht.

Somit ist nicht eindeutig bestimmbar welcher der beiden Effekte für die Verschiebung von 2 ppm bis 3 ppm verantwortlich ist.

4.4 Schlussfolgerung

Weil die Prüf Widerstände nahezu durchgehend negative Abweichungen im Bereich von -6 ppm bis -8 ppm aufweisen, ist es nicht möglich Paare zu finden, die sich gegenseitig aufheben. Deshalb ist die nächste Überlegung das Aufwärmverhalten der Widerstände bei einer anderen Umgebungstemperatur zu untersuchen. Dazu wurde die Zieltemperatur der PID-Regelung im Labview Programm auf jeweils 22 °C und 30 °C gesetzt. Gemessen wurden für jeweils beide Temperaturen 6 unterschiedliche Widerstände. Die dazugehörigen Graphen befinden sich im Anhang. In Abb. 4.9 und 4.10 sind die Messergebnisse für die Widerstände 84 und 90 dargestellt.

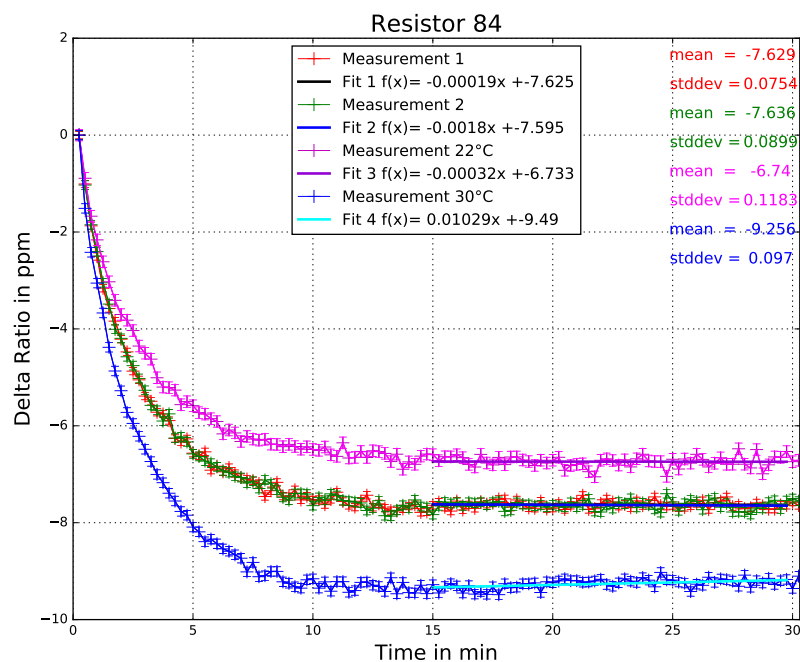


Abbildung 4.9: Vergleich zwischen Messungen bei 22 °C, 25 °C und 30 °C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 84.

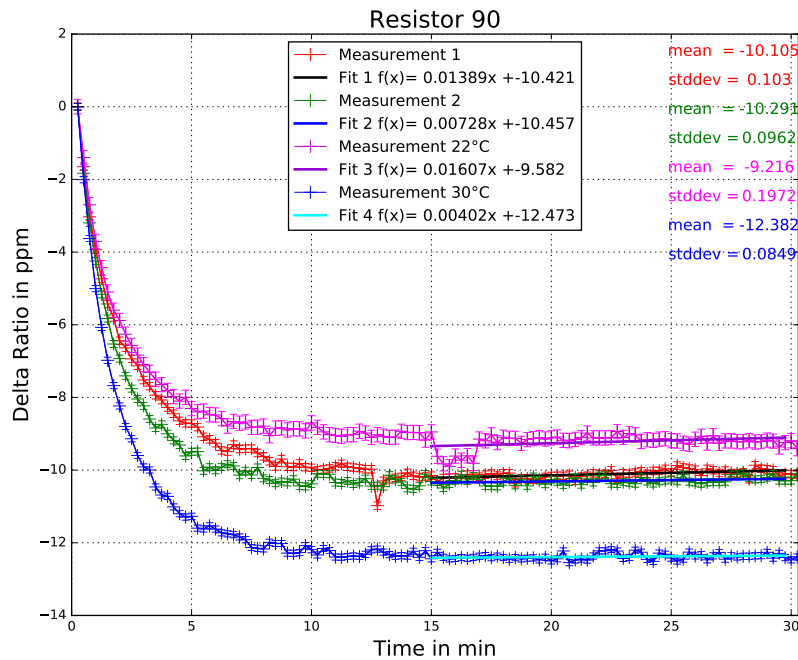


Abbildung 4.10: Vergleich zwischen Messungen bei 22 °C, 25 °C und 30 °C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 90.

Es fällt auf, dass ein Unterschied von 3 ° bzw. 5 ° bereits einen deutlichen Unterschied im Aufwärmverhalten bedeutet. Bei 22 °C ist die mittlere Abweichung ab Minute 15 um etwa 0,9 ppm geringer und bei 30 °C ist die mittlere Abweichung ab Minute 15 um etwa 1,6 ppm größer im Vergleich zur 25 °C Messung. Für den neuen Spannungsteiler bedeutet das also, dass bei niedrigeren Temperaturen eine geringere Abweichung entsteht. Um das Verhalten bei niedrigeren Temperaturen weiter zu untersuchen, wurden im Folgenden Temperaturkoeffizienten-Kurven der Präzisionswiderstände vermessen.

5 Temperaturkoeffizient der Widerstände

Der Temperaturkoeffizient eines Widerstands beschreibt das relative Verhalten bei Änderung der Temperatur. Deswegen wird er in diesem Kapitel untersucht, damit die Vermutung, dass bei niedrigeren Temperaturen geringere Aufwärmabweichungen stattfinden, überprüft werden kann. Zunächst wird wieder der Messaufbau beschrieben. Danach werden die Messergebnisse dargestellt und zum Schluss wird die Bedeutung für den Spannungsteiler erwähnt.

5.1 Messaufbau

Zum Messen des Temperaturkoeffizienten wird ein ähnlicher Messaufbau wie in Kapitel 4.1 verwendet. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass anstatt eines Magazins mit 6 Widerständen ein wärme isolierter Aluminium-Kühlblock, der in Abb. 5.1 gezeigt wird, mit einem Widerstand zum Vermessen in der Messbox angeschlossen wird. Der Kühlblock wird mithilfe eines Peltier-Elements gekühlt. Gesteuert wird das Peltier-Element durch ein für diese Messung erstelltes Labview Programm, welches einen PT1000-Temperatursensor im Kühlblock ausliest. Zusätzlich ist es wichtig die im Widerstand deponierte Leistung in dieser Messung zu minimieren und dennoch im 10 V Bereich des Agilent 3458A Präzisionsmultimeters zu messen. Deshalb wird als Referenzwiderstand ein Widerstand des gleichen Types Vishay VHA518-11 verwendet bei einer Kalibrator Spannung von 20 V, sodass an beiden Widerständen etwa 10 V abfallen.

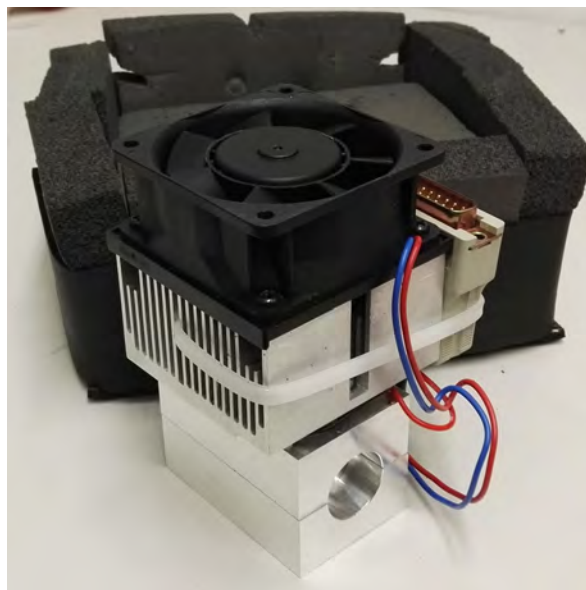


Abbildung 5.1: Verwendeter Kühlblock mit Peltier-Element und zugehörigem Material zur Wärmeisolierung.

Nach Starten der Messung wird zunächst die Ausgabe der 20 V Spannung des Kalibrators durch das Labview Programm eingeschaltet und das Peltier-Element zum Kühlen benutzt. Sobald eine Temperatur von 4 °C oder 5 °C (die Starttemperatur wurde für manche Messungen auf 4 °C angepasst) im Kühlblock erreicht wird, wird nach 30 Minuten konstanter Temperatur die Messung gestartet. Gemessen wird alle 20 Sekunden mit einer Aufwärmrate von 5 K/h bis hin zu einer Temperatur von 30 °C. Da das Peltier-Element nur zum Kühlen benutzt wird, muss die Messbox-Temperatur dementsprechend auf über 30 °C angehoben werden, damit eine Temperatur von 30 °C im Kühlblock erreicht werden kann.

Da es sich bei dieser Messung um zwei Widerstände vom selben Typen handelt, kann man keine Näherung zum Berechnen der relativen Widerstandsänderung benutzen wie es mit Gleichung (2) für das Aufwärmverhalten gemacht wurde. In dieser Messung muss die durch das Fluke 8508A Präzisionsmultimeter gemessene Kalibratorspannung für die Berechnung in Gleichung (3) mit einbezogen werden. U_{out} ist die am Referenzwiderstand gemessene Spannung zum Start der Messung und U_{cal} ist die am Kalibrator gemessene Spannung zum selben Zeitpunkt. $U'_{out}(T)$ und $U'_{cal}(T)$ beschreiben die Spannung am Referenzwiderstand und die Spannung des Kalibrators abhängig von der Temperatur des Widerstands im Kühlblock bei der fortlaufenden Messung. Die relative Änderung des Widerstandswerts $\frac{\Delta R_{prüf}}{R_{prüf}}$ wird somit Abhängig von der Temperatur bestimmt, was als Temperaturkoeffizient bezeichnet wird.

$$\frac{\Delta R_{prüf}}{R_{prüf}} = \frac{\frac{U'_{cal}(T)}{U'_{out}(T)} - 1}{\frac{U_{cal}}{U_{out}} - 1} - 1 \quad (3)$$

5.2 Ergebnisse

Weil die Messungen mehrere Stunden dauern, kann nur ein Widerstand pro Tag vermessen werden. Deswegen wurde nicht für jeden Widerstand der Temperaturkoeffizient vermessen. In Abb. 5.2 und Abb. 5.3 sind Widerstände mit mittleren Aufwärmabweichungen von 7,89 ppm und 7,1 ppm zu sehen. Der Verlauf der relativen Widerstandsänderung entspricht einer negativen Parabel. Die Scheitelpunkte liegen jeweils bei 6,82 °C und 8,92 °C, sodass um diese Temperatur herum die geringste Aufwärmabweichung stattfindet. Der Temperaturkoeffizient eines Widerstandes im Scheitelpunkt beträgt null. Alle weiteren Graphen zu den Temperaturkoeffizienten-Messungen befinden sich im Anhang.

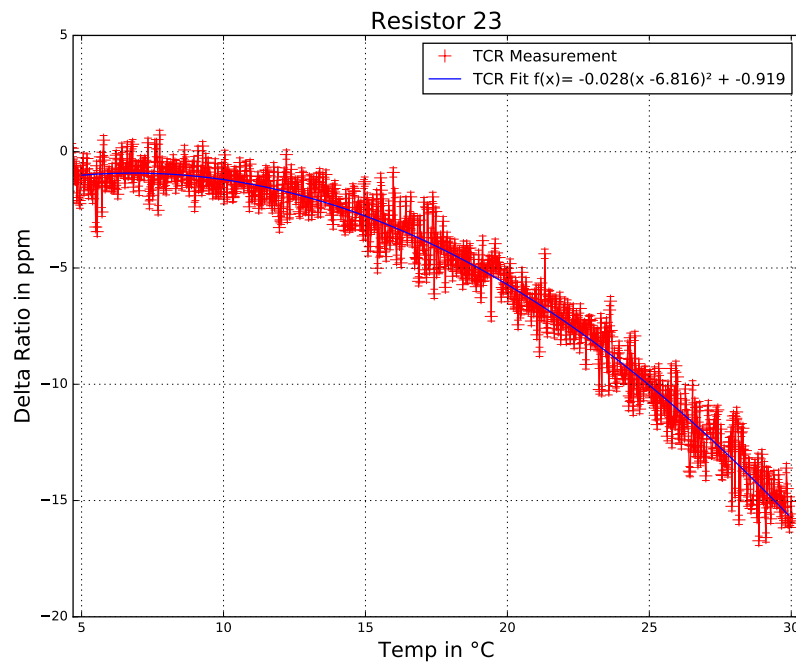


Abbildung 5.2: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 23 mit Referenzwiderstand 77. Widerstand 23 besitzt eine mittlere Aufwärmabweichung von 7,89 ppm und eine Scheitelpunkttemperatur von 6,82 °C.

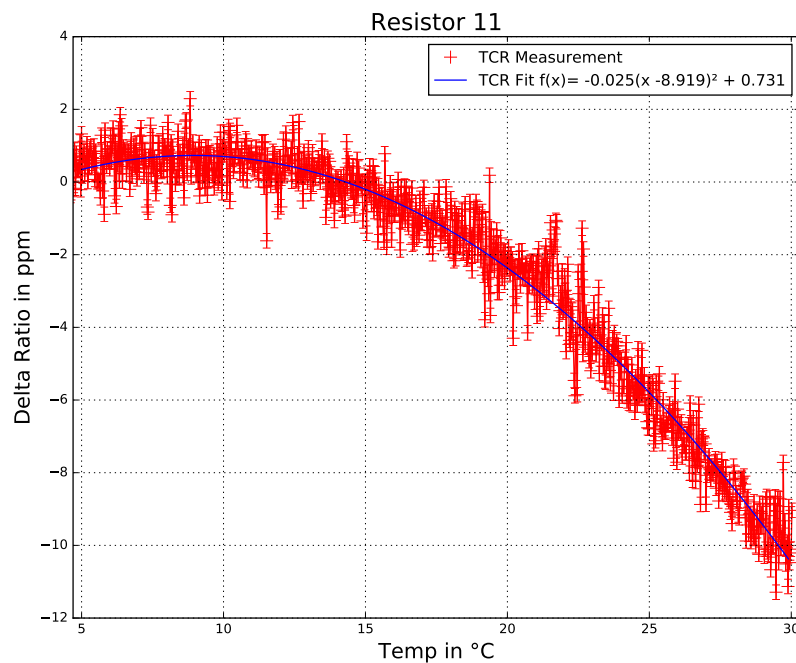


Abbildung 5.3: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 11 mit Referenzwiderstand 77. Widerstand 11 besitzt eine mittlere Aufwärmabweichung von 7,1 ppm und eine Scheitelpunkttemperatur von 8,92 °C.

5.3 Schlussfolgerung

So wie vermutet weisen die Präzisionswiderstände bei niedrigeren Temperaturen geringere Temperaturkoeffizienten auf. Das entspricht der Messung des Aufwärmverhaltens bei 22 °C sowie den Messungen der relativen Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur. Aus den ermittelten Werten der Temperaturen, bei der die relative Widerstandsänderung abhängig von der Temperatur ein Minimum aufweist, welche sich gerade im Scheitelpunkt der Temperaturkoeffizienten-Messungen befindet, und den Aufwärmabweichungen aller Widerstände aus Kapitel 4.2 (Abb. 4.4) ist es möglich die optimale Betriebstemperatur für den Spannungsteiler zu bestimmen. Dazu wurden alle vorhandenen Scheitelpunkttemperaturen mit den zugehörigen Aufwärmabweichungen der Widerstände verbunden und ein linearer Zusammenhang zwischen diesen Werten für alle vermessenen Widerstände bestimmt. Im Histogramm in Abb. 5.4 ist die Temperatur, bei der die Temperaturabhängigkeit minimal ist, als Verteilung über alle Widerstände dargestellt. Die optimale Temperatur für den Betrieb des Spannungsteilers beträgt somit zwischen 8 °C und 9 °C, da zwischen 5 °C und 11 °C der Großteil der Widerstände den geringsten Wert der Temperaturabhängigkeit aufweist.

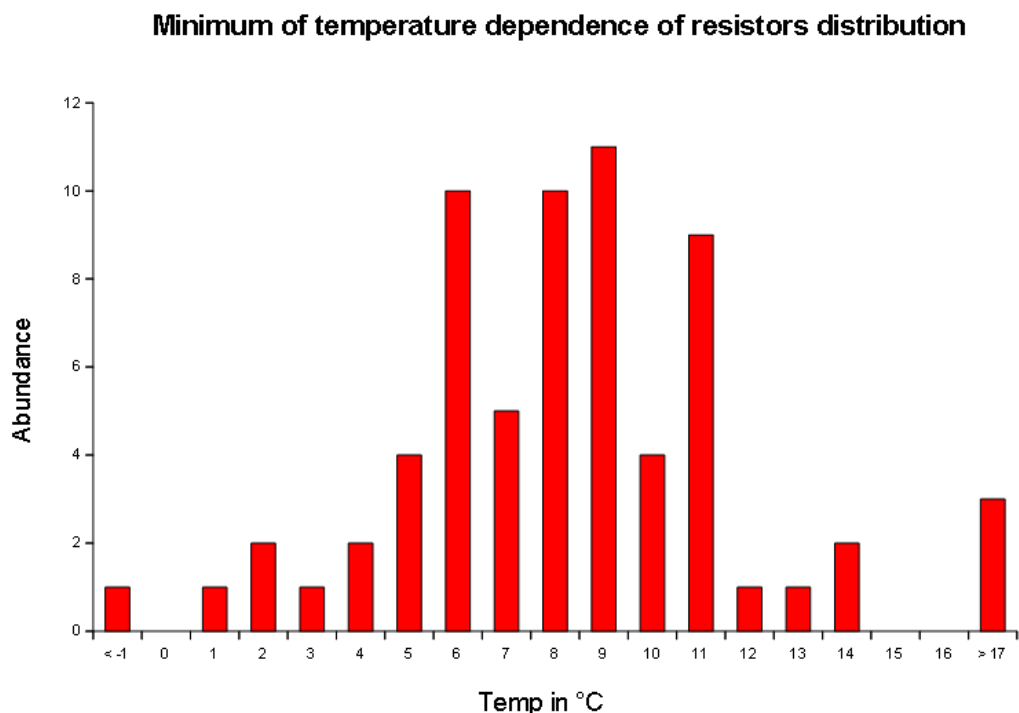


Abbildung 5.4: Histogramm zur minimalen Temperaturabhängigkeit aller Widerstände.

Für den Entwurf des neuen Spannungsteilers bedeutet das, dass eine Kühlung im Spannungsteiler die Aufwärmabweichung der Widerstände deutlich reduzieren könnte, so dass der Spannungsteiler als Ganzes eine geringere Aufwärmabweichung aufweisen wür-

de. Auf den Betrieb des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen wird im nächsten Kapitel eingegangen.

6 Betrieb des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen

In diesem Kapitel wird über den Betrieb des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen berichtet. Speziell wird untersucht ob die Bildung von Tau zu einem Problem werden könnte. Wie schon in Kapitel 3 erwähnt, wird der zylindrische Außenbehälter des Spannungsteilers mit trockenem Stickstoffgas ausgefüllt. Aufgrund dessen sollte innerhalb des Spannungsteilers bei Betrieb mit gekühltem Stickstoff Taubildung nicht zum Problem werden, da die relative Feuchtigkeit im Vergleich zur Luftfeuchtigkeit außerhalb des Spannungsteiler-Behälters gering sein sollte. Weil aber immer die Gefahr einer undichten Stelle besteht, sollte dennoch auf die relative Feuchtigkeit geachtet werden. Vor allem aber außen am Spannungsteiler-Behälter kann es durch Temperaturen unterhalb der Taupunkttemperatur zur Kondensation kommen abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Aus diesen Gründen sollte innerhalb sowie außerhalb des Spannungsteilers die relative Luftfeuchtigkeit überwacht werden, um mögliche Überschlüsse zu vermeiden.

Die Taupunkttemperatur kann durch Umstellen der Magnus-Formel [Tau16b] (4) abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Außentemperatur bestimmt werden. Die Magnus-Formel in Gleichung (4) ist eine Näherung zur Beschreibung des Sättigungsdampfdrucks in einem Temperaturbereich von -45 °C bis 60 °C bei einer bestimmten Temperatur T . Gleichung (5) stellt die Magnus-Formel für den Sättigungsdampfdruck bei der Taupunkttemperatur τ dar. Die K-Parameter sind gegeben mit $K_1 = 6,112\text{ hPa}$, $K_2 = 17,62$ und $K_3 = 243,12\text{ °C}$ [Tau16a]. Die relative Luftfeuchtigkeit φ in Gleichung (6) lässt sich als Quotient des Sättigungsdampfdrucks bei der Taupunkttemperatur τ und des Sättigungsdampfdrucks in Abhängigkeit von der Außentemperatur T schreiben. Durch Einsetzen von Gleichung (4) und (5) in (6) lässt sich die Taupunkttemperatur τ abhängig von der Außentemperatur T und der relativen Luftfeuchtigkeit φ ausdrücken, was in Gleichung (7) beschrieben wird.

$$p_s(T) = K_1 \cdot \exp \frac{K_2 \cdot T}{K_3 + T} \quad (4)$$

$$p_s(\tau) = K_1 \cdot \exp \frac{K_2 \cdot \tau}{K_3 + \tau} \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{p_s(\tau)}{p_s(T)} \quad (6)$$

$$\tau(\varphi, T) = K_3 \cdot \frac{\frac{K_2 \cdot T}{K_3 + T} + \ln \varphi}{\frac{K_2 \cdot K_3}{K_3 + T} - \ln \varphi} \quad (7)$$

In Abb. 6.1 ist die Gleichung (7) für verschiedene Werte der relativen Luftfeuchtigkeit grafisch dargestellt.

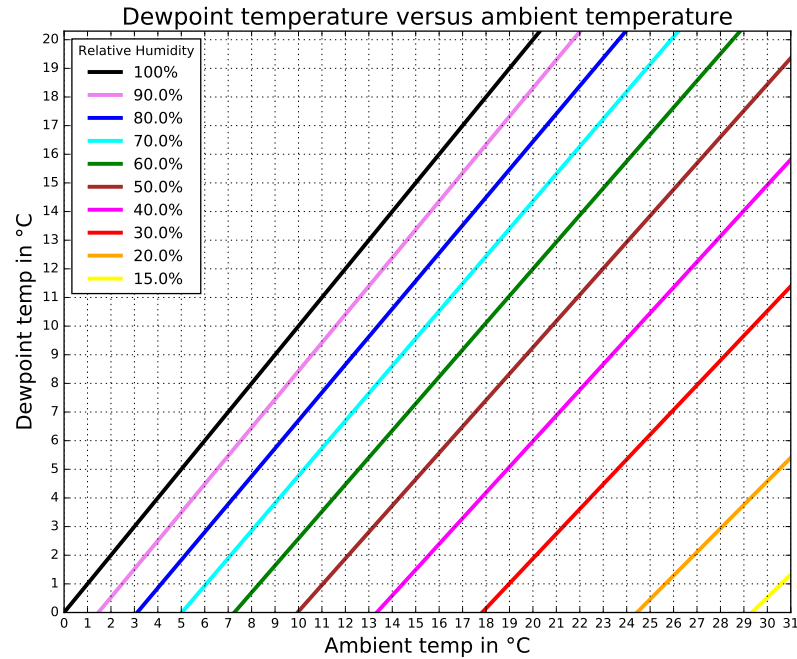


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Taupunkttemperatur und Außentemperatur bei verschiedenen Werten der relativen Luftfeuchtigkeit.

Am Graphen in Abb. 6.1 kann nun abgelesen werden welche Temperaturwerte der Spannungsteiler bei Betrieb nicht unterschreiten sollte. Wird davon ausgegangen, dass der Wert für die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 60% liegt, so kann bei einer Außentemperatur von 20 °C der Spannungsteiler bis auf 12 °C gekühlt werden ohne Taubildung zu haben, da die Taupunkttemperatur zwischen 6 °C und 12 °C für die jeweiligen Werte der relativen Luftfeuchtigkeiten liegt. Sollte die relative Luftfeuchtigkeit aber 70% erreichen, dann wären 15 °C schon an der Grenze zur Taubildung.

Aufgrund dessen ist es wichtig bei Betrieb des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen ein Hygrometer¹¹ zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit außerhalb und innerhalb des Spannungsteilers zu betreiben, um das Risiko der Taubildung zu überwachen.

¹¹Messinstrument zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit

7 Vergleich der verschiedenen Präzisionsmultimeter

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Allan-Varianz, die eine Möglichkeit für den Vergleich der beiden Präzisionsmultimeter Agilent 3458A und Keysight 3458A des Hochspannungslabors des Institut für Kernphysik an der Uni Münster darstellt. Zunächst wird die Theorie zur Allan-Varianz beschrieben, danach wird der Messaufbau dargestellt und schließlich werden die Messergebnisse für den Vergleich der Präzisionsmultimeter präsentiert.

7.1 Allan-Varianz und Allan-Abweichung

Die Allan-Varianz ist eine Angabe für die Stabilität von Oszillatoren. Sie ist definiert als die Hälfte des Mittelwerts der Differenz zwei aufeinanderfolgender Messwerte zum Quadrat. Als τ wird die Dauer eines Messzyklus und als τ_n wird nach Gleichung (8) die n -fache Dauer eines Messzyklus definiert. In Gleichung (9) wird die Allan-Varianz σ_y^2 in Abhängigkeit von τ_n beschrieben [Av16]. Dabei durchläuft τ_n Werte von τ , der Dauer eines Messzyklus, bis hin zu einem maximalen Wert, was der Hälfte der Gesamtmesszeit einer Messung entspricht. Als Ergebnis werden alle Werte für $\sigma_y^2(\tau_n)$ in einem Graphen betrachtet. Ein geringer Wert für die Allan-Varianz entspricht einem stabilen Wert für einen Messzyklus der Dauer $n \cdot \tau$.

$$\tau_n = n \cdot \tau \tag{8}$$

$$\sigma_y^2(\tau_n) = \frac{1}{2} \langle (y_{j+1}(\tau_n) - y_j(\tau_n))^2 \rangle \tag{9}$$

Die Allan-Abweichung ist als Quadratwurzel der Allan-Varianz definiert.

7.2 Messaufbau



Abbildung 7.1: Frontalansicht des Keysight 3458A Präzisionsmultimeters.

Der Messaufbau zum Vergleichen der Präzisionsmultimeter Agilent 3458A und Keysight 3458A (Abb. 7.1) ist sehr einfach gehalten. Als Spannungsquelle wird eine Fluke 732A 10V DC-Referenz verwendet. Beide Präzisionsmultimeter messen über einen längeren Zeitraum den 10 V Ausgang der Referenz. Ein dafür erstelltes Labview Programm steuert beide Multimeter an und liest alle 20 Sekunden einen neuen Spannungswert aus. Beide Multimeter wurden auf 250 NPLCs eingestellt, was einer Integrationszeit von etwa 20 Sekunden entspricht. Die Auswertung konnte mit einem dafür von Stephan Bauer bereitgestelltem Labview Programm durchgeführt werden [Bau16].

7.3 Ergebnisse

Das ältere Agilent Multimeter besitzt bereits bei $2\tau = 40\text{ s}$ ein Minimum für die Allan-Varianz, während das neuere Keysight Multimeter zunächst bei $5\tau = 100\text{ s}$ ein leicht ausgeprägtest lokales Minimum und im Folgenden bei $12\tau = 240\text{ s}$ ein absolutes Minimum für die Allan-Varianz aufweist. Bemerkbar ist allerdings, dass das neue Keysight Multimeter im Vergleich zum alten Agilent Multimeter einen dauerhaft geringeren Wert für die Allan-Varianz besitzt. Bei beiden Multimetern wird es deutlich, dass es keinen Sinn macht Messungen mit Messzyklen von über 40 Sekunden für das Agilent Multimeter und Messungen mit Messzyklen von über 240 Sekunden für das Keysight Multimeter zu starten. Die Graphen zu beiden Messungen sind in Abb. 7.1 und 7.2 zu finden.

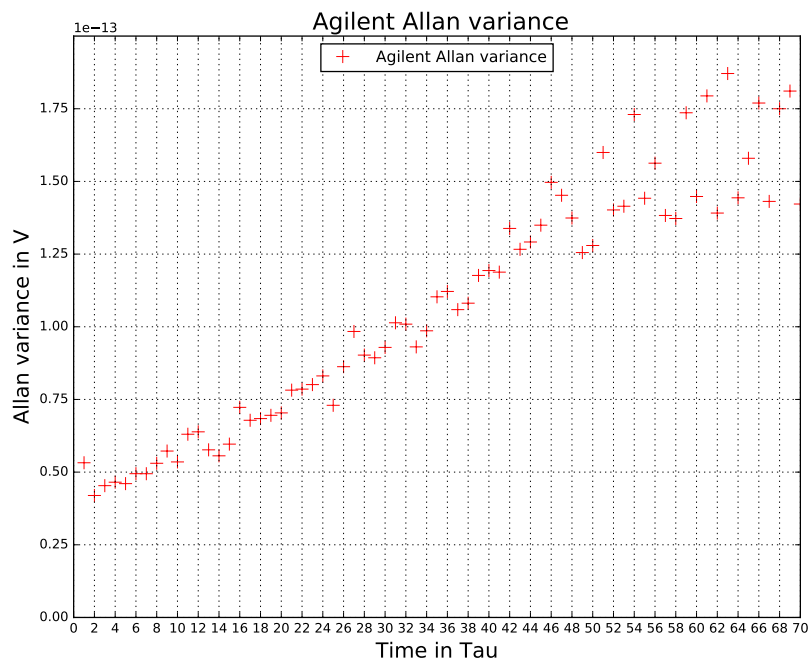


Abbildung 7.2: Graph zur Allan-Varianz Messung des Agilent 3458A Präzisionsmultimeters. Fluke 732A 10V DC-Referenz als Spannungsquelle.

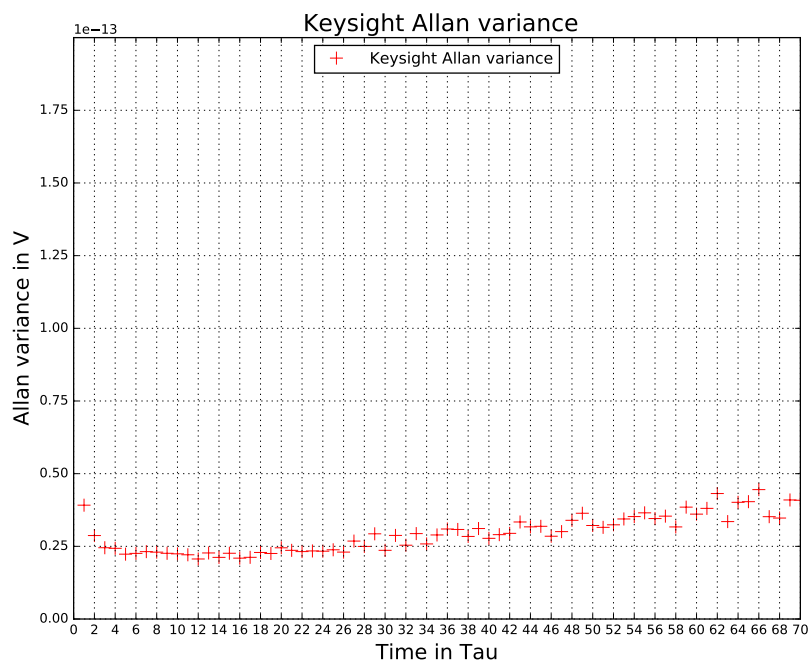


Abbildung 7.3: Graph zur Allan-Varianz Messung des Keysight 3458A Präzisionsmultimeters. Fluke 732A 10V DC-Referenz als Spannungsquelle.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Design des neuen Spannungsteilers für CRYRING ist ungewollt anders ausgefallen im Vergleich zu den bisherigen K35 und K65 Spannungsteilern für das KATRIN Experiment. Das Ziel für den neuen Spannungsteiler war es wie zuvor auch Widerstands-Paare zu finden, die entgegengesetzte Aufwärmabweichungen vorweisen und so kombiniert eine Aufwärmabweichung im sub-ppm-Bereich besitzen. Nach Vermessen des Aufwärmverhaltens aller Widerstände wurde deutlich, dass nur noch Widerstände mit negativer Aufwärmabweichung zur Verfügung stehen. Der Großteil der Widerstände besitzt Aufwärmabweichungen zwischen -6 ppm und -8 ppm. Das entspricht einer Aufwärmabweichung des gesamten Spannungsteilers von etwa -7 ppm bei einer Temperatur von 25 °C. Als Alternativlösung wurde das Verhalten bei anderen Temperaturen betrachtet und es entstand die Idee Temperaturkoeffizienten-Kurven aufzuzeichnen. Deren Ergebnis hat gezeigt, dass der Großteil der Widerstände ein Minimum der Temperaturabhängigkeit bei einer Betriebstemperatur zwischen 5 °C und 11 °C besitzt. Die optimale Betriebstemperatur liegt deswegen bei 8 °C bis 9 °C. Durch Vergleichen mit Widerständen mit ähnlicher Scheitelpunkttemperatur und Aufwärmabweichung kann eine Aufwärmabweichung für den gesamten Spannungsteiler von etwa -1 ppm bei einer Betriebstemperatur von 9 °C angegeben werden. Dadurch liegt es nahe den Spannungsteiler bei einer Temperatur zu betreiben, der der Betriebstemperatur zum Minimieren der Aufwärmabweichung möglichst nahe kommt, um eine geringere Aufwärmabweichung im gesamten Spannungsteiler zu erhalten. Die minimale Temperatur im Spannungsteiler ist jedoch durch mögliche Taubildung begrenzt. In Kapitel 6 wurde festgestellt, dass ein Hygrometer zum Messen der relativen Luftfeuchtigkeit beim Betreiben des Spannungsteilers bei niedrigen Temperaturen wichtig ist. Schließlich wurde mit dem Keysight 3458A Präzisionsmultimeter ein geeignetes Gerät zum Vermessen des 10 V Bereichs mit ppm-Genauigkeit ausgewählt.

Das resultierende Design für den neuen Spannungsteiler für CRYRING hat den Vorteil sich bei Bedarf in Hinsicht auf die Genauigkeit im ppm-Bereich anzupassen. "Auf Knopfdruck" erhält man eine Aufwärmabweichung von etwa -1 ppm bei einer Temperatur von 9 °C im Spannungsteiler. Wenn die Kühlung deaktiviert ist, liegt die Aufwärmabweichung noch bei etwa -7 ppm, was den Anforderungen von < 10 ppm für den CRYRING Spannungsteiler entspricht, bei einer Temperatur von 25 °C. Der Spannungsteiler soll Ende des Jahres 2016 fertiggestellt sein und im Jahre 2017 bereits im CRYRING integriert werden.

Literaturverzeichnis

- [Av16] ALLAN-VARIANCE: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Allan_variance. Version: 2016. – [Online; Zugriff am 5. Mai 2016]
- [Bau10] BAUER, S.: *Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisions-Hochspannungsteilers bis 65kV für das KATRIN-Experiment*. 2010. – Diplomarbeit
- [Bau13] BAUER, S.: *Next generation KATRIN high precision voltage divider for voltages up to 65kV*. 2013. – Journal of Instrumentation 8 (2013), P10026
- [Bau16] BAUER, S.: *Optimization of measurement time (Allan deviation)*. 2016. – Vortrag
- [HNR⁺15] HANNEN, V. ; NÖRTERSCHÄUSER, W. ; REST, O. ; WEINHEIMER, C. ; WINZEN, D.: *Precision high voltage divider for the electron cooler at CRYRING*. 2015. – Technical Design Report
- [Hoc08] HOCHSCHULZ, F.: *Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungsmessung für das KATRIN-Experiment*. 2008. – Diplomarbeit
- [Lab14] LABORATORY, Manne S.: *Cryring Legacy information*. http://www.msl.se/MSL_files/cryring.html. Version: 2014. – [Online; Zugriff am 5. Mai 2016]
- [Loc14] LOCHMANN, M.: *Observation of the hyperfine transition in lithium-like bismuth $^{209}\text{Bi}^{80+}$: Towards a test of QED in strong magnetic fields*. 2014. – Phys. Rev. A 90, 030501(R)
- [Rut11] RUTHERFORD, E.: *The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom*. 1911. – Philosophical Magazine, volume 21
- [Tau16a] TAUPUNKT, Magnus-Formel: *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Taupunkt>. Version: 2016. – [Online; Zugriff am 5. Mai 2016]
- [Tau16b] TAUPUNKT, Sättigungsdampfdruck Magnus-Formel: *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4ttigungsdampfdruck>. Version: 2016. – [Online; Zugriff am 5. Mai 2016]
- [Tho97] THOMSON, J. J.: *XL. Cathode Rays*. 1897. – Philosophical Magazine, Series 5, Volume 44, Issue 269
- [Thu07] THUEMMLER, T.: *Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment*. 2007. – Dissertation
- [Thu09] THUEMMLER, T.: *KATRIN 35 kV high voltage divider*. 2009. – New Journal of Physics 11 (2009), 103007
- [Ull15] ULLMANN, J.: *An improved value for the hyperfine splitting of hydrogen-like $^{209}\text{Bi}^{82+}$* . 2015. – Journal Phys. B, 48, 144022
- [Vis14] VISHAY: *Hermetically Sealed High Precision Bulk Metal Foil Technology Resistors*. <http://www.vishaypg.com/docs/63006/hmetlab.pdf>. Version: 2014. – Datenblatt

Anhang

Tabellen - Kapitel 4.2

Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean
01	-5.744	02	-7.696	03	18772.857
06	-8.437	09	-6.249	11	-7.097
12	-6.281	13	-6.261	14	-6.821
15	-6.975	16	-7.476	18	-8.304
19	-7.61	20	-7.782	21	-7.704
23	-7.888	24	-6.534	25	-7.192
28	-6.197	30	-7.739	33	-6.218
36	-6.961	37	-6.98	38	-6.517
40	-7.08	42	-6.921	43	-8.234
44	-7.283	46	-7.349	47	-6.917
48	-7.175	49	-8.219	51	-7.715
52	-6.506	53	-9.187	56	42
58	-9.199	59	-6.873	60	-8.758
61	-7.101	62	-7.68	64	-6.29
66	92.849	67	-6.914	68	-9.311
69	2.129	71	-7.137	72	-7.792
73	-7.178	74	-6.321	76	-6.815
78	-5.898	79	-8.155	81	-7.537
82	-7.038	83	-7.811	84	-7.629
86	-7.368	87	28.131	89	-4.653
90	-10.105	91	-9.151	92	-7.881
93	-6.178	95	-8.191	97	-6.572
99	-7.015	100	-3.969	102	7.767
118	-3.043	128	-7.696	145	-2.161
148	-7.339	150	-6.206	163	-1.99
170	-13.426	171	-18.808	190	0.697
192	-8.412	ON1	-5.299	ON2	-9.958
ON3	-0.336				

Tabelle 8.1: Tabelle zur Aufwärmabweichung aller Widerstände (Messreihe 1).

Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean
12	-6.591	15	-7.148	30	-7.678
36	-6.977	37	-6.654	38	-6.712
40	-7.166	44	-7.403	52	-6.344
58	-9.715	76	-6.652	83	-6.811
84	-7.636	86	-5.931	87	-5.5
89	-8.198	90	-10.291	91	-13.45
92	-7.291	93	-7.897	97	-21.295
100	-6.136	145	-2.002	170	-9.245
171	-0.253				

Tabelle 8.2: Tabelle zur Aufwärmabweichung einiger Widerstände (Messreihe 2).

Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean	Resistor	Warmup mean
91	-6.146	93	-7.02	97	-7.218
100	-6.197	170	-7.359	171	-1.013

Tabelle 8.3: Tabelle zur Aufwärmabweichung einiger Widerstände (Messreihe 3).

Abbildungen - Kapitel 4.2

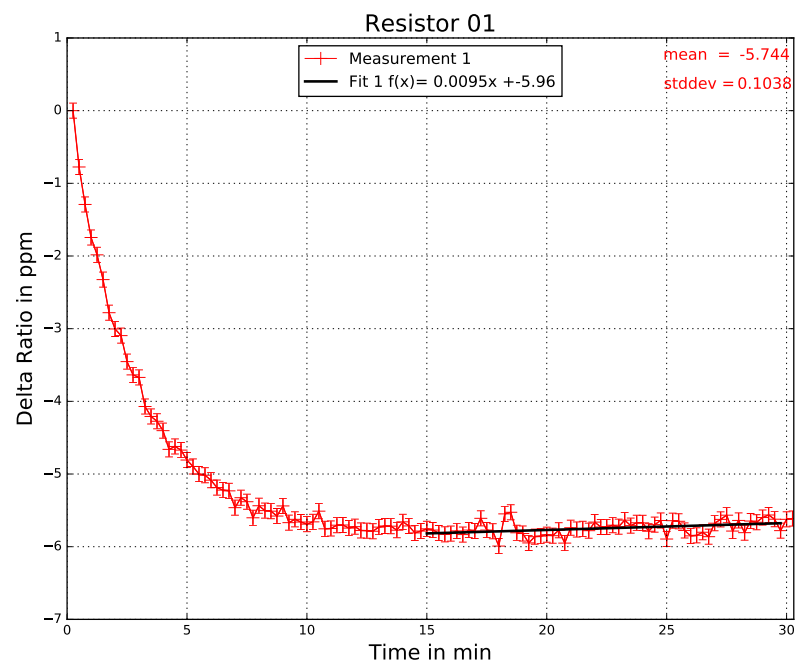


Abbildung 8.1: Aufwärmverhalten des Widerstands 01.

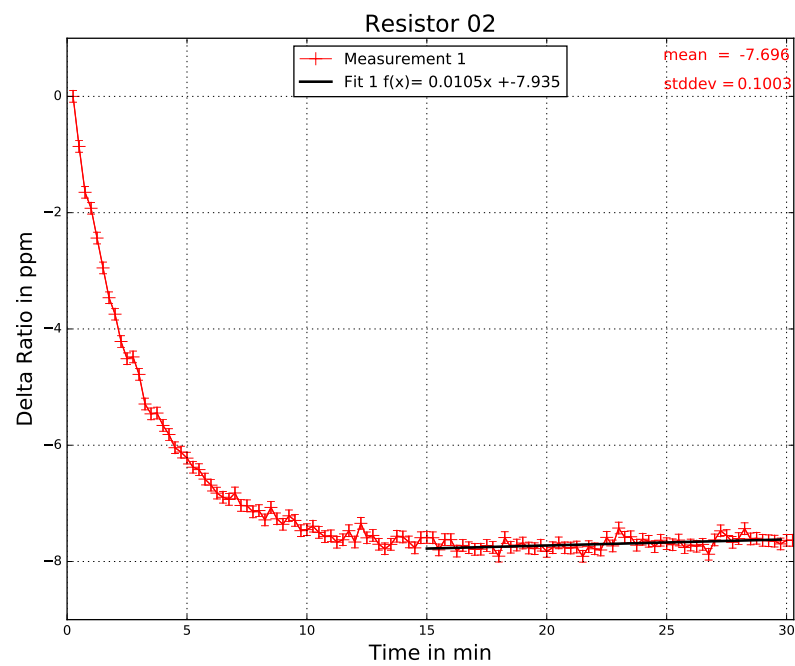


Abbildung 8.2: Aufwärmverhalten des Widerstands 02.

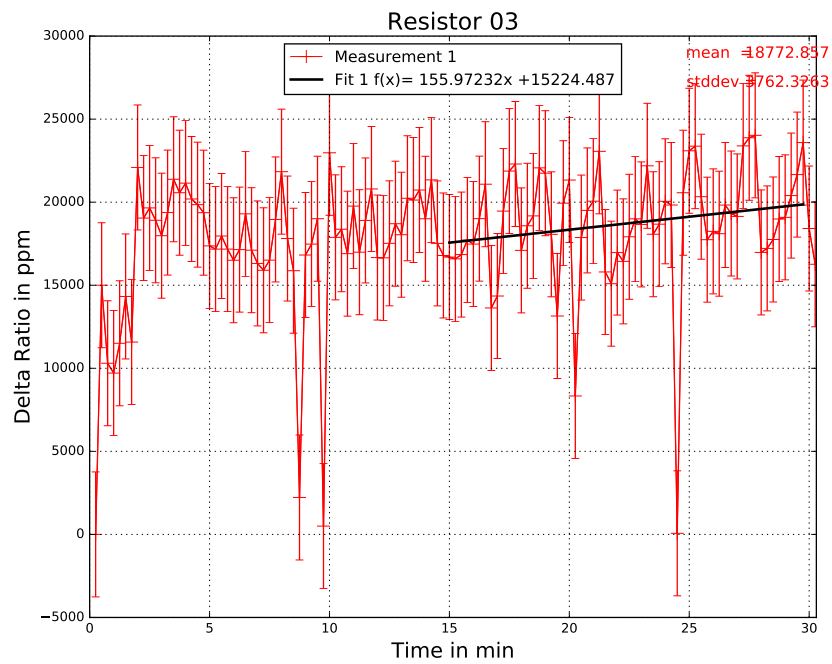


Abbildung 8.3: Aufwärmverhalten des Widerstands 03.

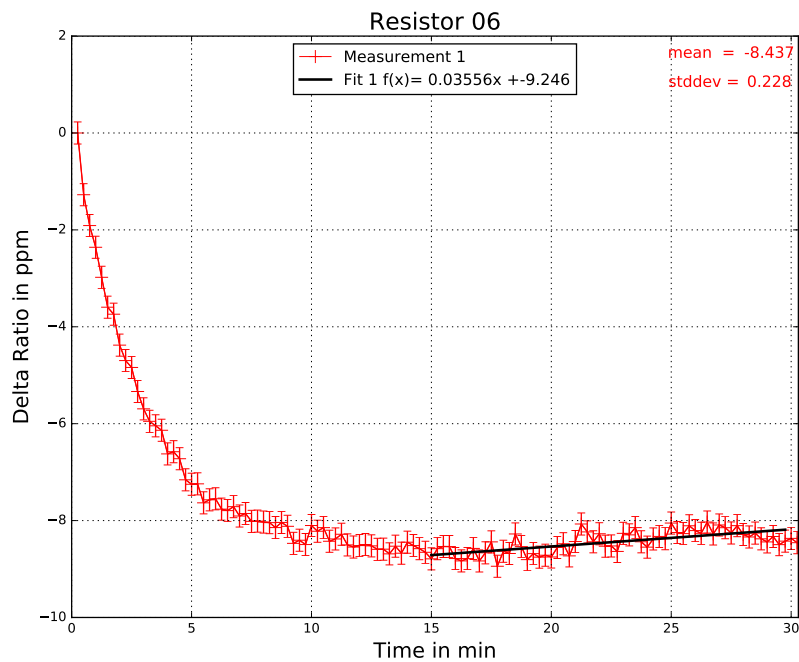


Abbildung 8.4: Aufwärmverhalten des Widerstands 06.

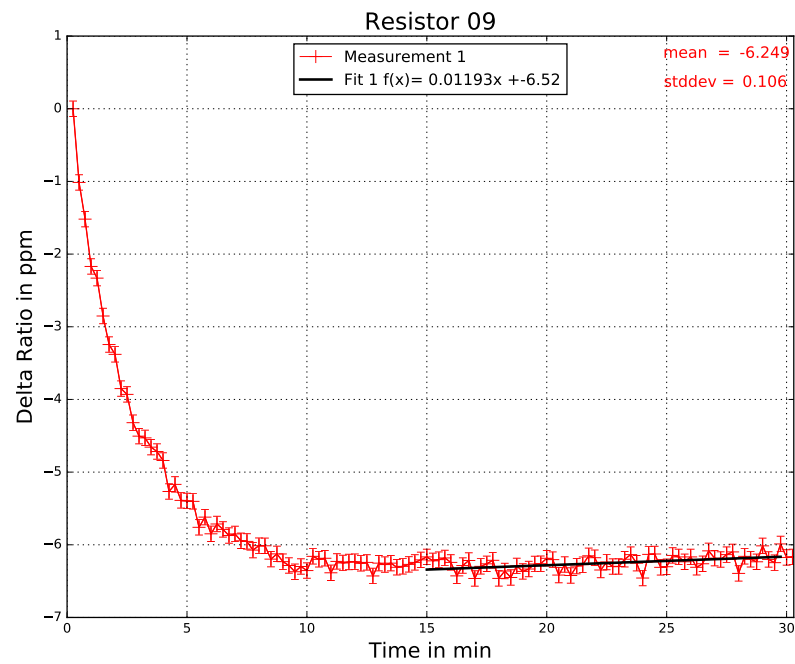


Abbildung 8.5: Aufwärmverhalten des Widerstands 09.

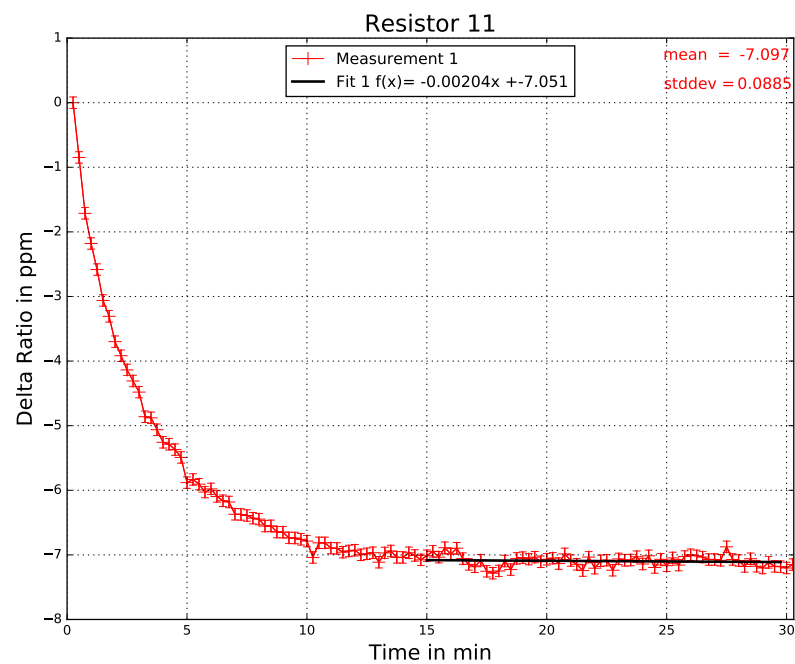


Abbildung 8.6: Aufwärmverhalten des Widerstands 11.

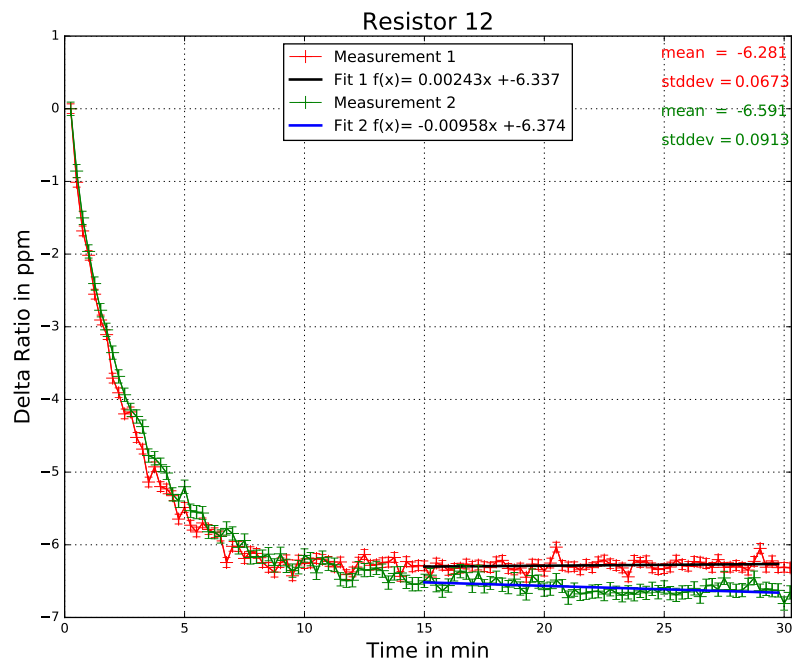


Abbildung 8.7: Aufwärmverhalten des Widerstands 12.

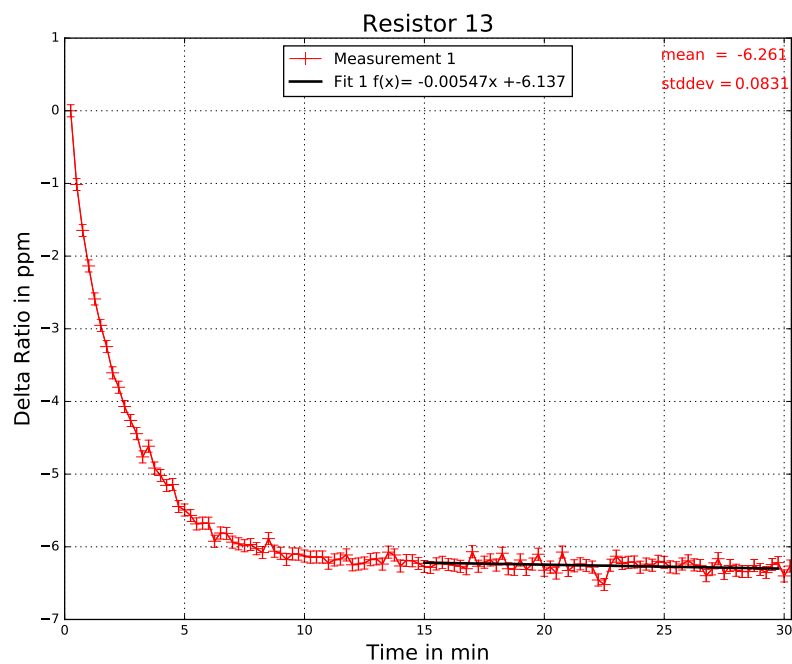


Abbildung 8.8: Aufwärmverhalten des Widerstands 13.

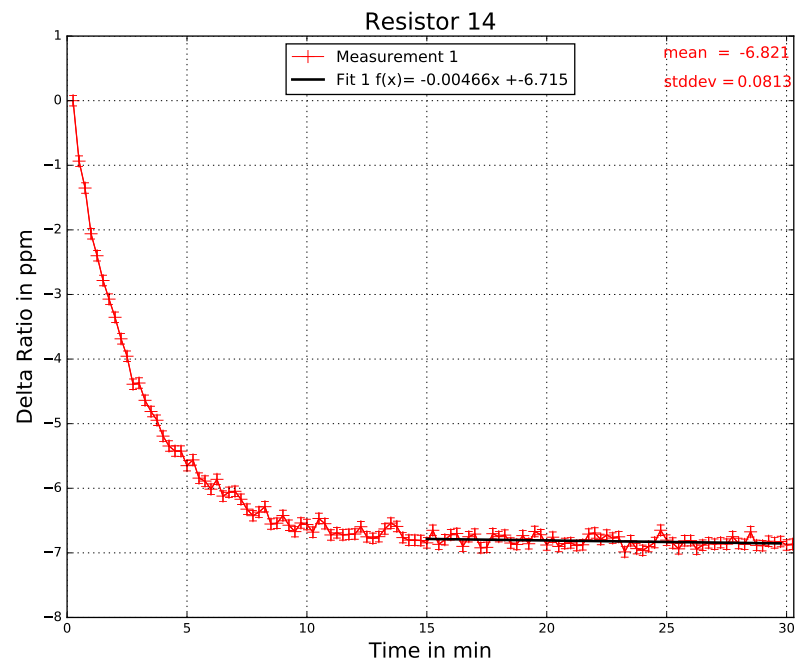


Abbildung 8.9: Aufwärmverhalten des Widerstands 14.

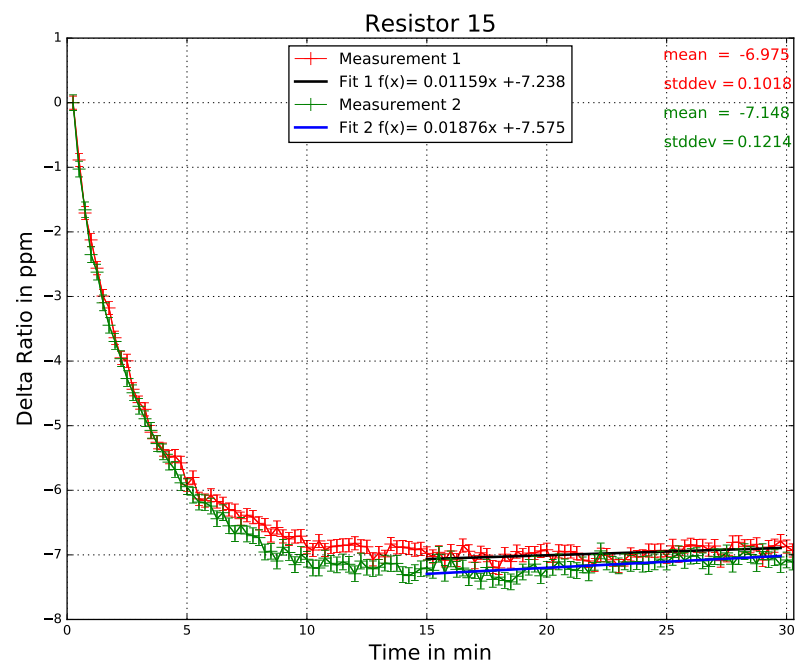


Abbildung 8.10: Aufwärmverhalten des Widerstands 15.

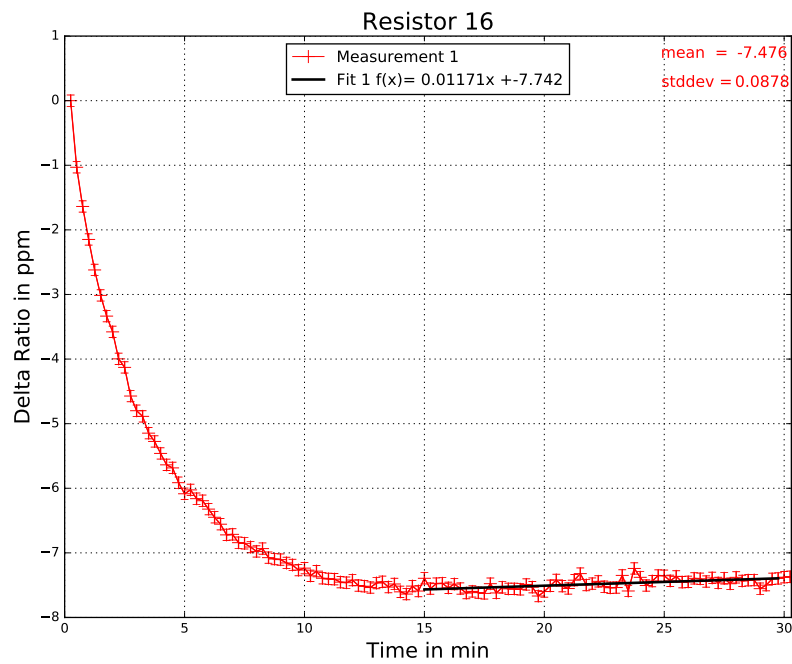


Abbildung 8.11: Aufwärmverhalten des Widerstands 16.

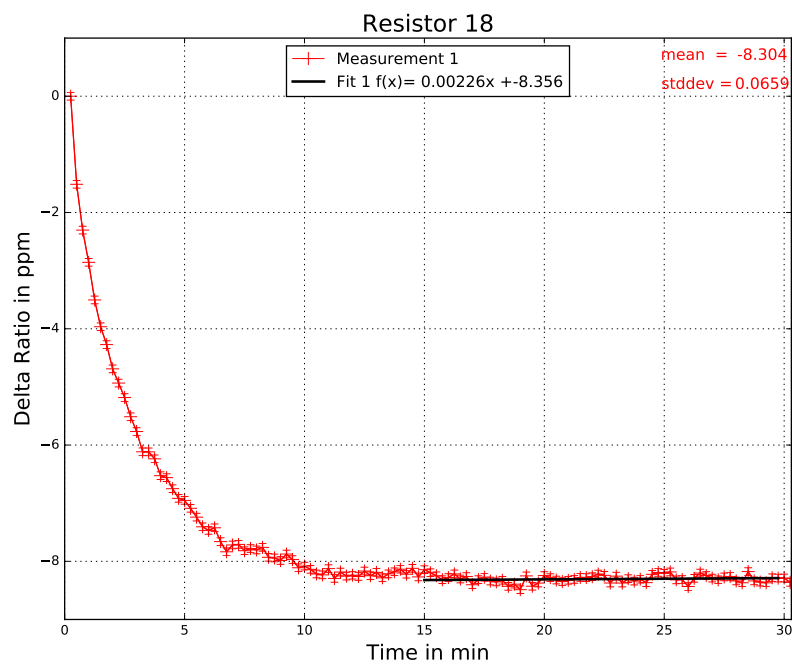


Abbildung 8.12: Aufwärmverhalten des Widerstands 18.

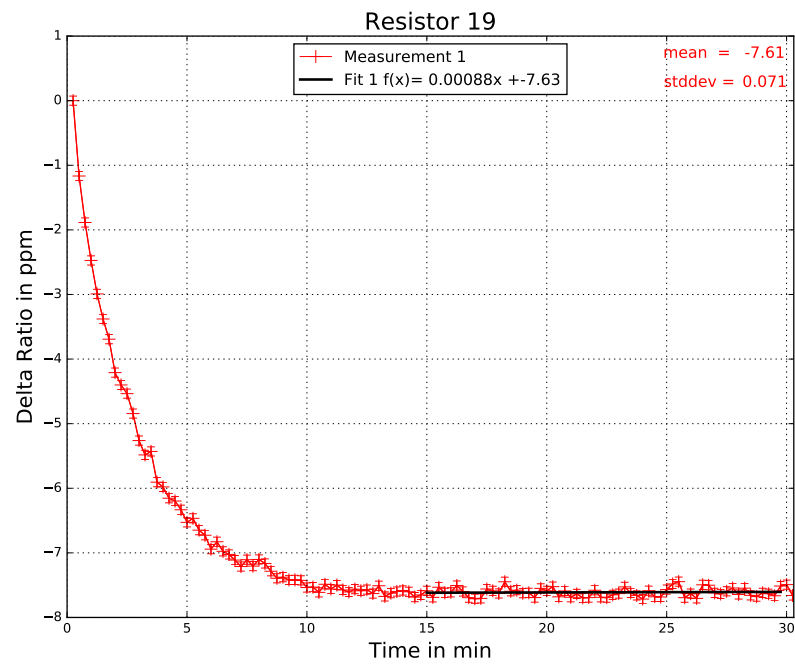


Abbildung 8.13: Aufwärmverhalten des Widerstands 19.

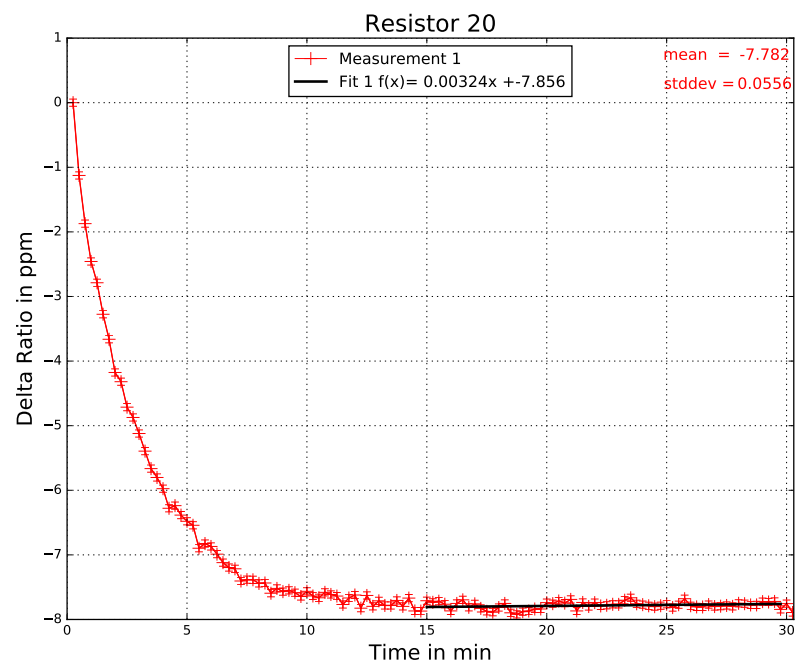


Abbildung 8.14: Aufwärmverhalten des Widerstands 20.

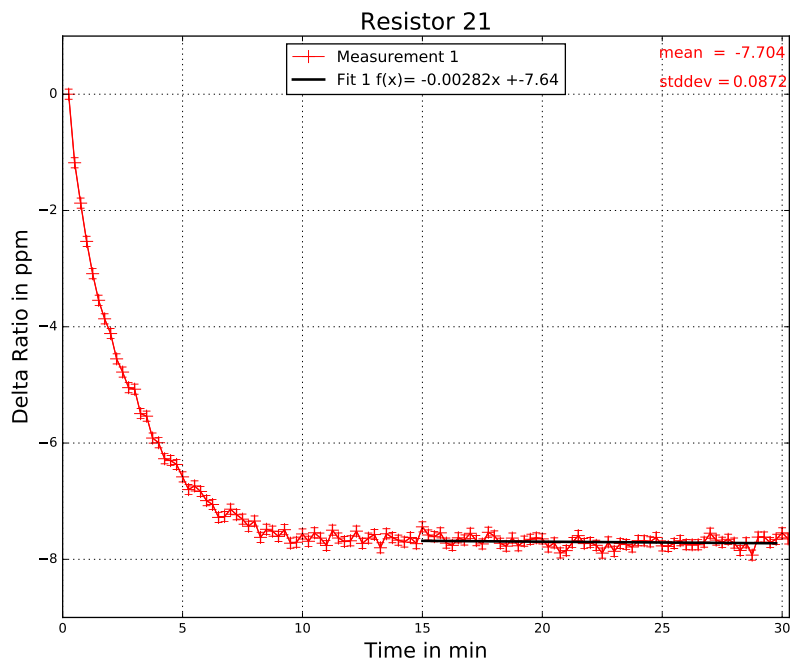


Abbildung 8.15: Aufwärmverhalten des Widerstands 21.

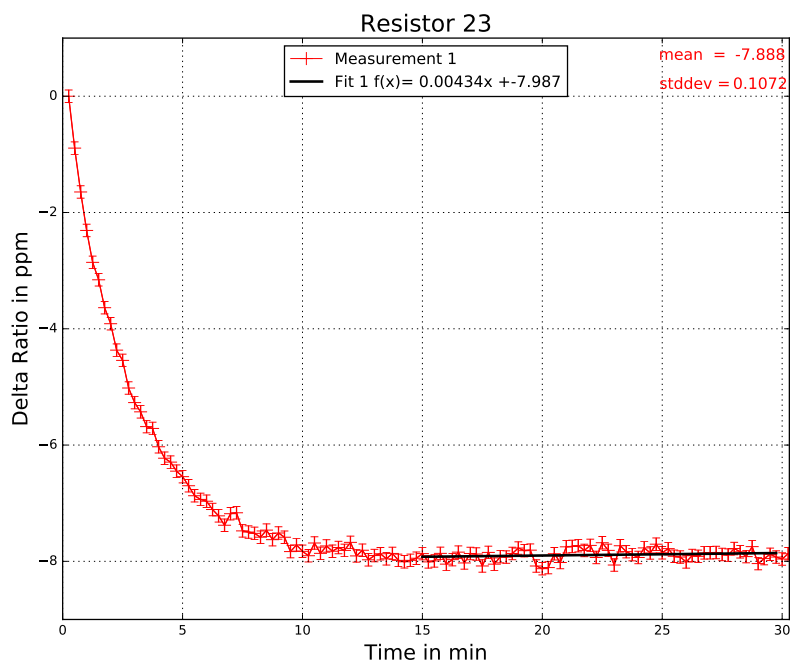


Abbildung 8.16: Aufwärmverhalten des Widerstands 23.

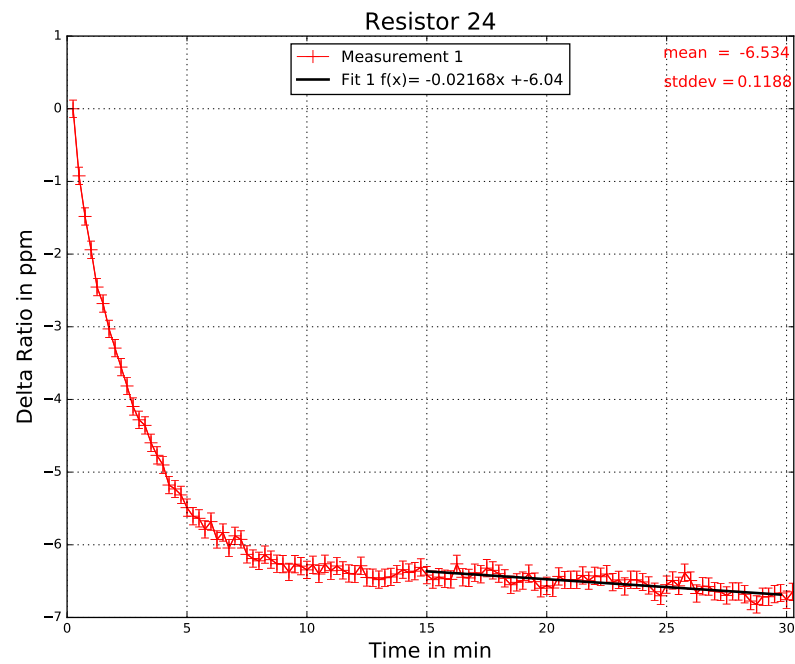


Abbildung 8.17: Aufwärmverhalten des Widerstands 24.

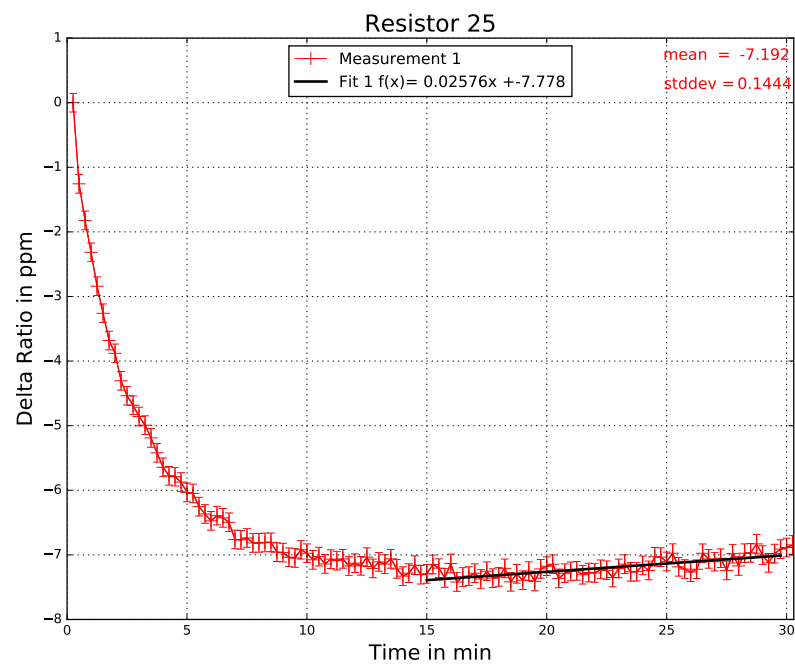


Abbildung 8.18: Aufwärmverhalten des Widerstands 25.

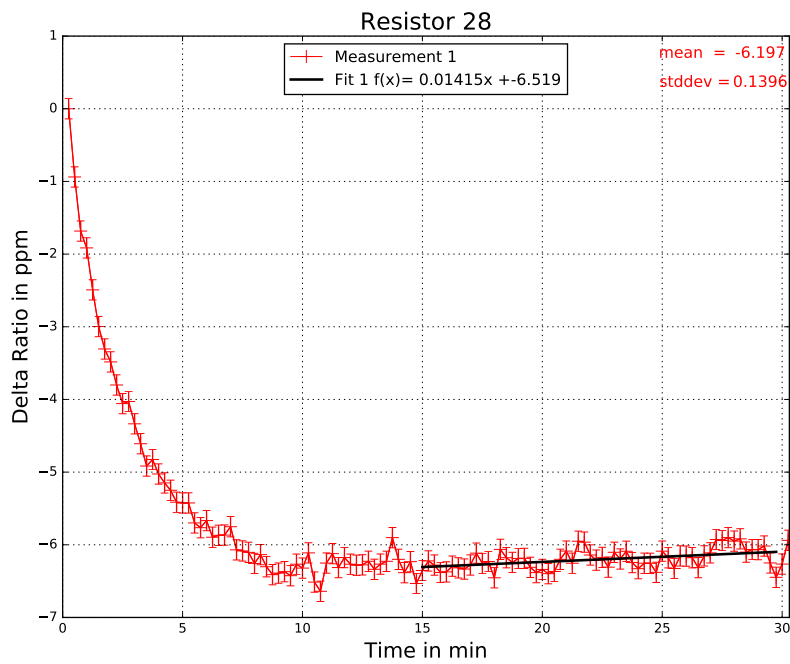


Abbildung 8.19: Aufwärmverhalten des Widerstands 28.

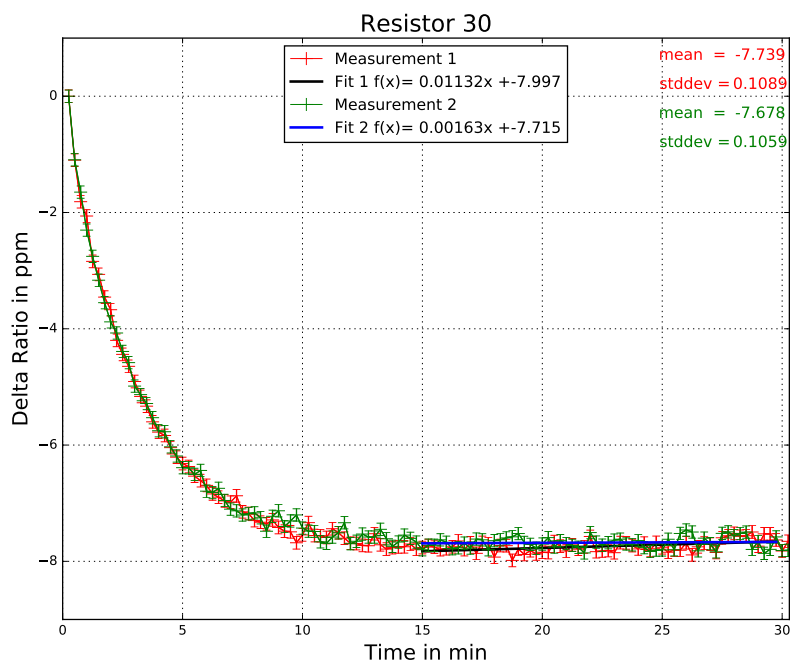


Abbildung 8.20: Aufwärmverhalten des Widerstands 30.

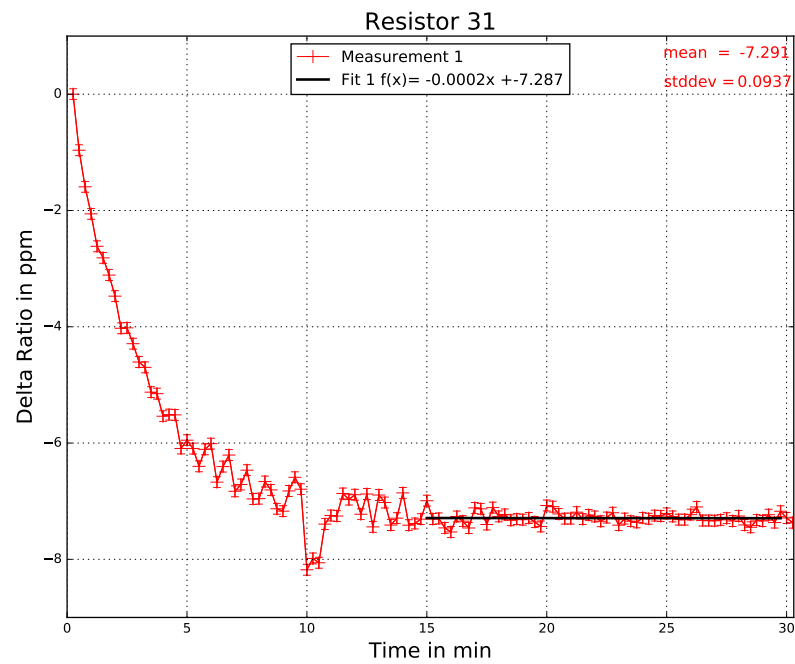


Abbildung 8.21: Aufwärmverhalten des Widerstands 31.

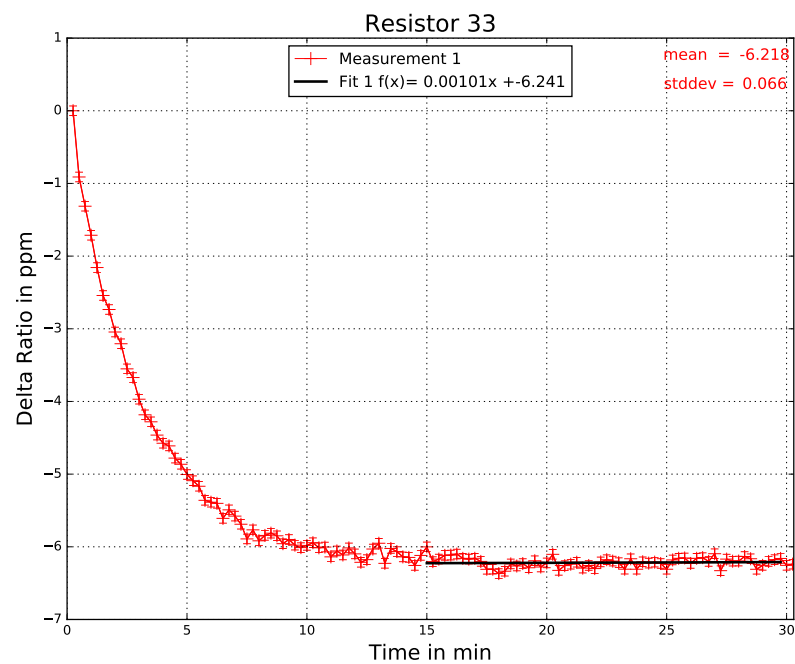


Abbildung 8.22: Aufwärmverhalten des Widerstands 33.

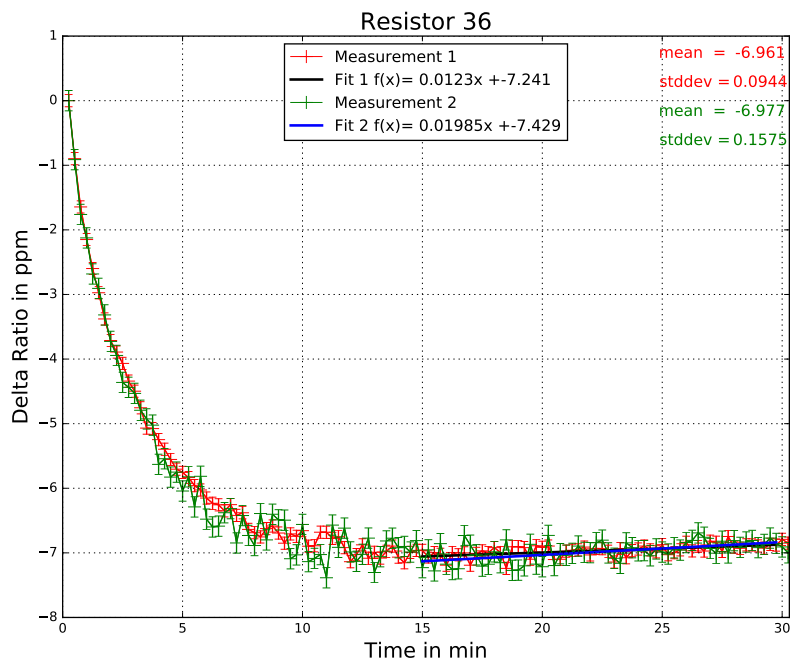


Abbildung 8.23: Aufwärmverhalten des Widerstands 36.

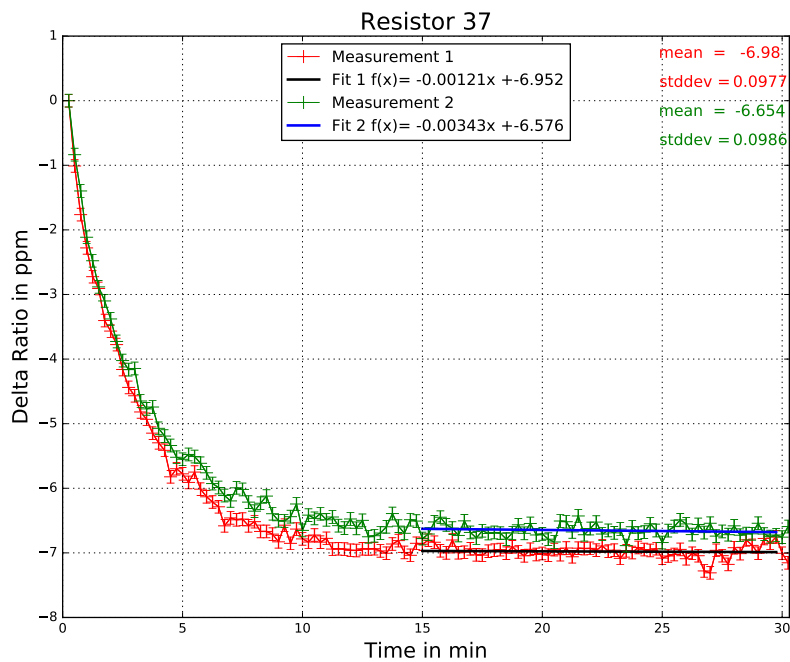


Abbildung 8.24: Aufwärmverhalten des Widerstands 37.

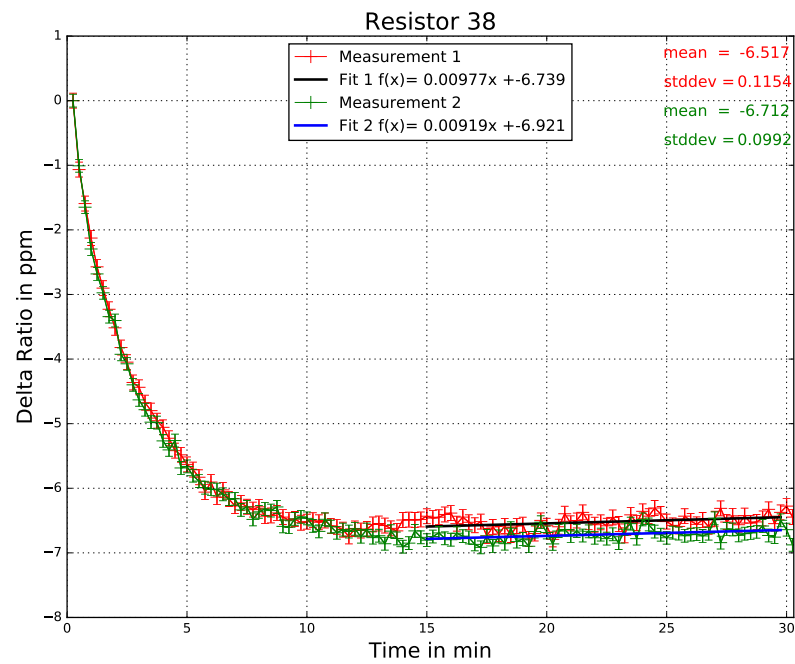


Abbildung 8.25: Aufwärmverhalten des Widerstands 38.

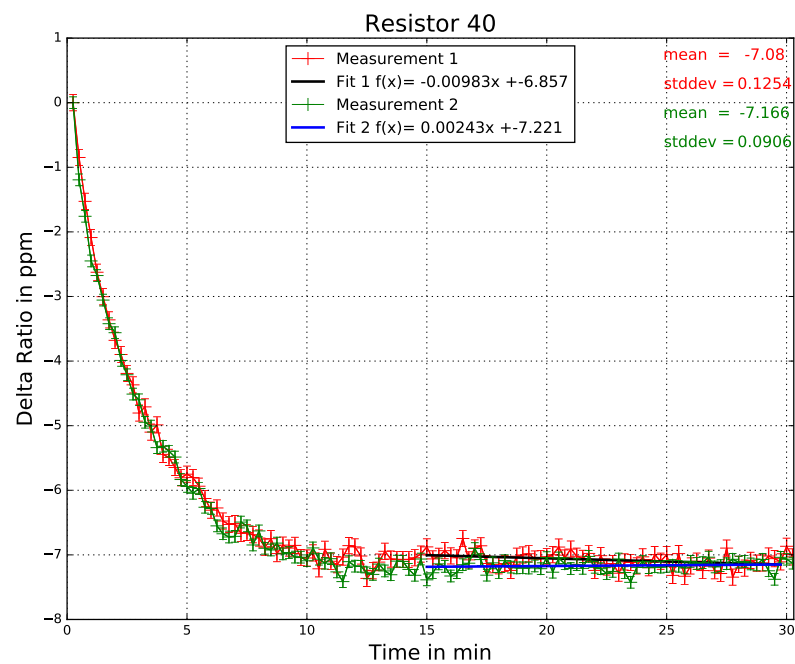


Abbildung 8.26: Aufwärmverhalten des Widerstands 40.

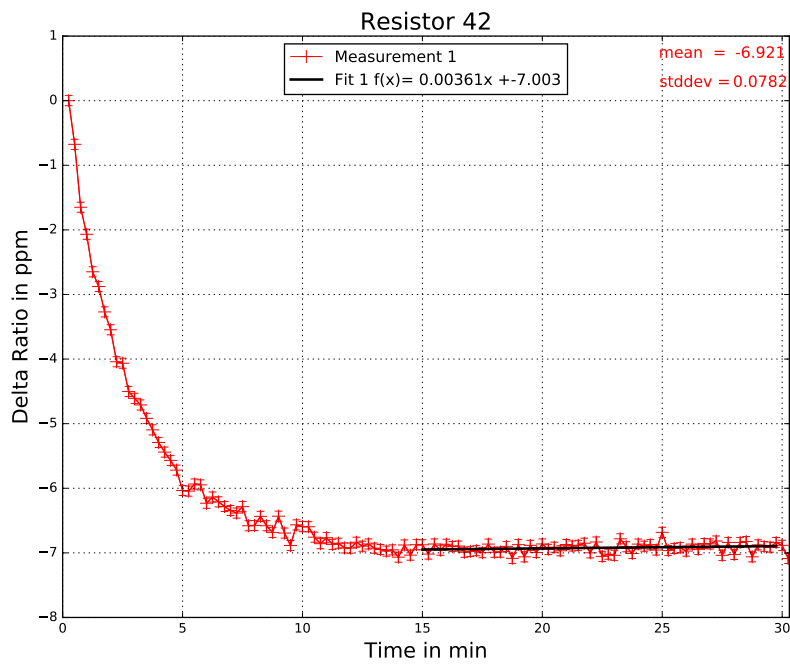


Abbildung 8.27: Aufwärmverhalten des Widerstands 42.

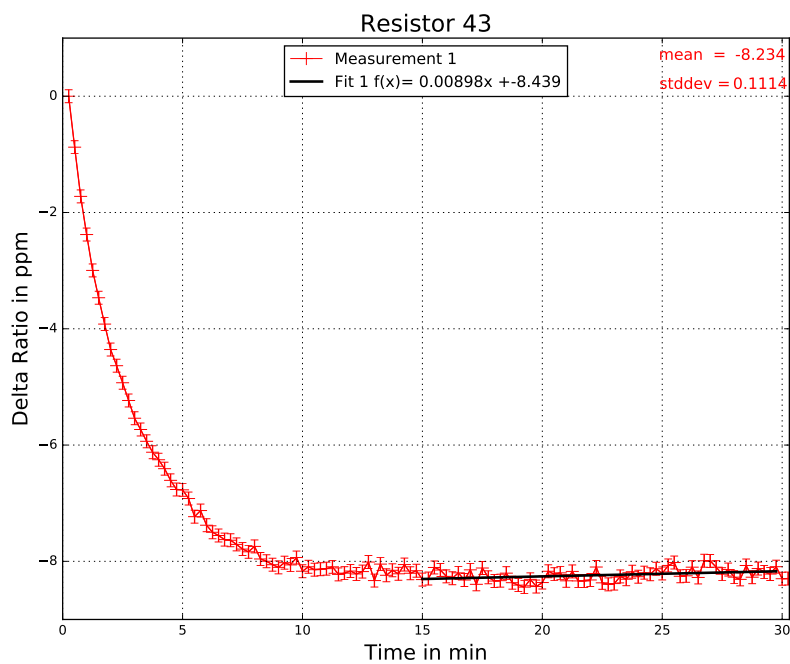


Abbildung 8.28: Aufwärmverhalten des Widerstands 43.

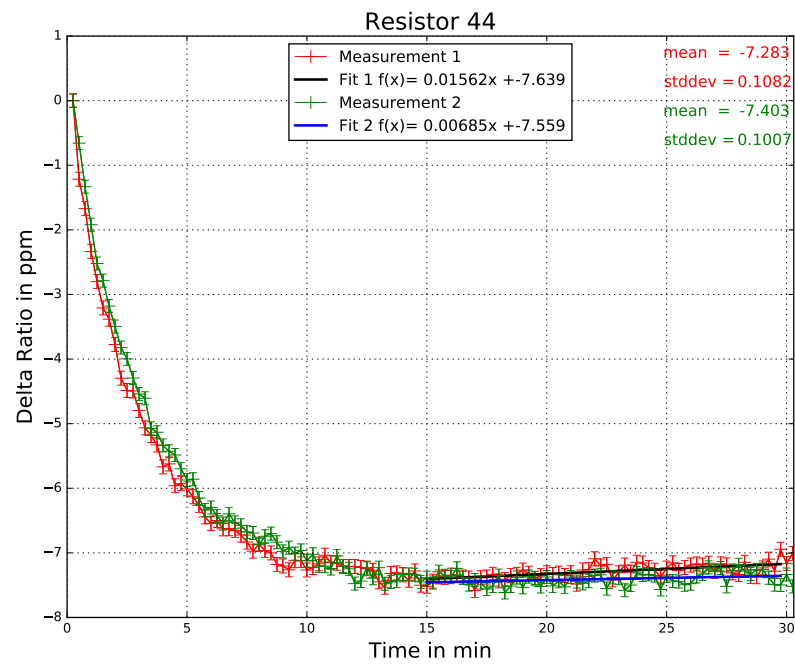


Abbildung 8.29: Aufwärmverhalten des Widerstands 44.

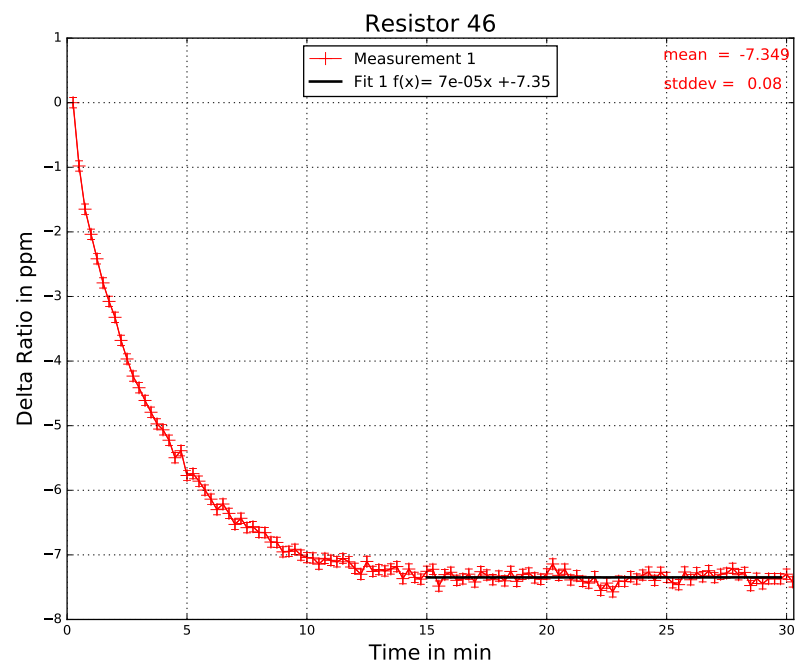


Abbildung 8.30: Aufwärmverhalten des Widerstands 46.

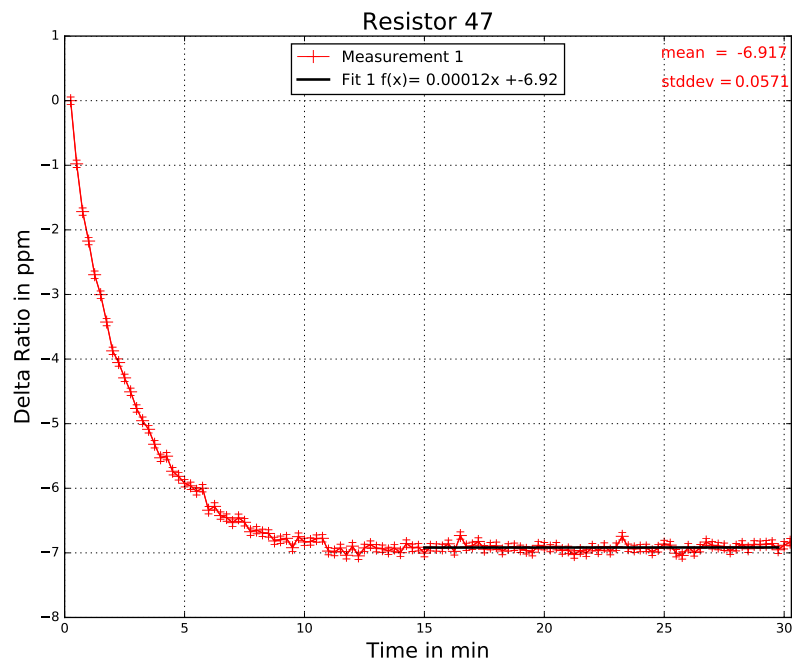


Abbildung 8.31: Aufwärmverhalten des Widerstands 47.

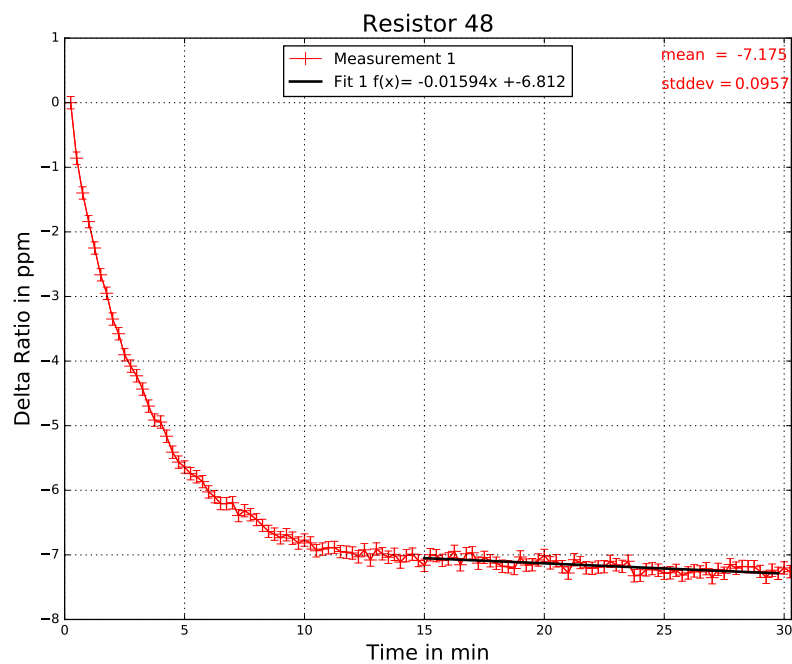


Abbildung 8.32: Aufwärmverhalten des Widerstands 48.

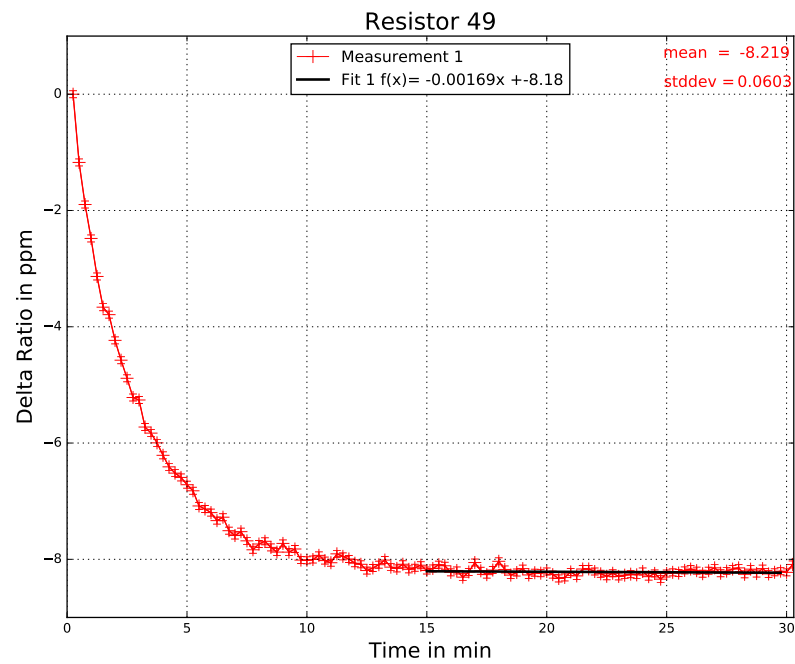


Abbildung 8.33: Aufwärmverhalten des Widerstands 49.

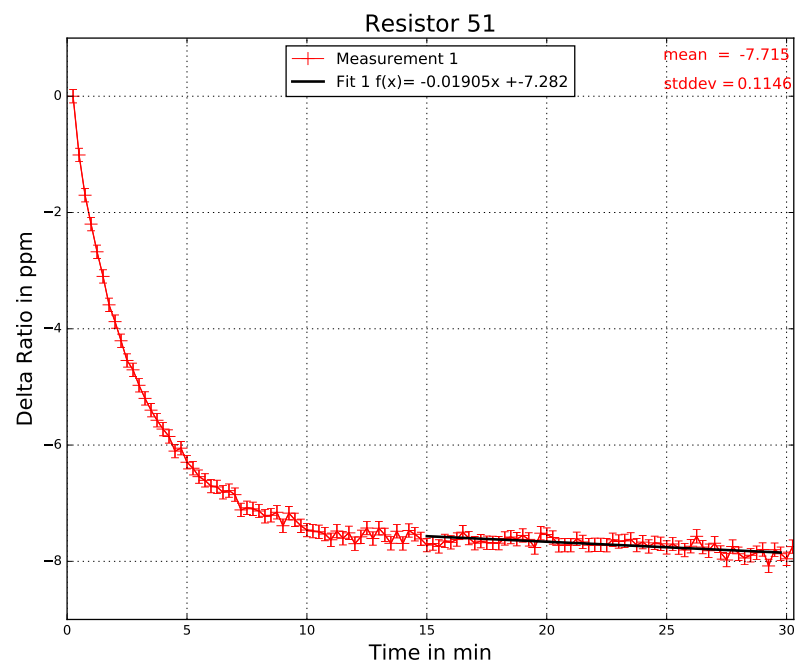


Abbildung 8.34: Aufwärmverhalten des Widerstands 51.

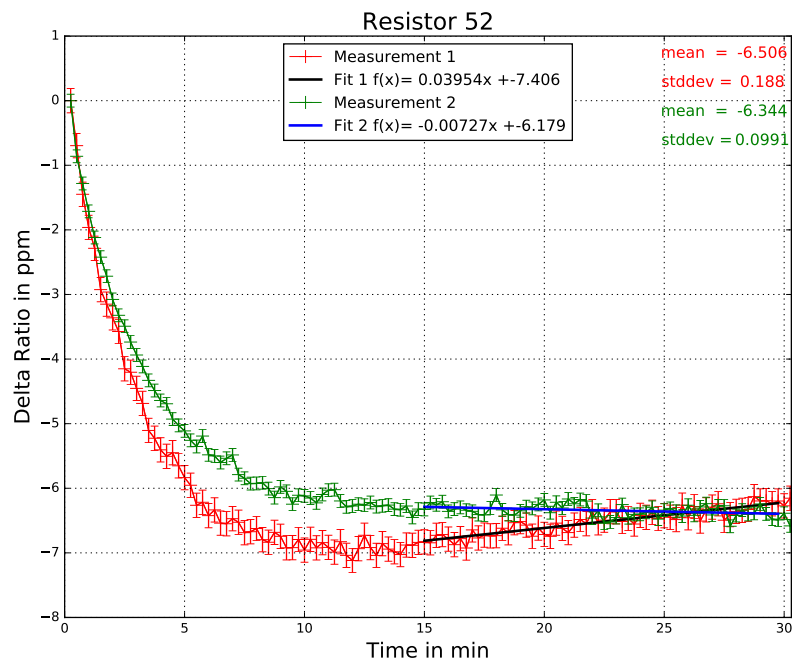


Abbildung 8.35: Aufwärmverhalten des Widerstands 52.

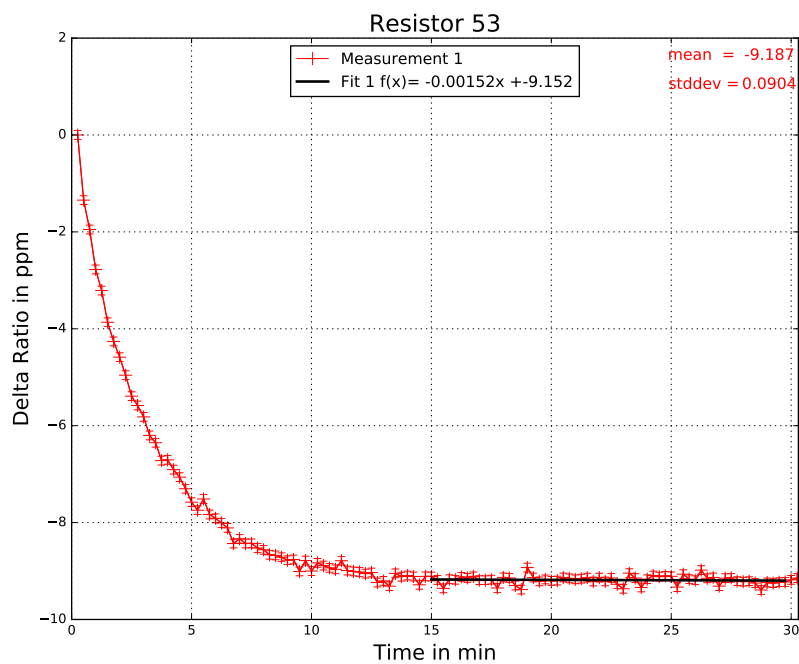


Abbildung 8.36: Aufwärmverhalten des Widerstands 53.

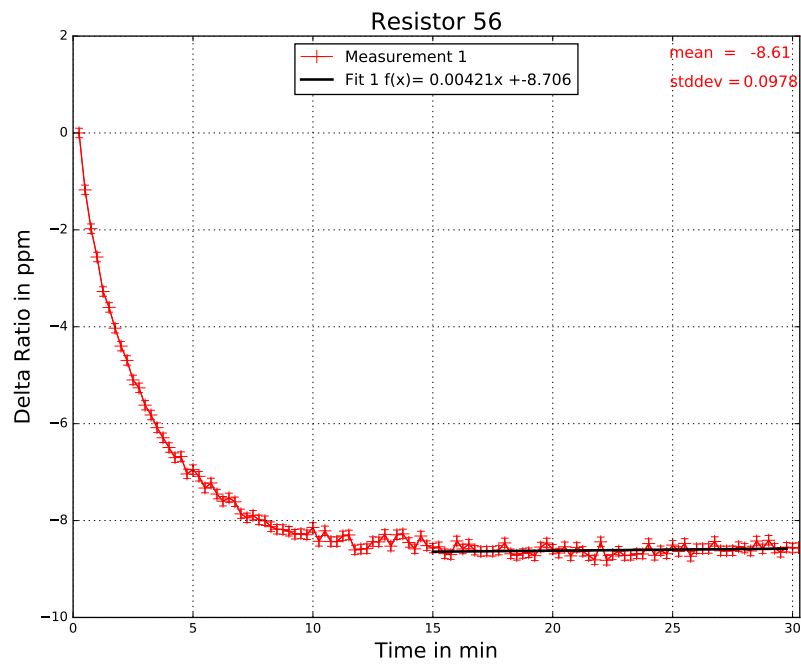


Abbildung 8.37: Aufwärmverhalten des Widerstands 56.

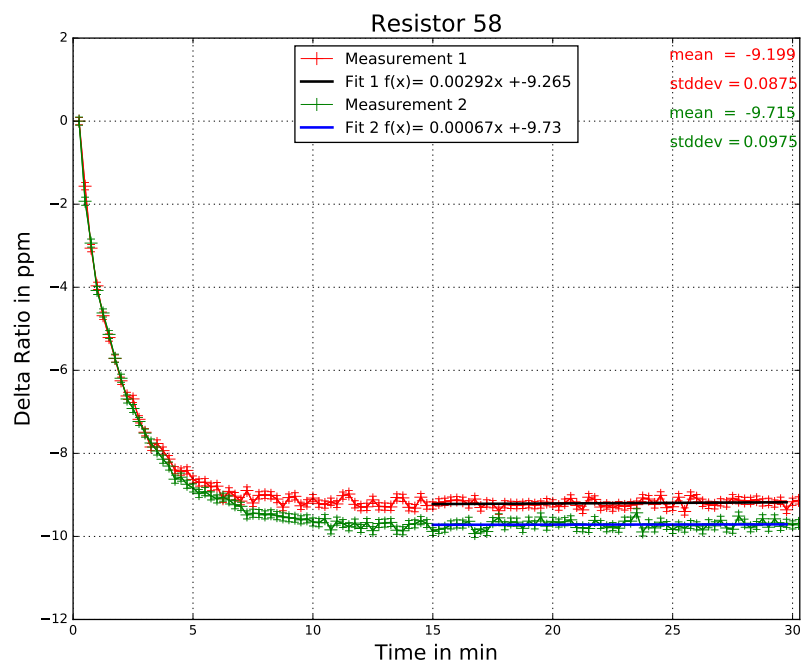


Abbildung 8.38: Aufwärmverhalten des Widerstands 58.

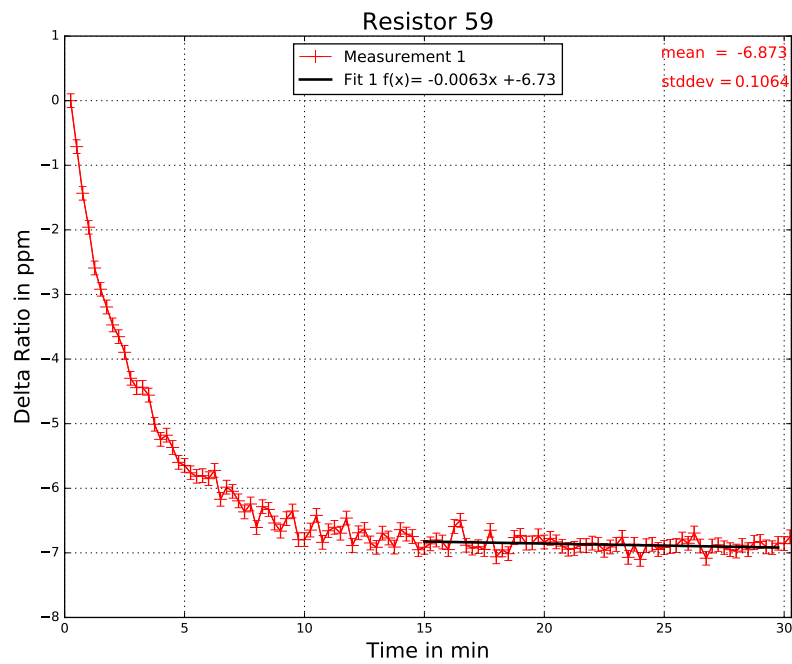


Abbildung 8.39: Aufwärmverhalten des Widerstands 59.

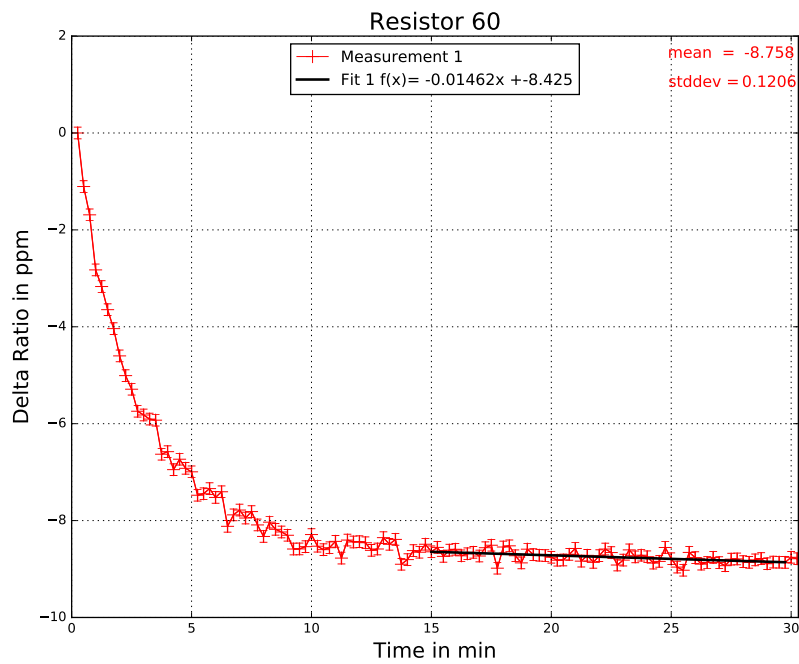


Abbildung 8.40: Aufwärmverhalten des Widerstands 60.

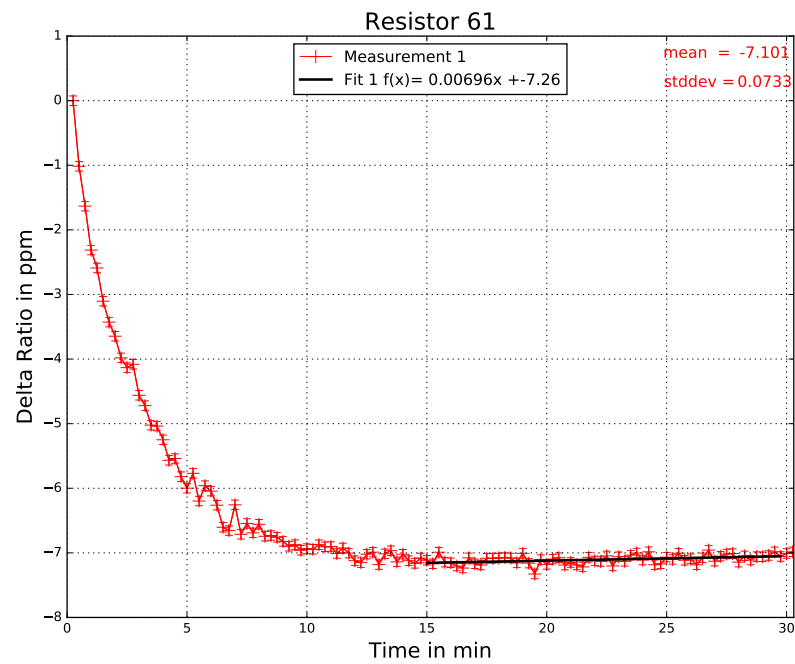


Abbildung 8.41: Aufwärmverhalten des Widerstands 61.

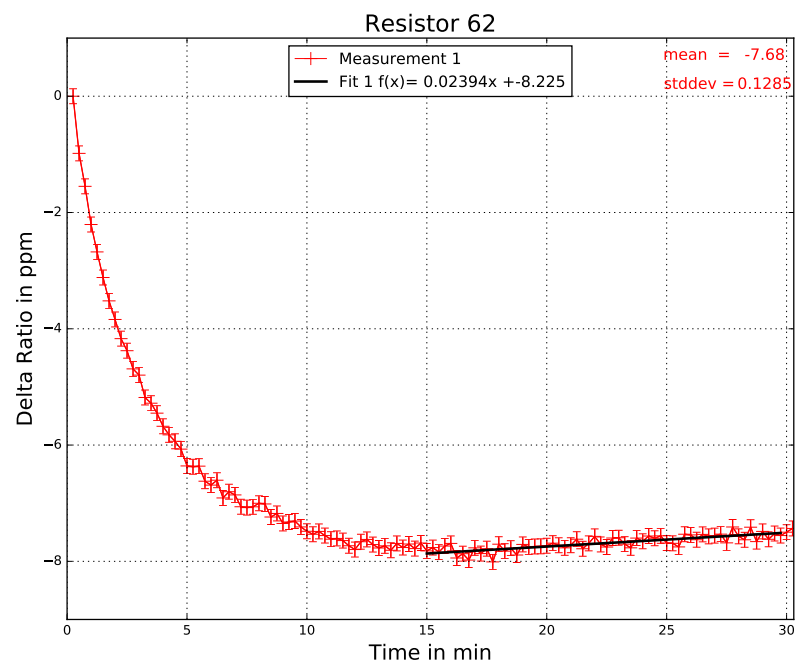


Abbildung 8.42: Aufwärmverhalten des Widerstands 62.

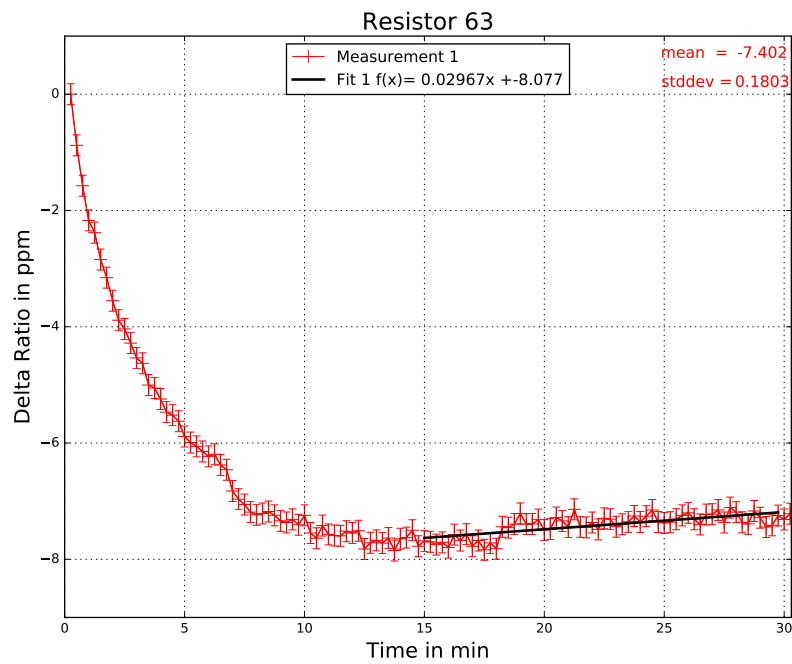


Abbildung 8.43: Aufwärmverhalten des Widerstands 63.

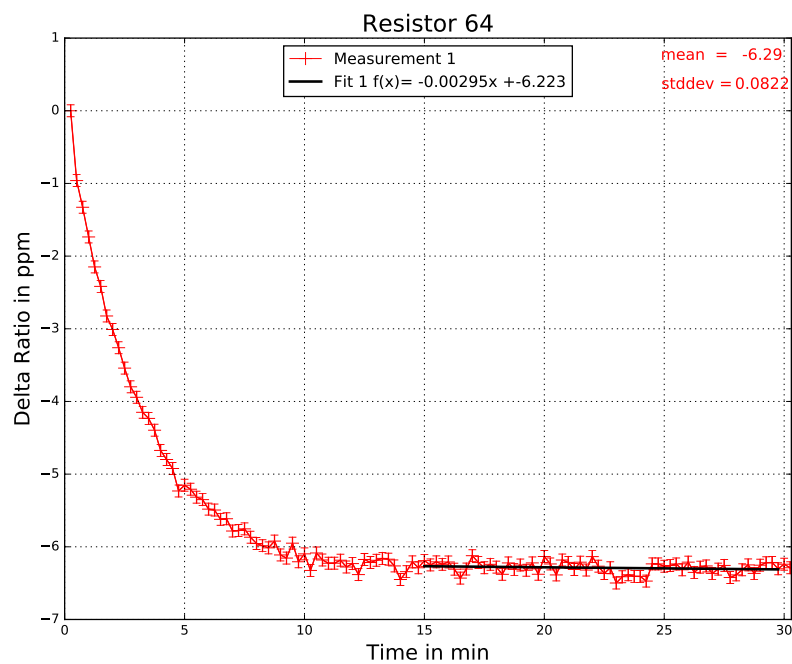


Abbildung 8.44: Aufwärmverhalten des Widerstands 64.

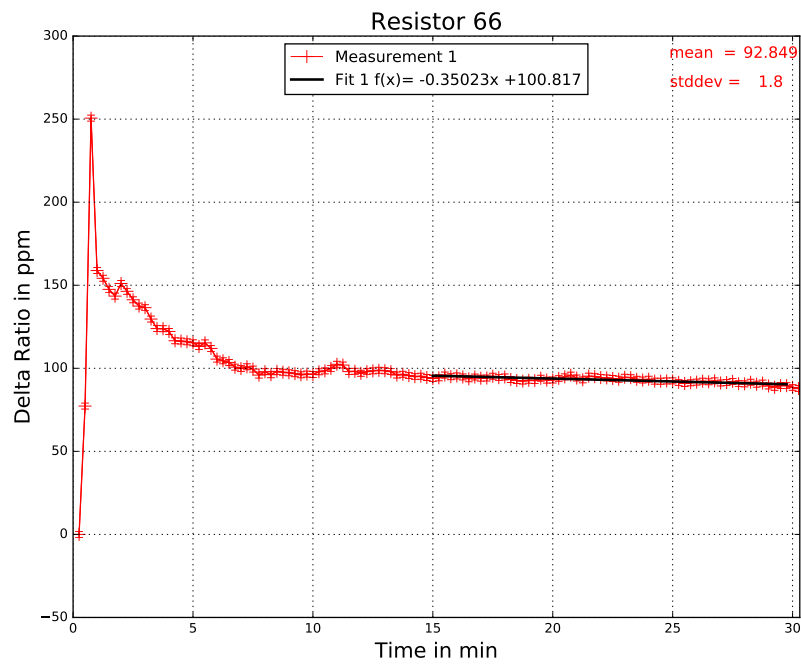


Abbildung 8.45: Aufwärmverhalten des Widerstands 66.

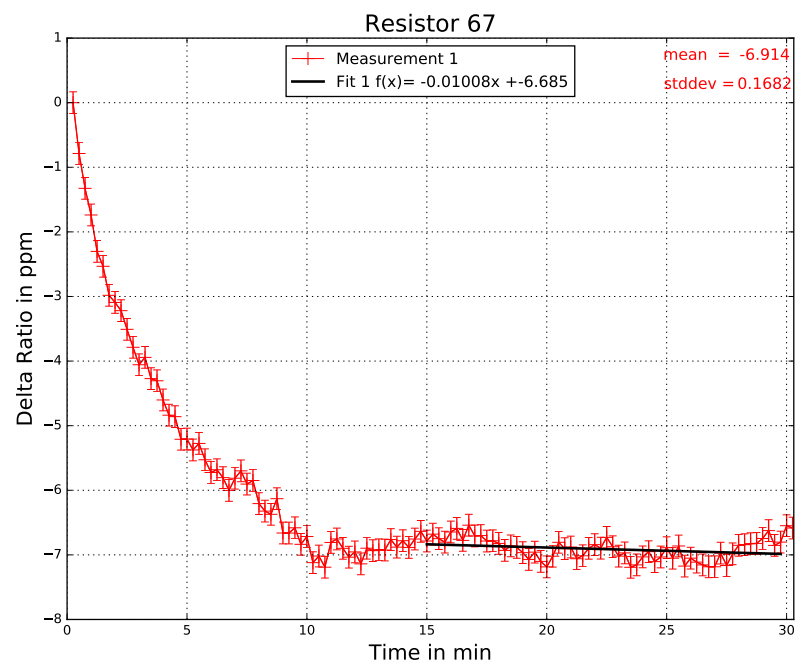


Abbildung 8.46: Aufwärmverhalten des Widerstands 67.

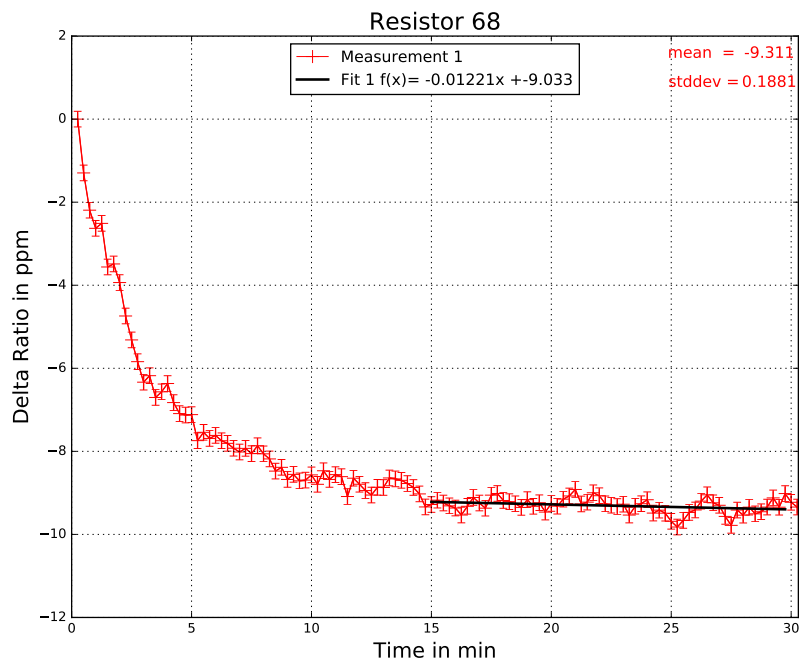


Abbildung 8.47: Aufwärmverhalten des Widerstands 68.

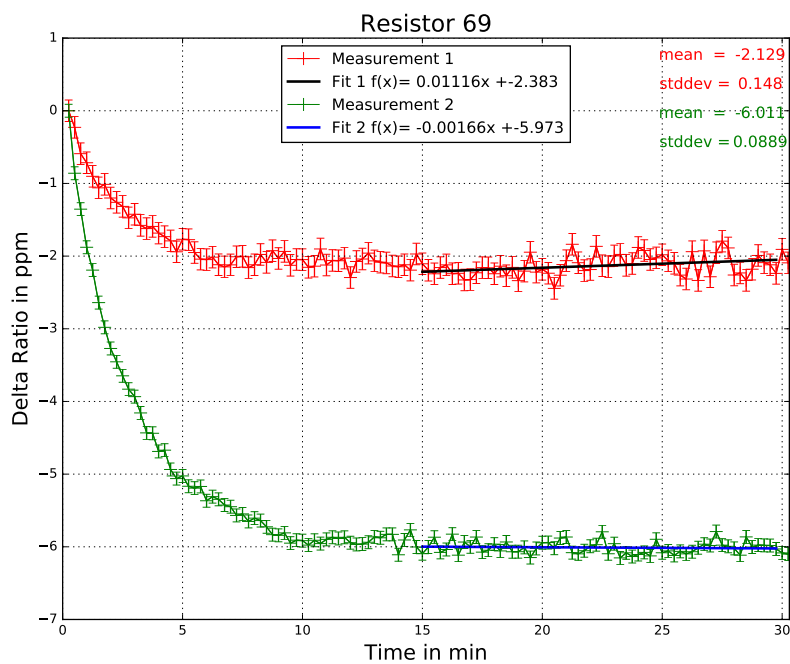


Abbildung 8.48: Aufwärmverhalten des Widerstands 69.

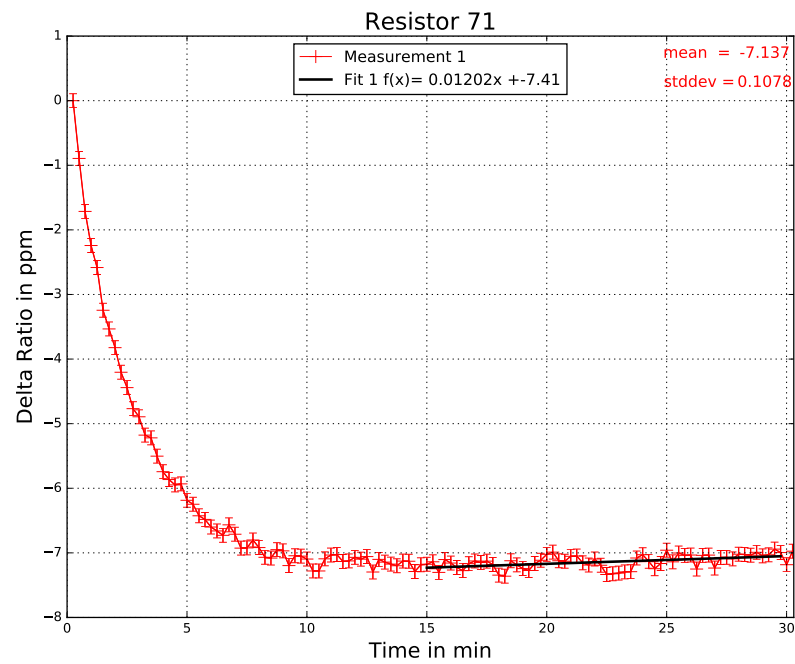


Abbildung 8.49: Aufwärmverhalten des Widerstands 71.

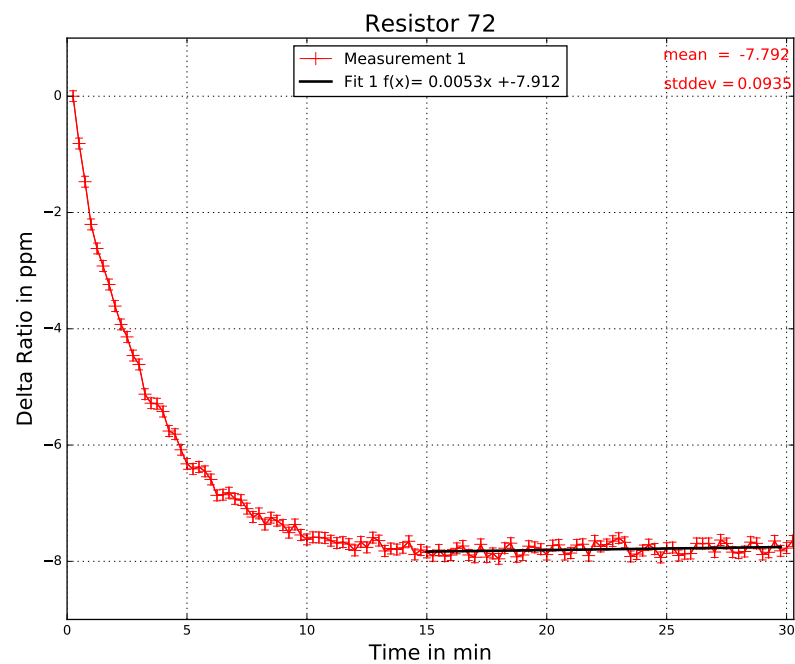


Abbildung 8.50: Aufwärmverhalten des Widerstands 72.

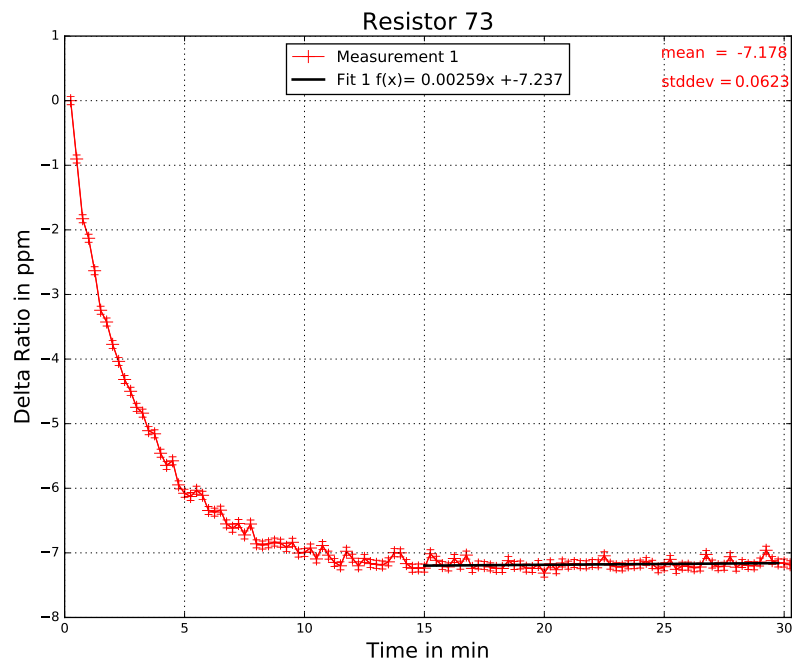


Abbildung 8.51: Aufwärmverhalten des Widerstands 73.

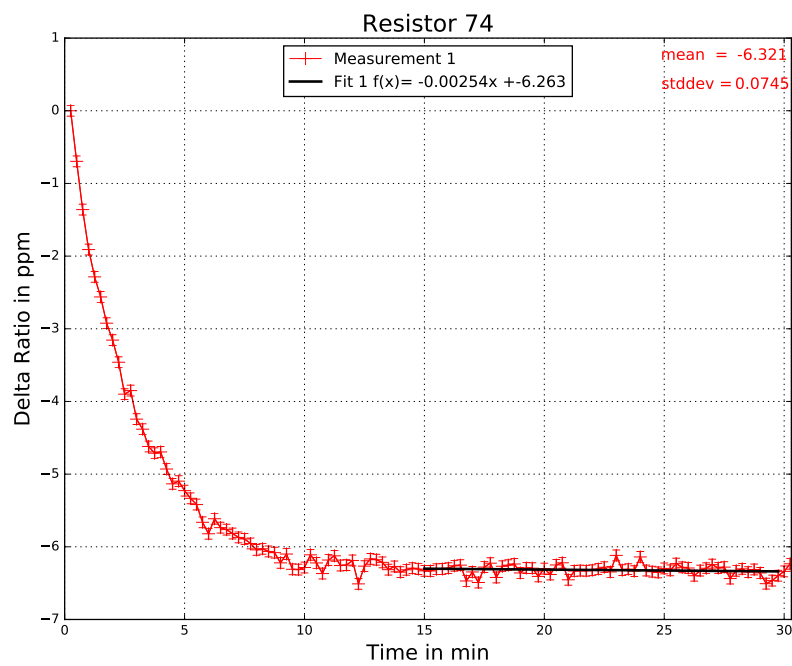


Abbildung 8.52: Aufwärmverhalten des Widerstands 74.

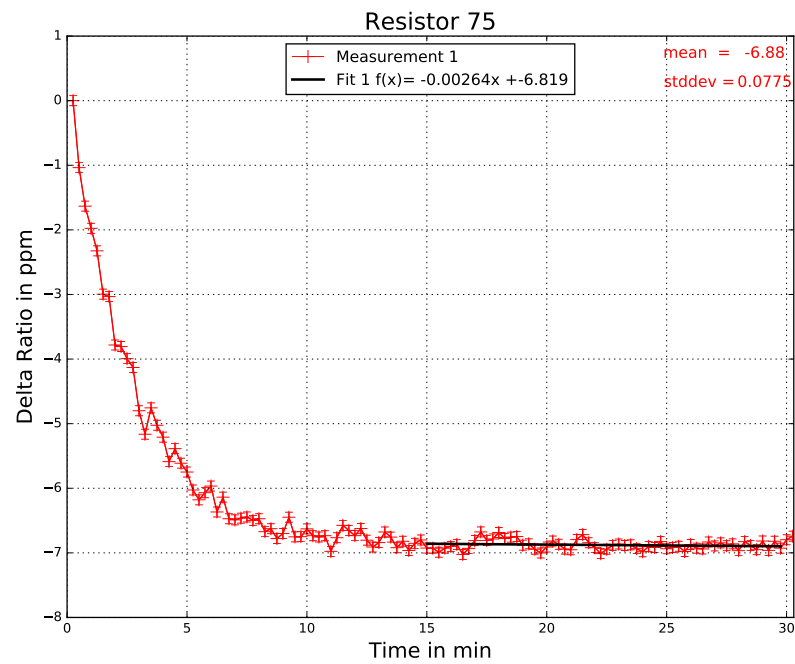


Abbildung 8.53: Aufwärmverhalten des Widerstands 75.

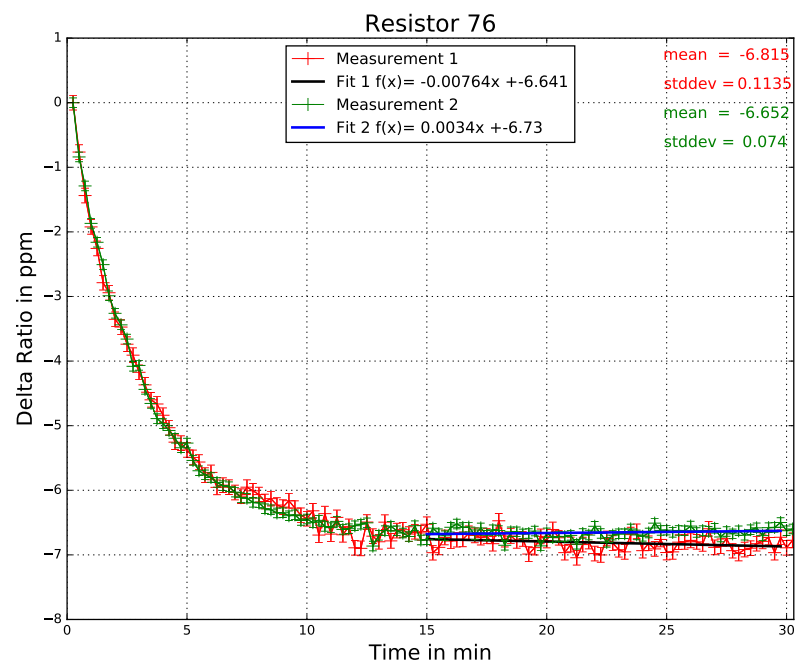


Abbildung 8.54: Aufwärmverhalten des Widerstands 76.

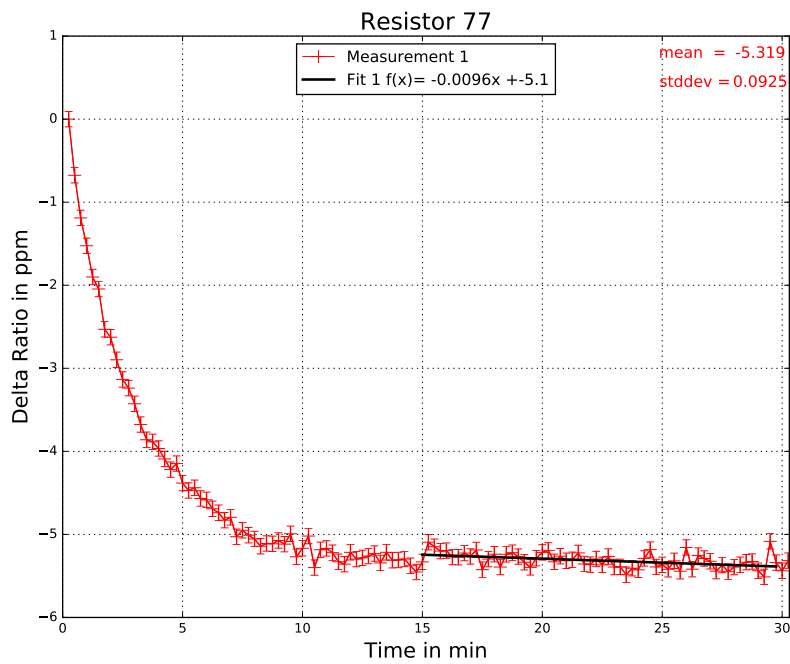


Abbildung 8.55: Aufwärmverhalten des Widerstands 77.

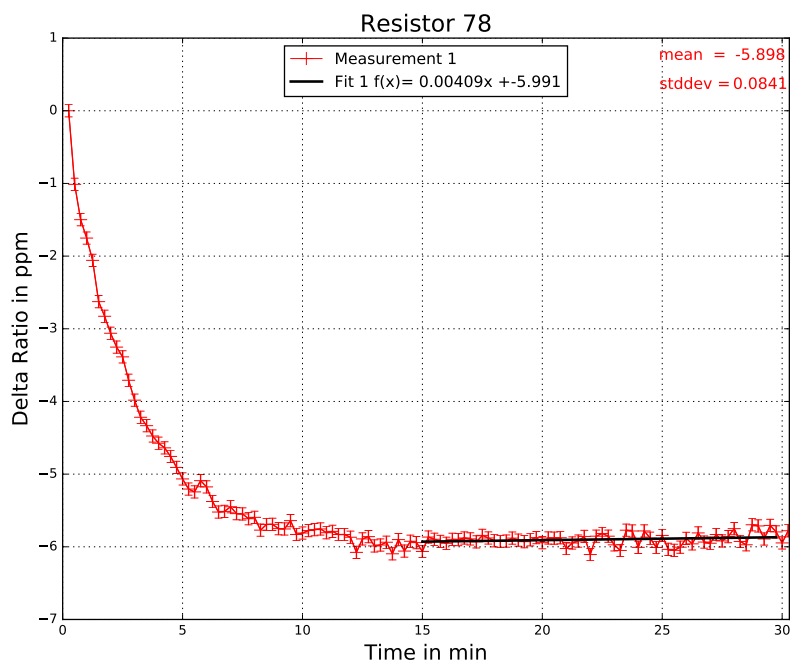


Abbildung 8.56: Aufwärmverhalten des Widerstands 78.

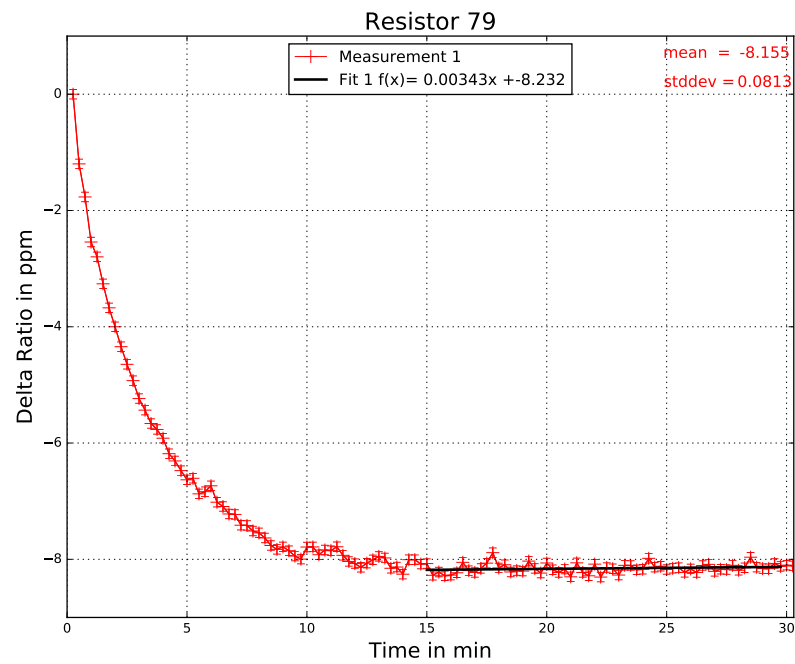


Abbildung 8.57: Aufwärmverhalten des Widerstands 79.

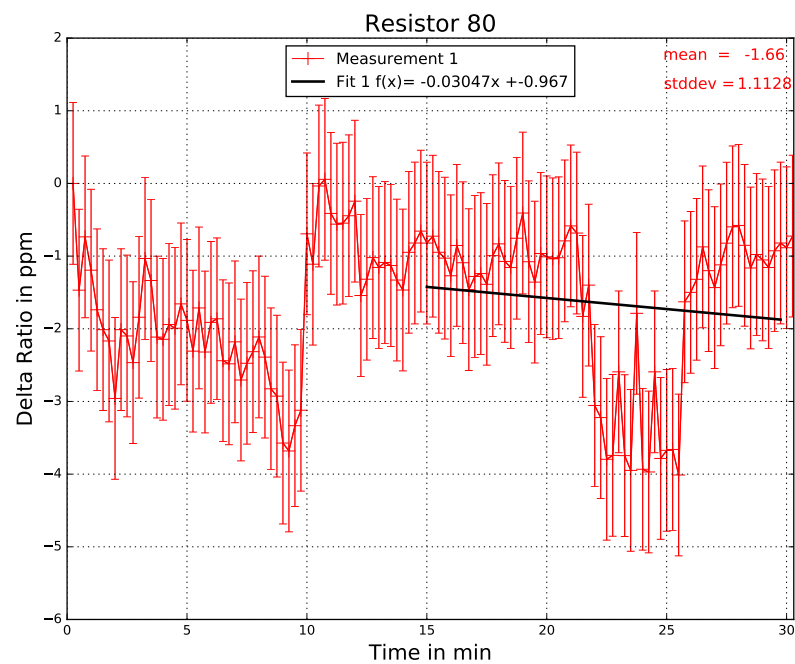


Abbildung 8.58: Aufwärmverhalten des Widerstands 80.

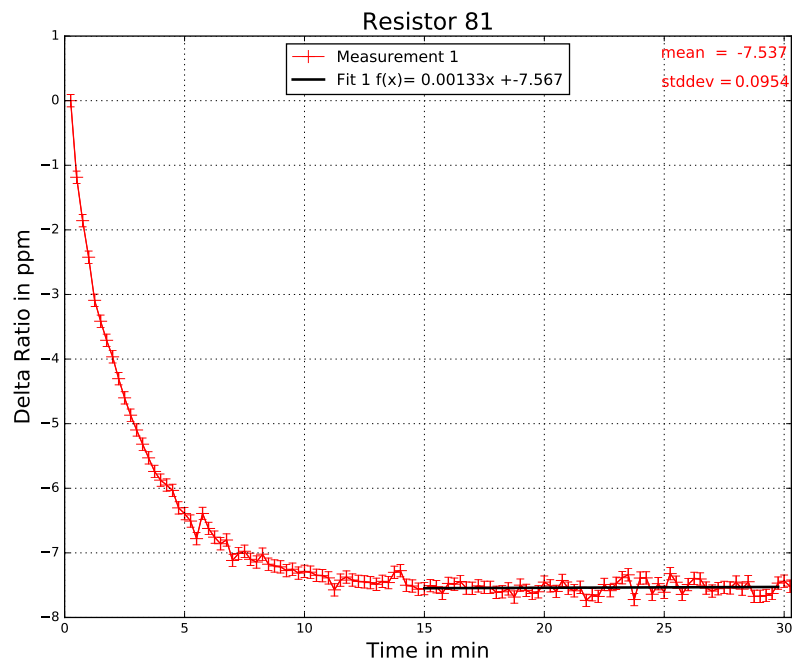


Abbildung 8.59: Aufwärmverhalten des Widerstands 81.

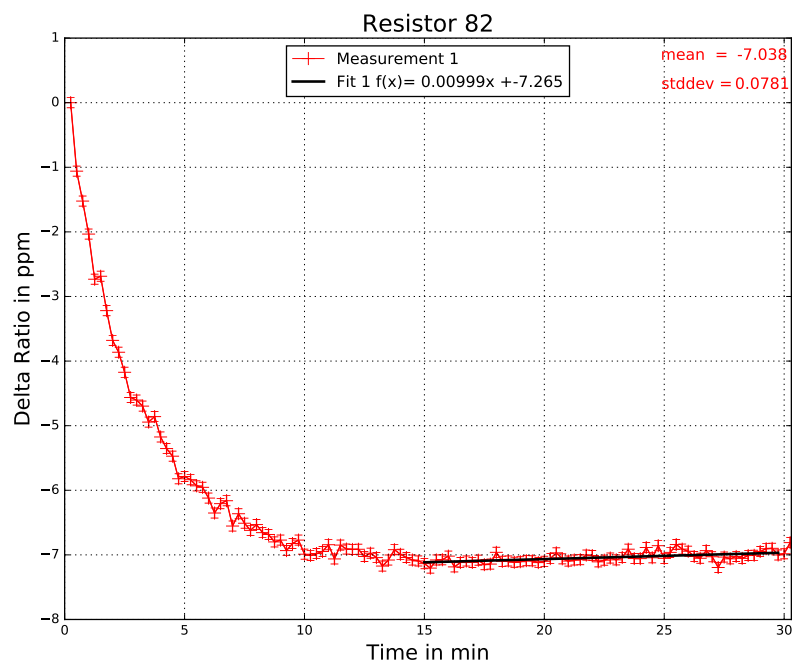


Abbildung 8.60: Aufwärmverhalten des Widerstands 82.

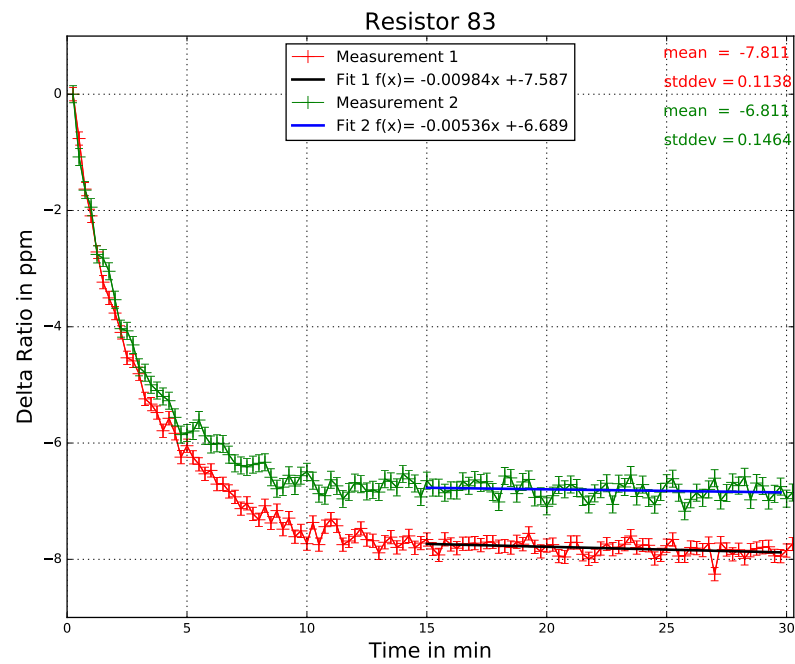


Abbildung 8.61: Aufwärmverhalten des Widerstands 83.

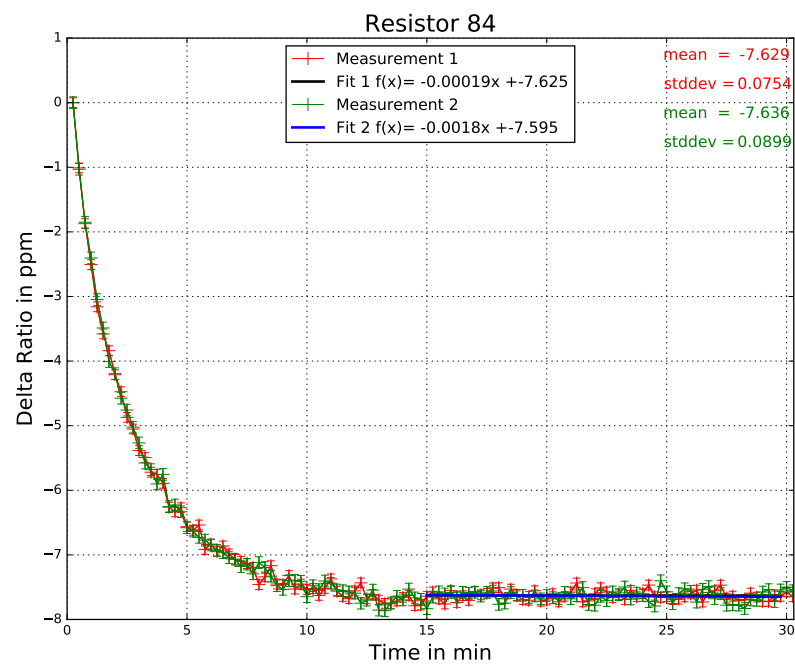


Abbildung 8.62: Aufwärmverhalten des Widerstands 84.

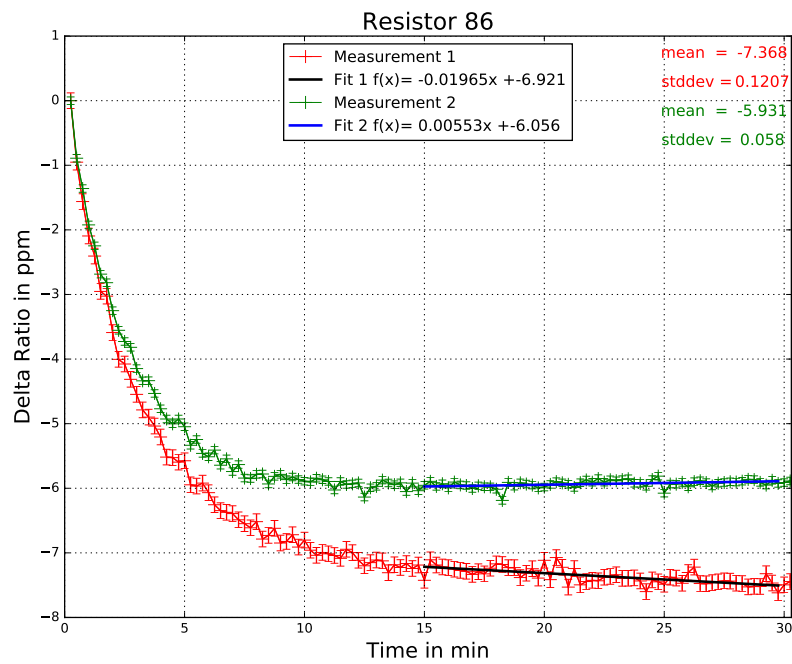


Abbildung 8.63: Aufwärmverhalten des Widerstands 86.

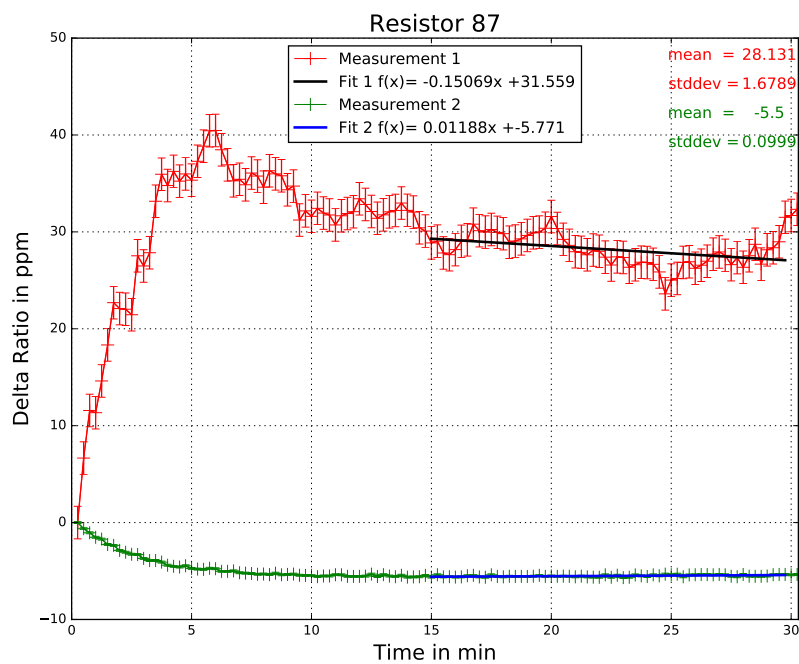


Abbildung 8.64: Aufwärmverhalten des Widerstands 87.

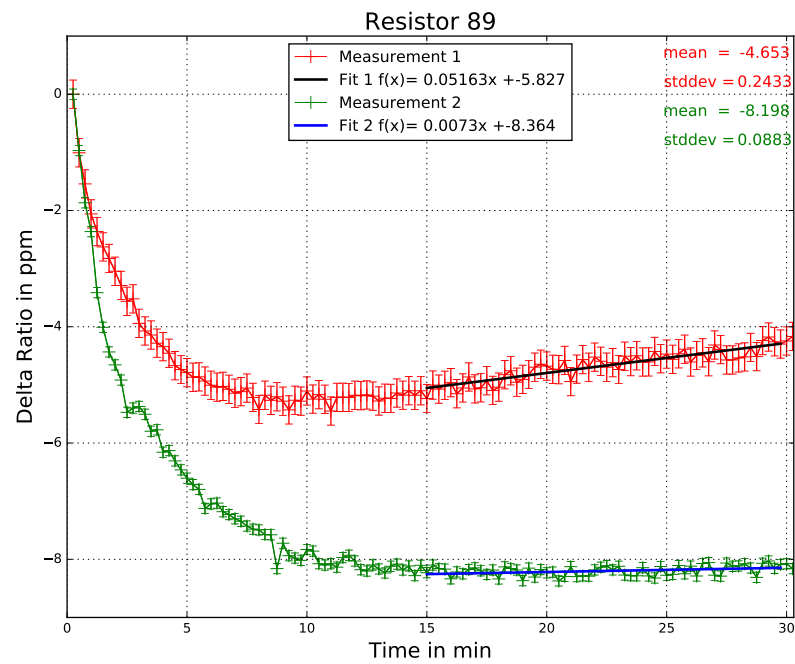


Abbildung 8.65: Aufwärmverhalten des Widerstands 89.

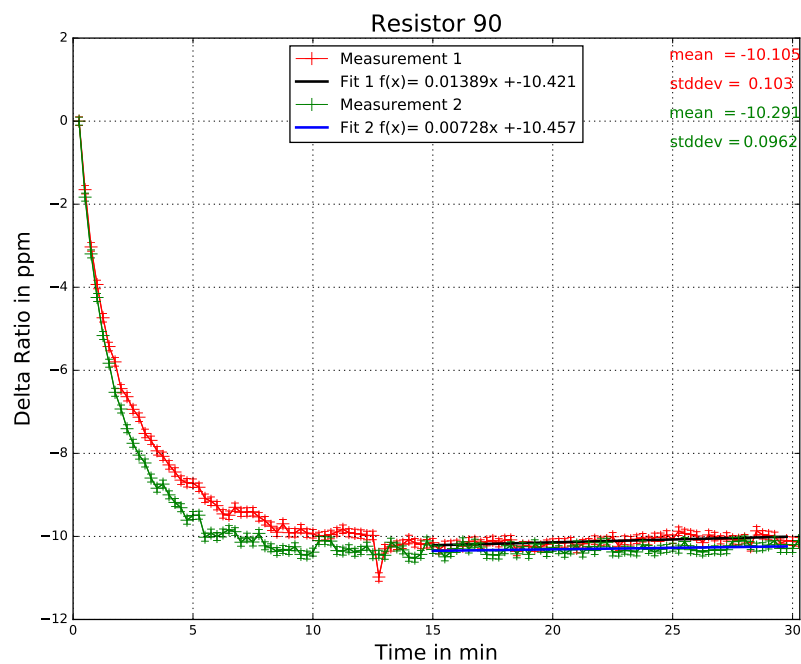


Abbildung 8.66: Aufwärmverhalten des Widerstands 90.

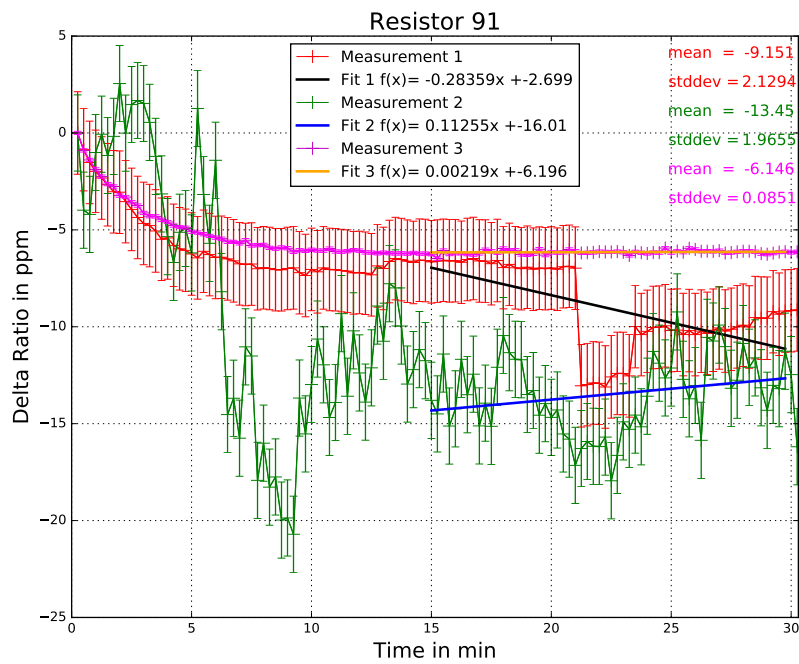


Abbildung 8.67: Aufwärmverhalten des Widerstands 91.

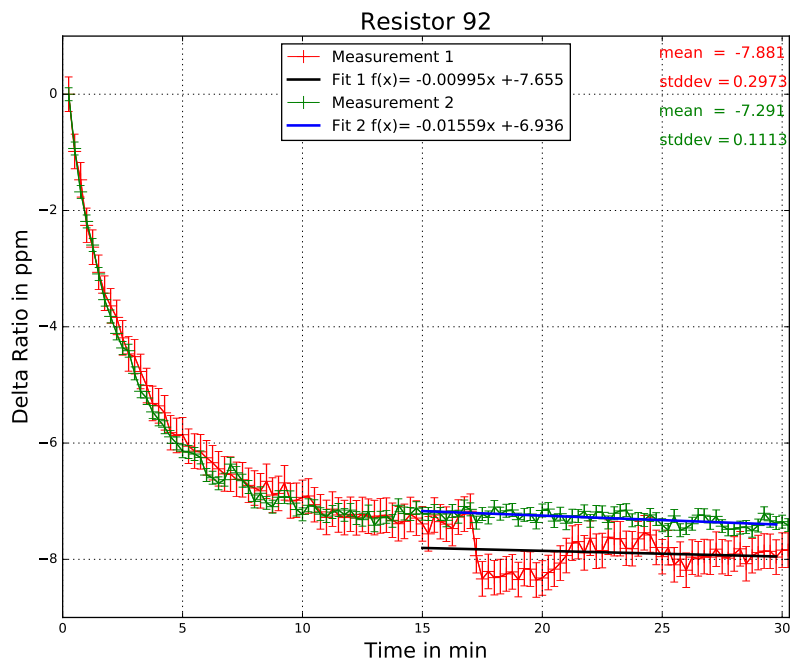


Abbildung 8.68: Aufwärmverhalten des Widerstands 92.

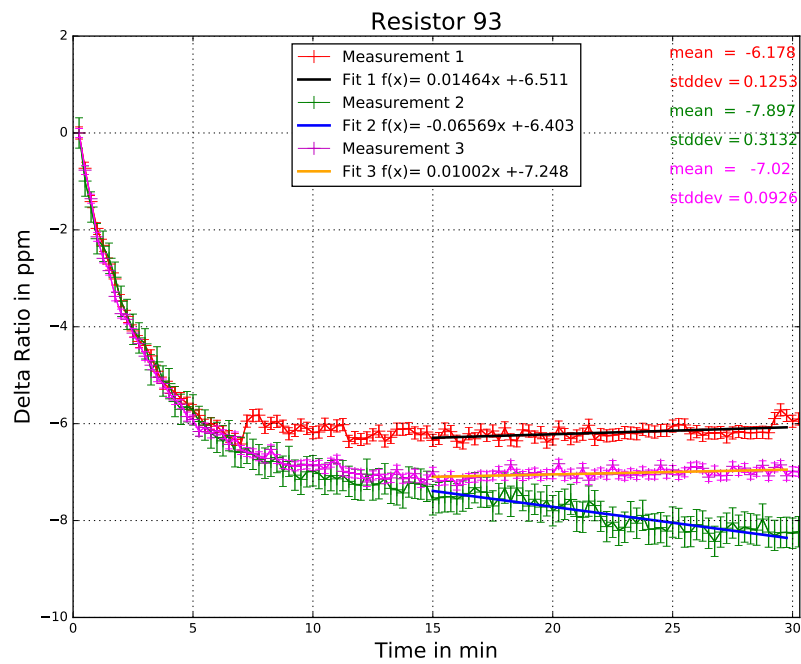


Abbildung 8.69: Aufwärmverhalten des Widerstands 93.

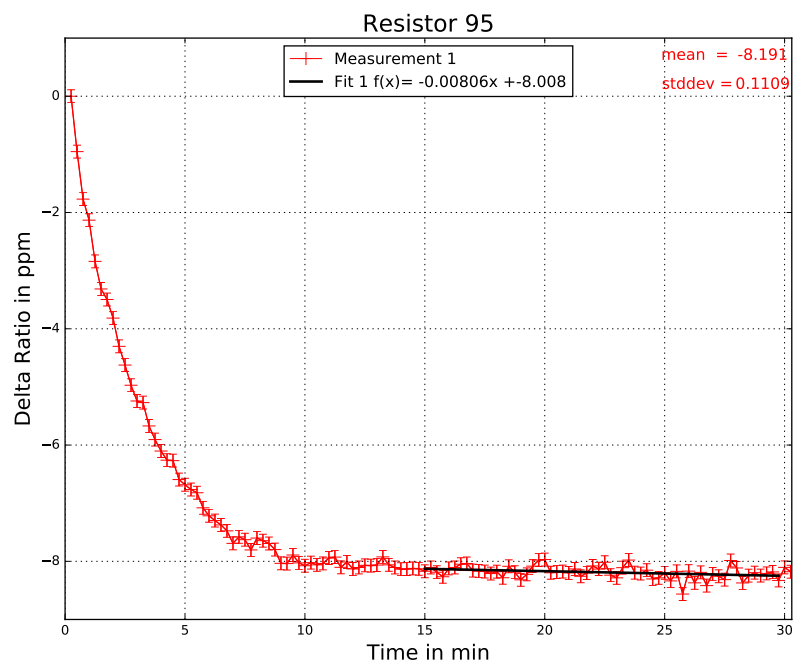


Abbildung 8.70: Aufwärmverhalten des Widerstands 95.

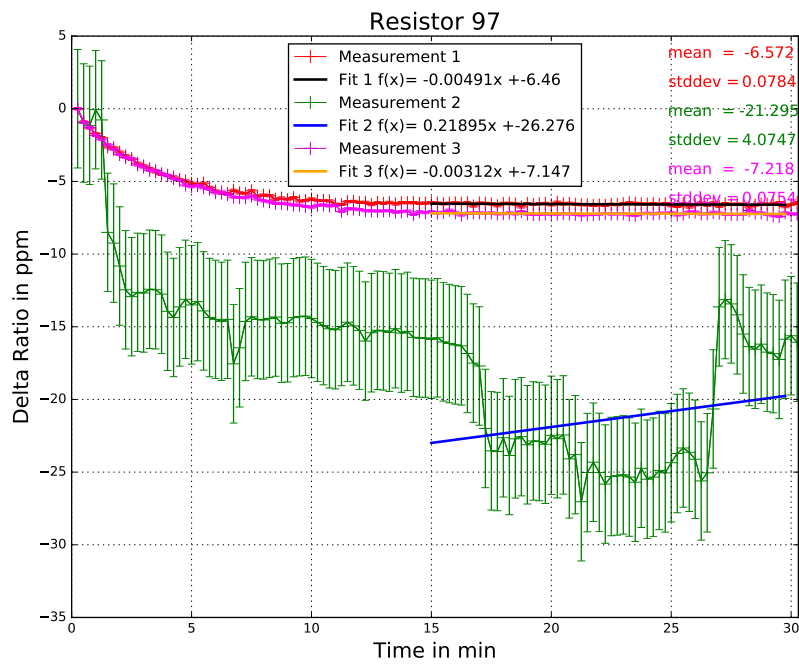


Abbildung 8.71: Aufwärmverhalten des Widerstands 97.

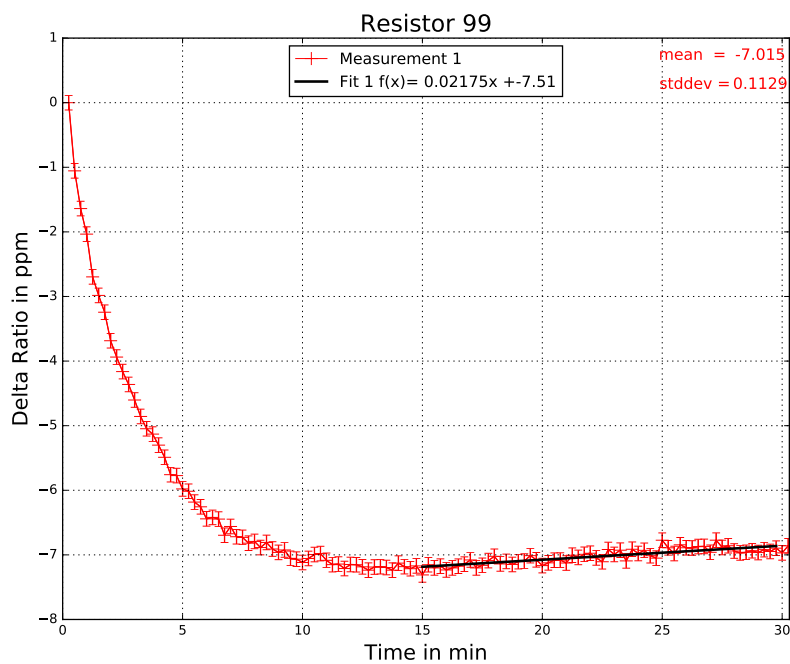


Abbildung 8.72: Aufwärmverhalten des Widerstands 99.

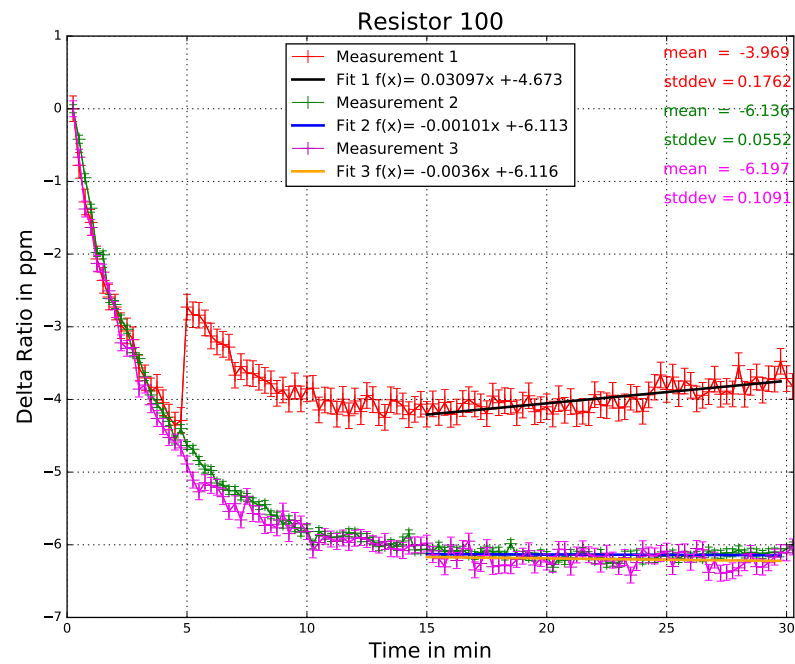


Abbildung 8.73: Aufwärmverhalten des Widerstands 100.

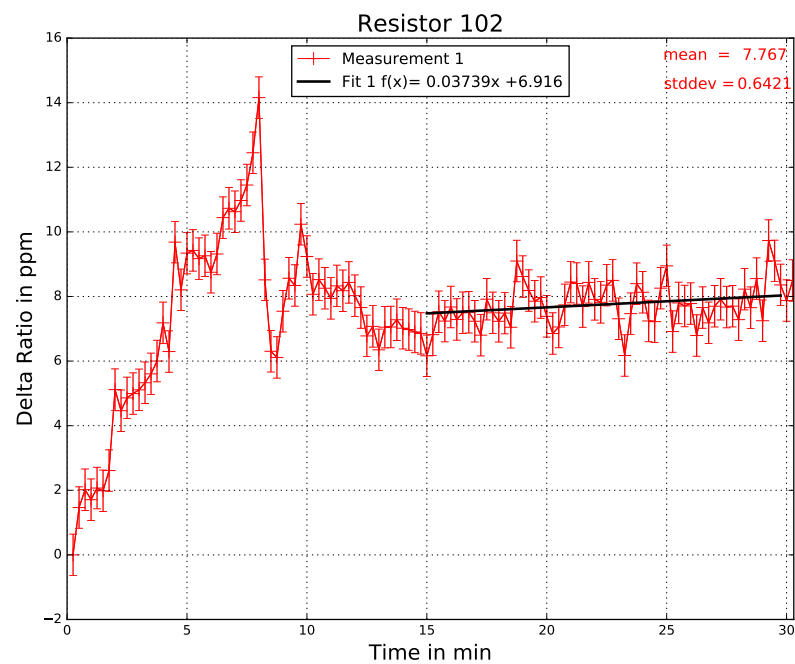


Abbildung 8.74: Aufwärmverhalten des Widerstands 102.

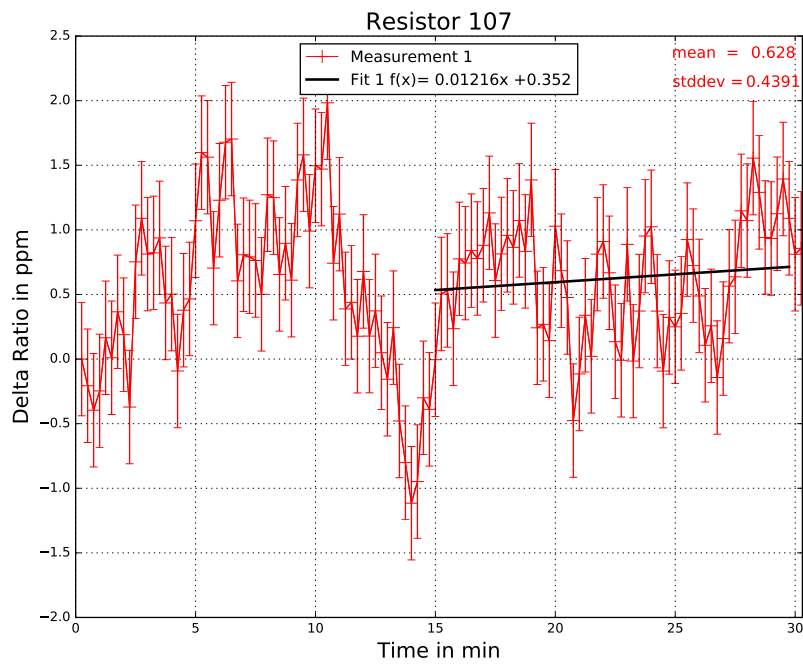


Abbildung 8.75: Aufwärmverhalten des Widerstands 107.

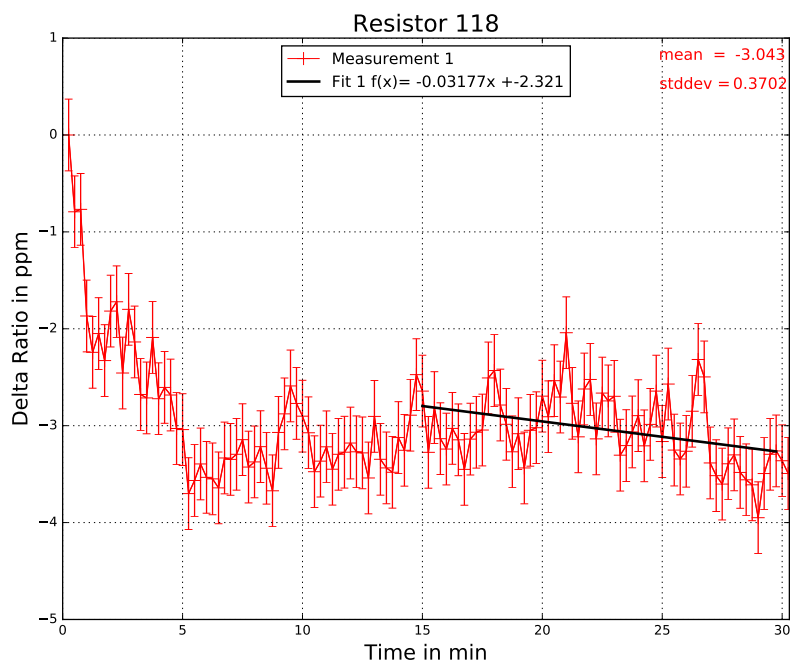


Abbildung 8.76: Aufwärmverhalten des Widerstands 118.

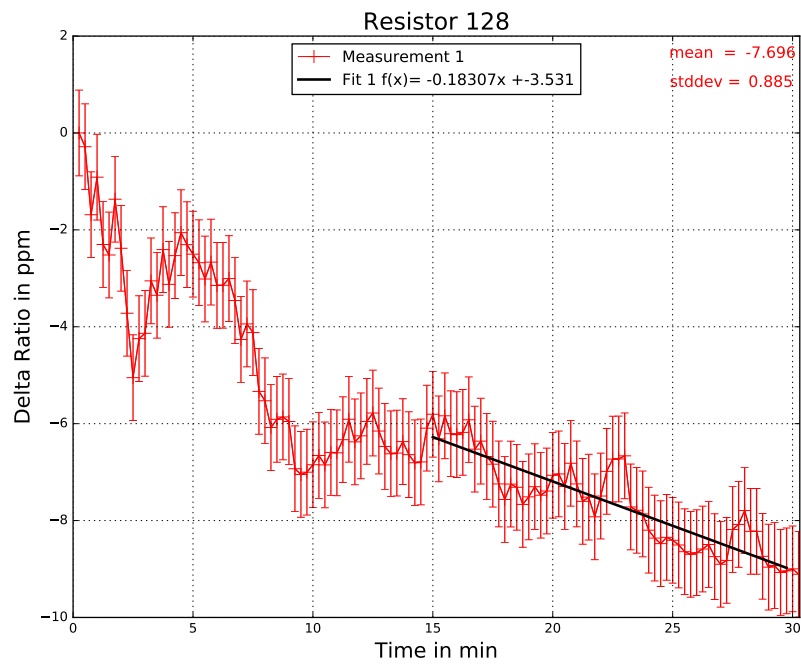


Abbildung 8.77: Aufwärmverhalten des Widerstands 128.

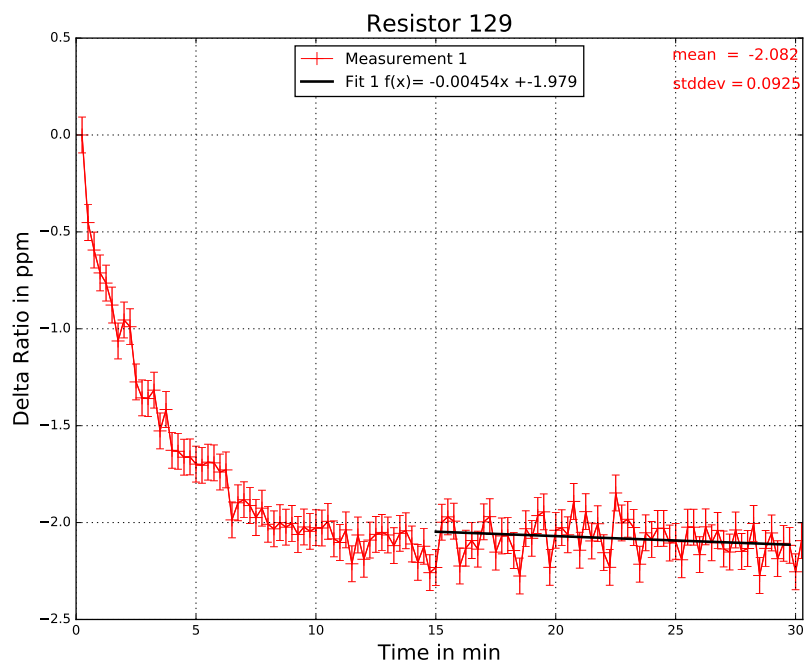


Abbildung 8.78: Aufwärmverhalten des Widerstands 129.

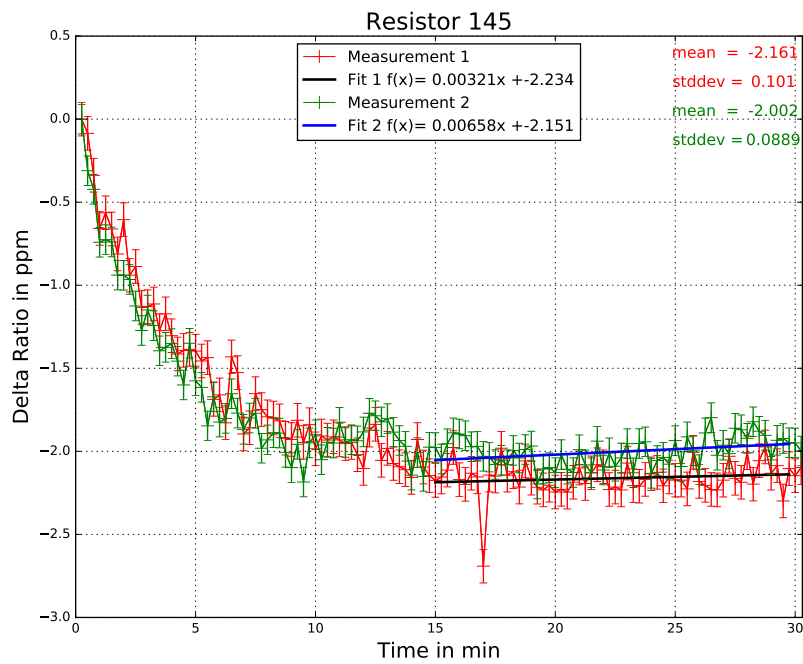


Abbildung 8.79: Aufwärmverhalten des Widerstands 145.

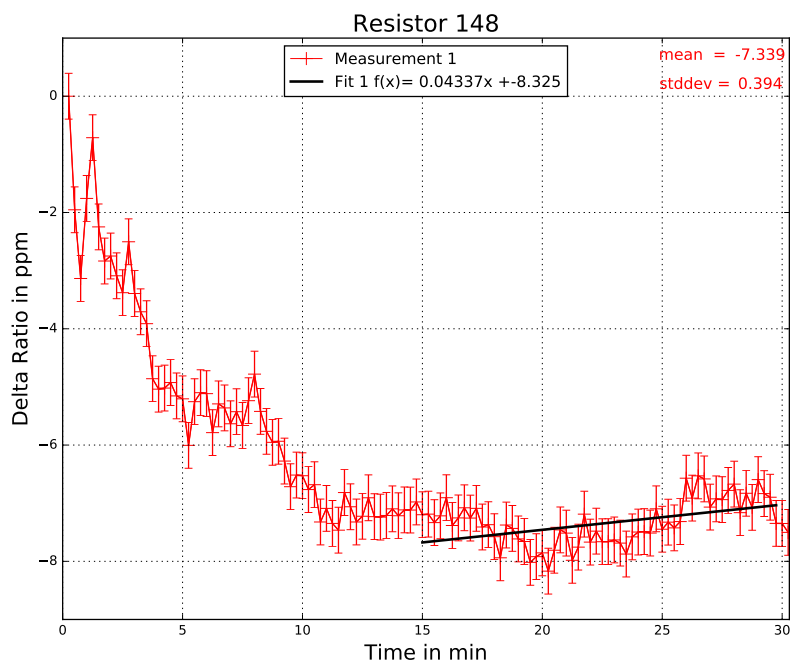


Abbildung 8.80: Aufwärmverhalten des Widerstands 148.

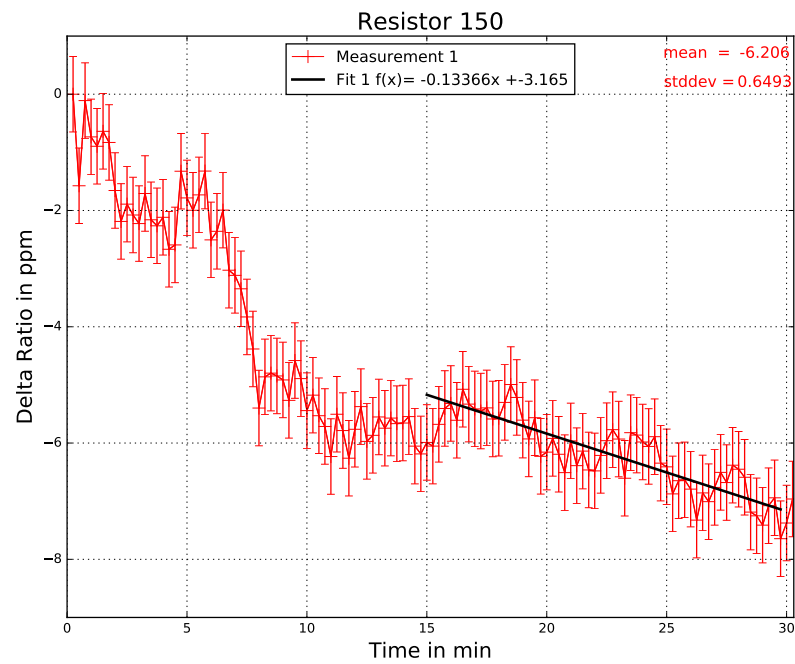


Abbildung 8.81: Aufwärmverhalten des Widerstands 150.

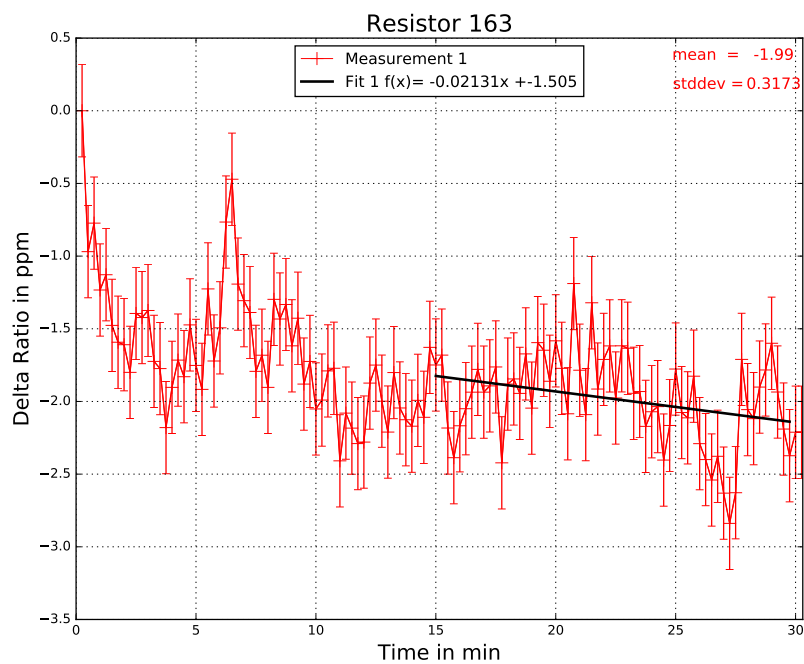


Abbildung 8.82: Aufwärmverhalten des Widerstands 163.

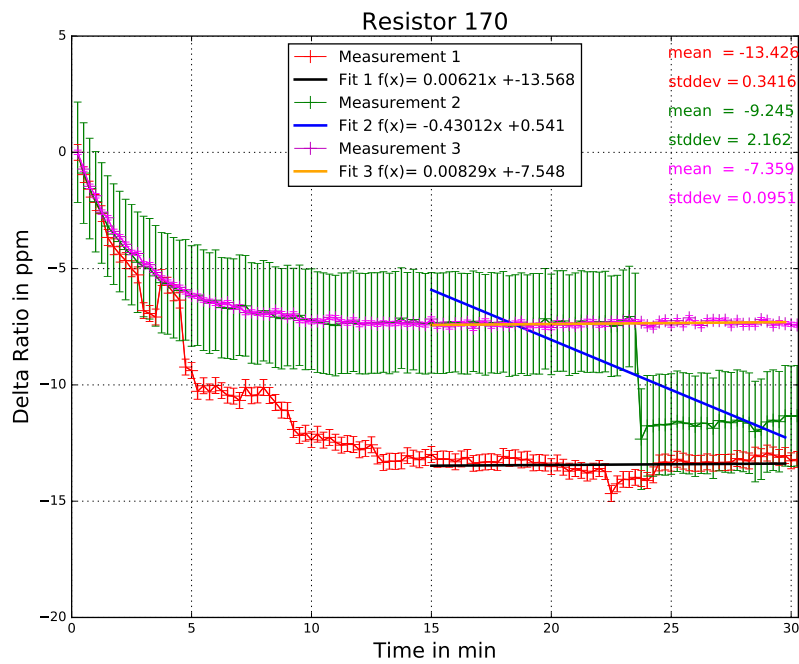


Abbildung 8.83: Aufwärmverhalten des Widerstands 170.

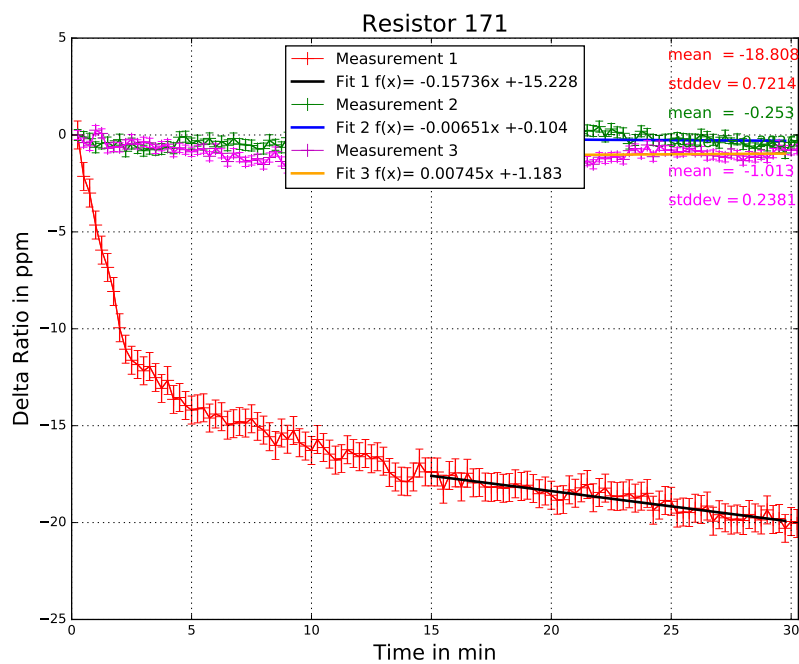


Abbildung 8.84: Aufwärmverhalten des Widerstands 171.

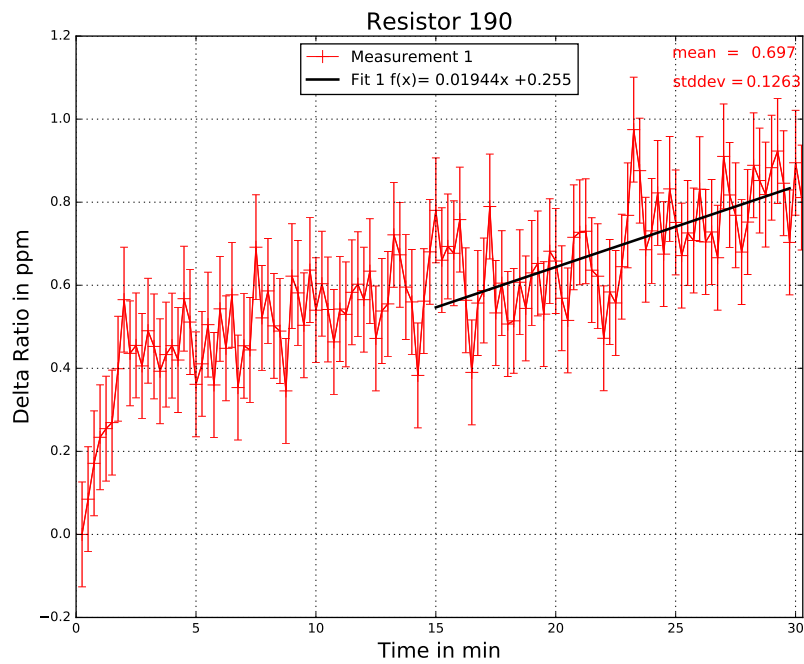


Abbildung 8.85: Aufwärmverhalten des Widerstands 190.

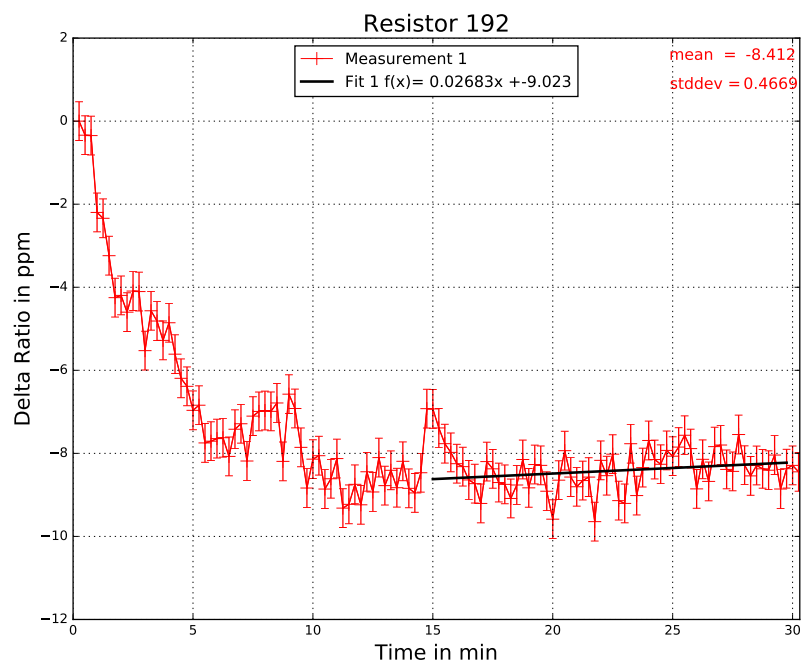


Abbildung 8.86: Aufwärmverhalten des Widerstands 192.

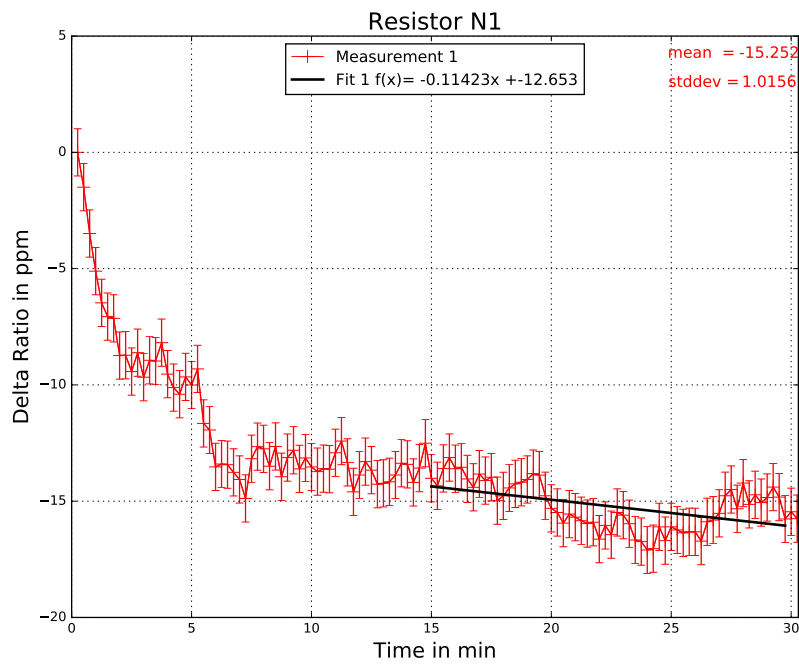


Abbildung 8.87: Aufwärmverhalten des Widerstands N1.

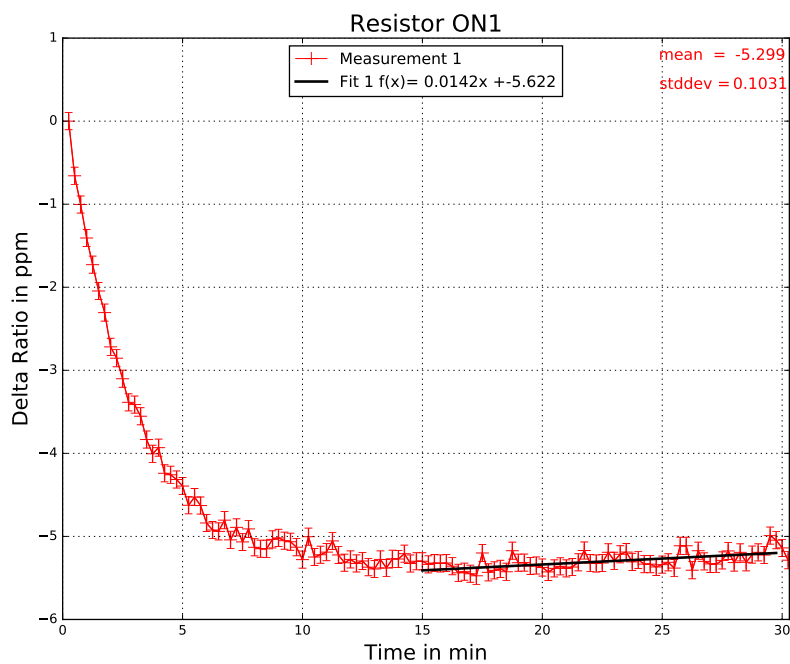


Abbildung 8.88: Aufwärmverhalten des Widerstands ON1.

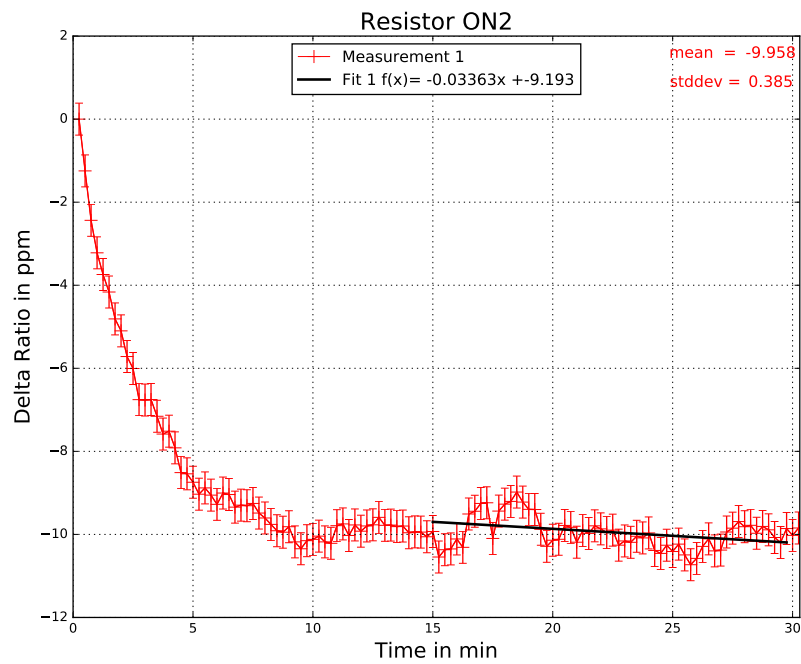


Abbildung 8.89: Aufwärmverhalten des Widerstands ON2.

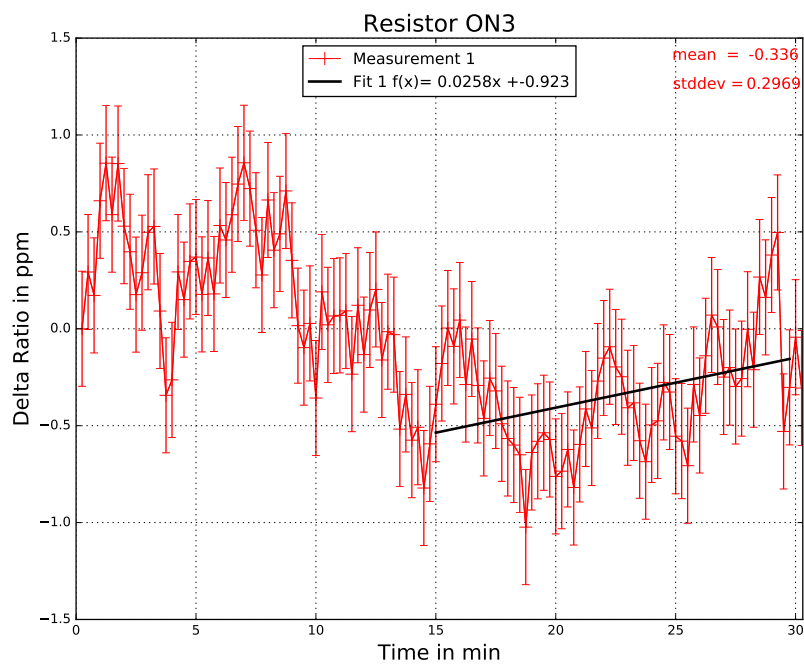


Abbildung 8.90: Aufwärmverhalten des Widerstands ON3.

Abbildungen - Kapitel 4.3

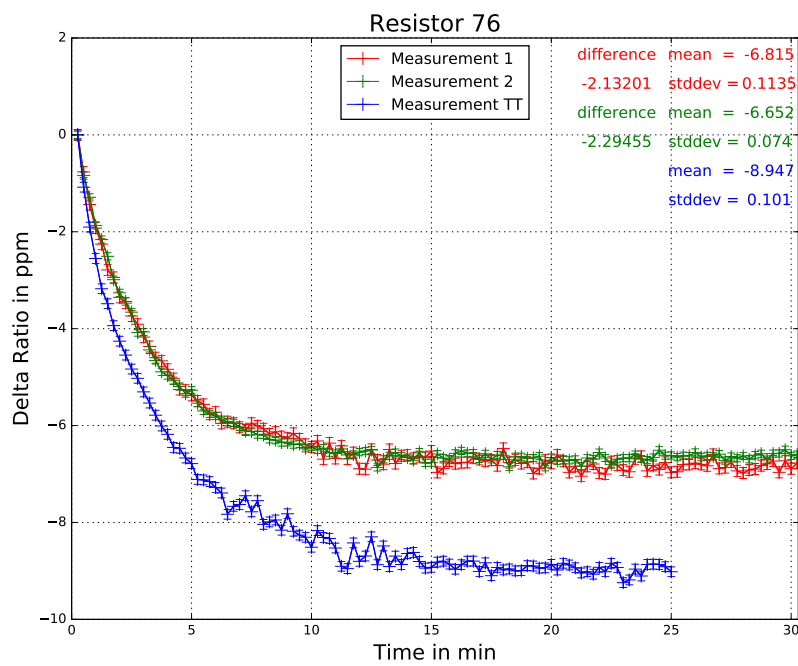


Abbildung 8.91: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 76.

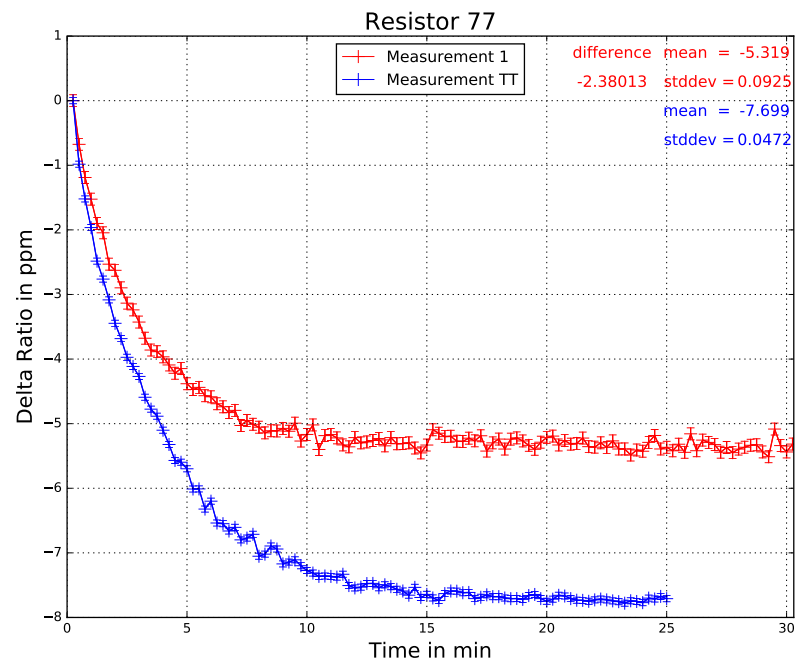


Abbildung 8.92: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 77.

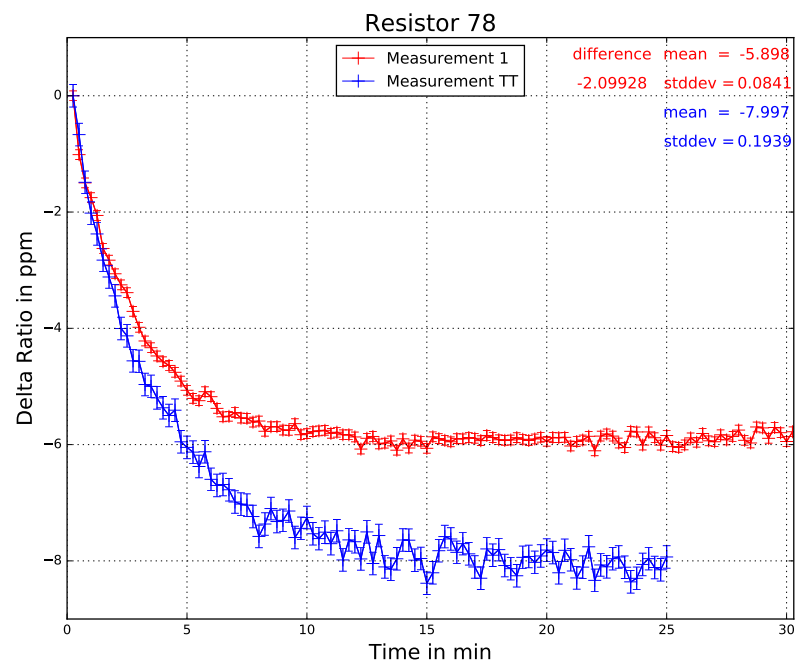


Abbildung 8.93: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 78.

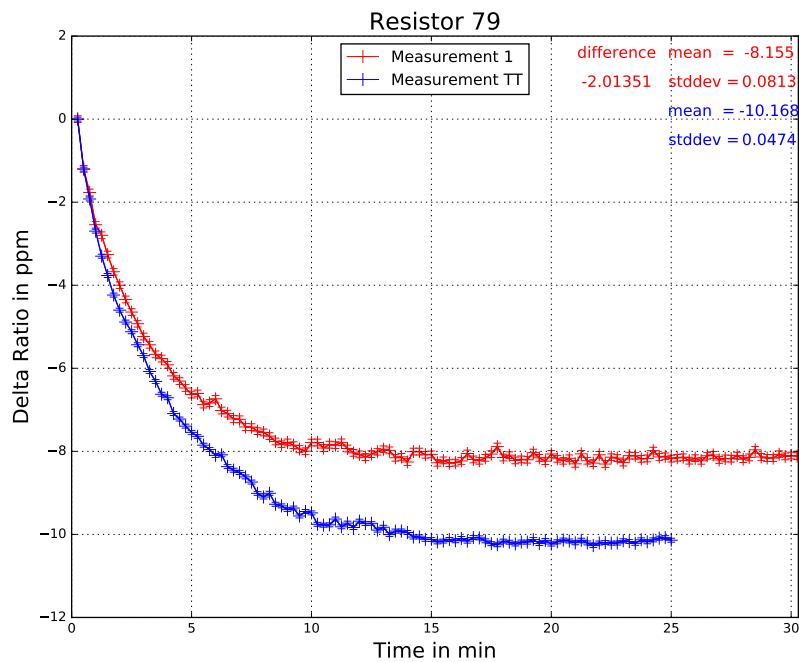


Abbildung 8.94: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 79.

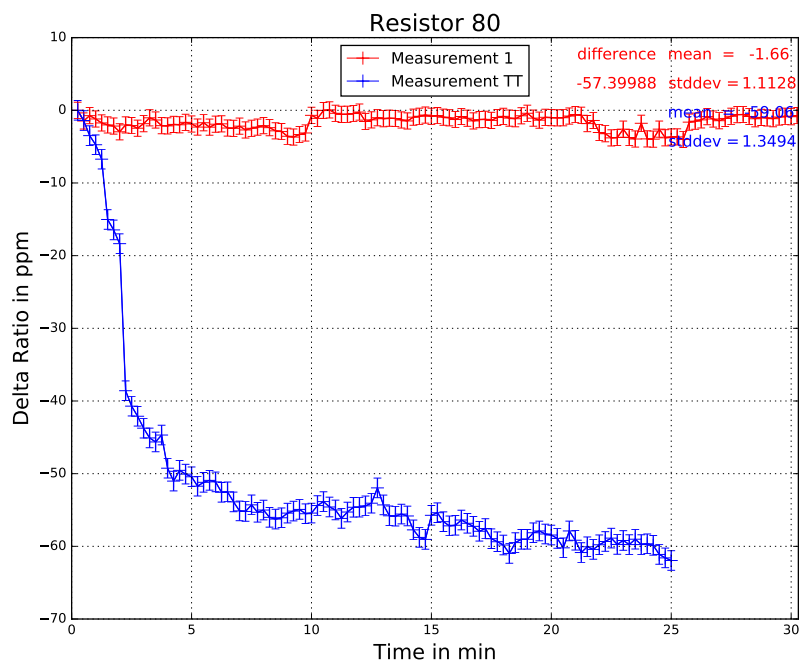


Abbildung 8.95: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 80.

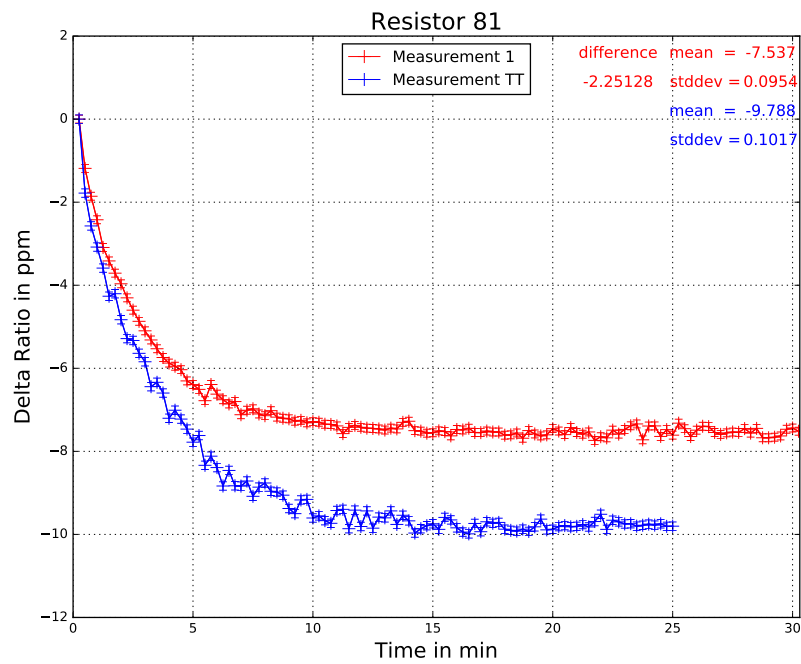


Abbildung 8.96: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 81.

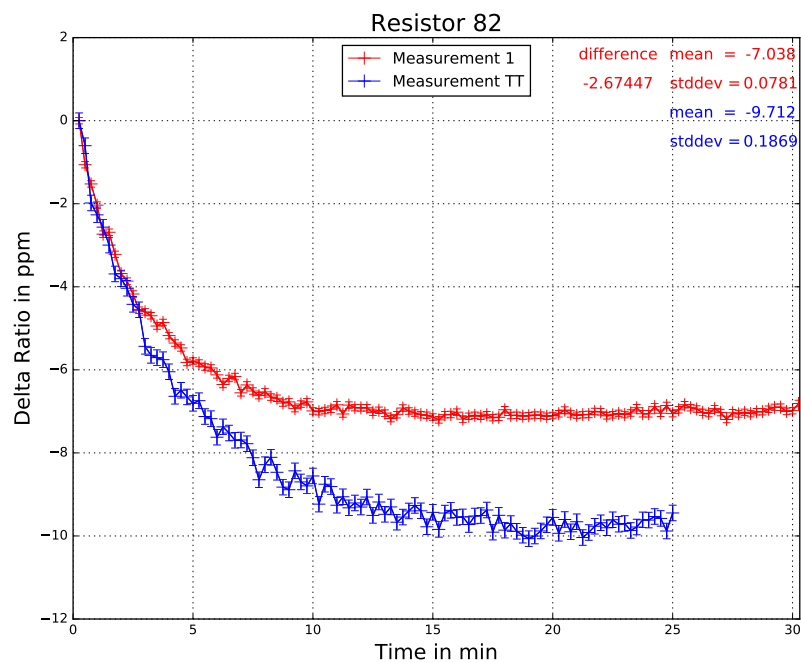


Abbildung 8.97: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 82.

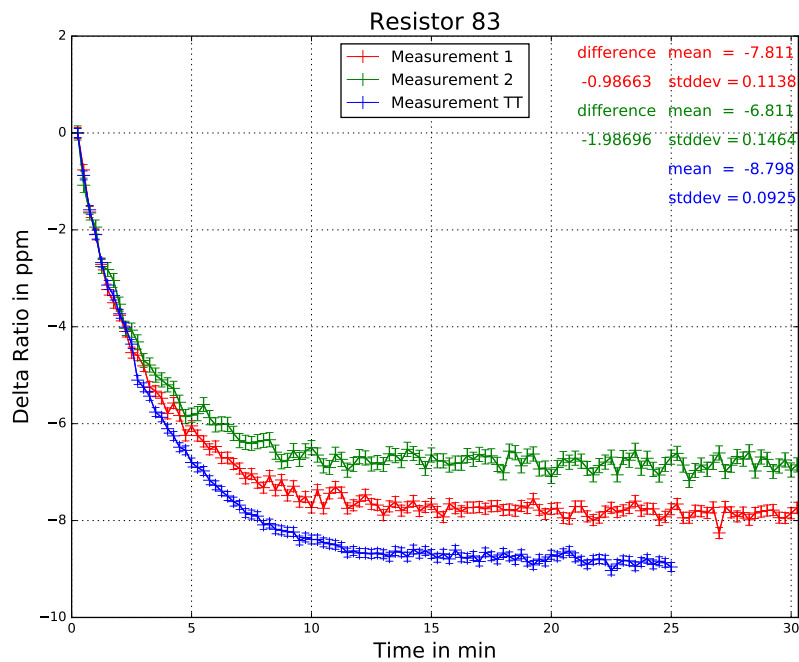


Abbildung 8.98: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 83.

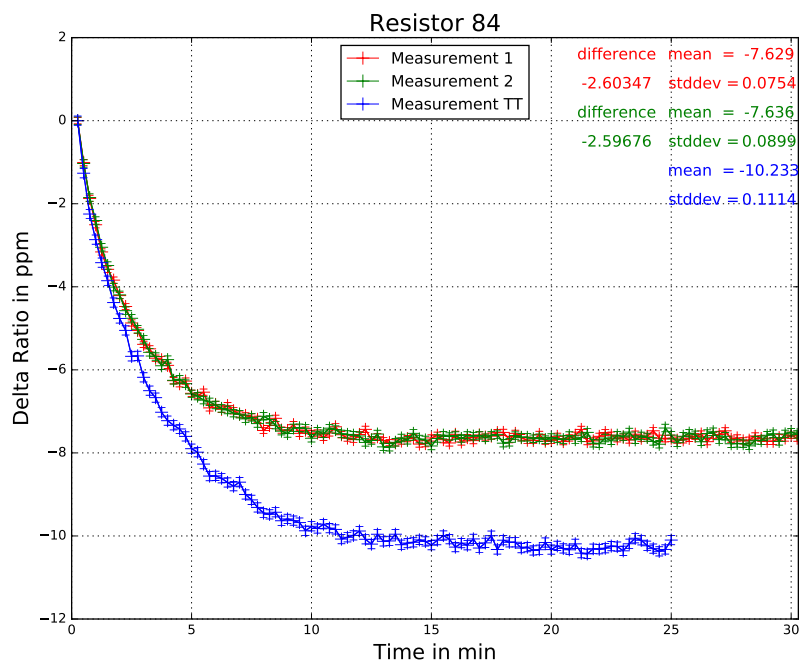


Abbildung 8.99: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 84.

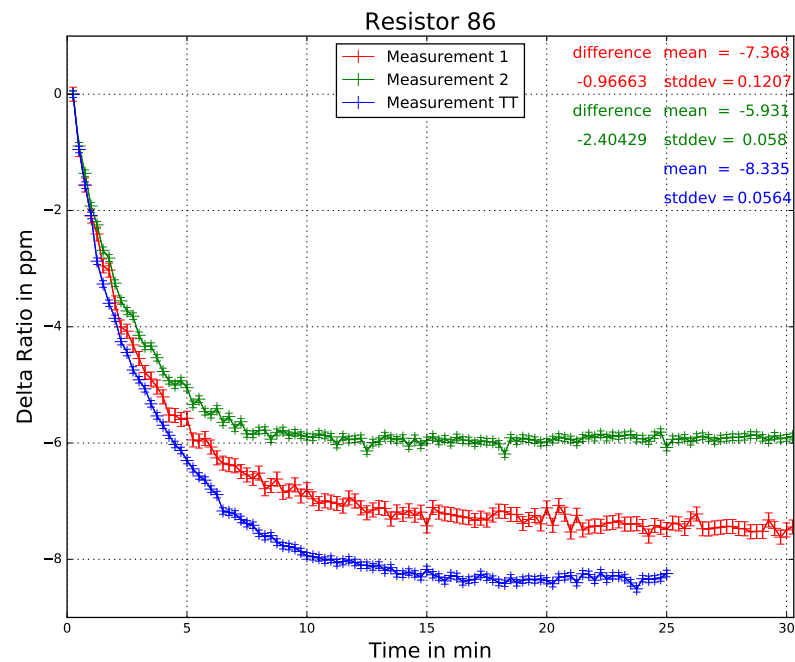


Abbildung 8.100: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 86.

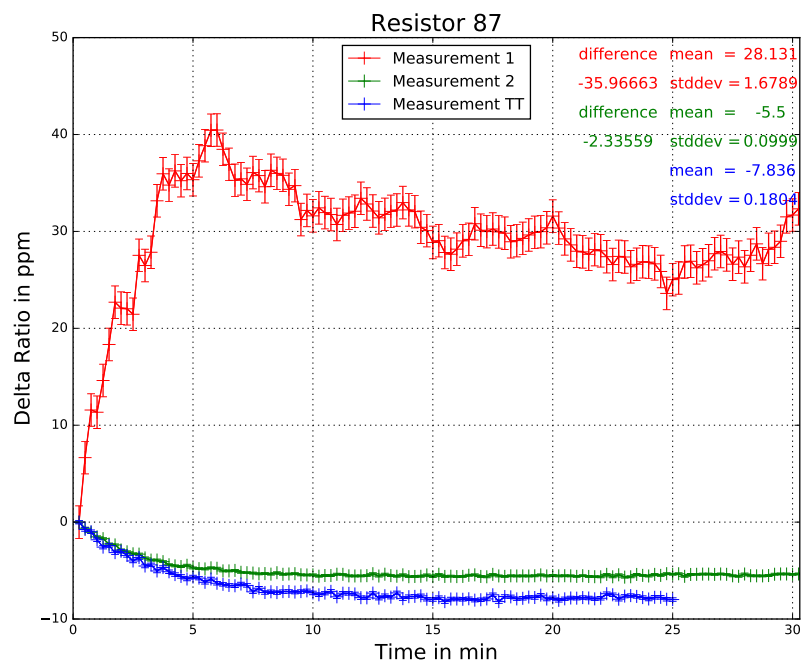


Abbildung 8.101: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 87.

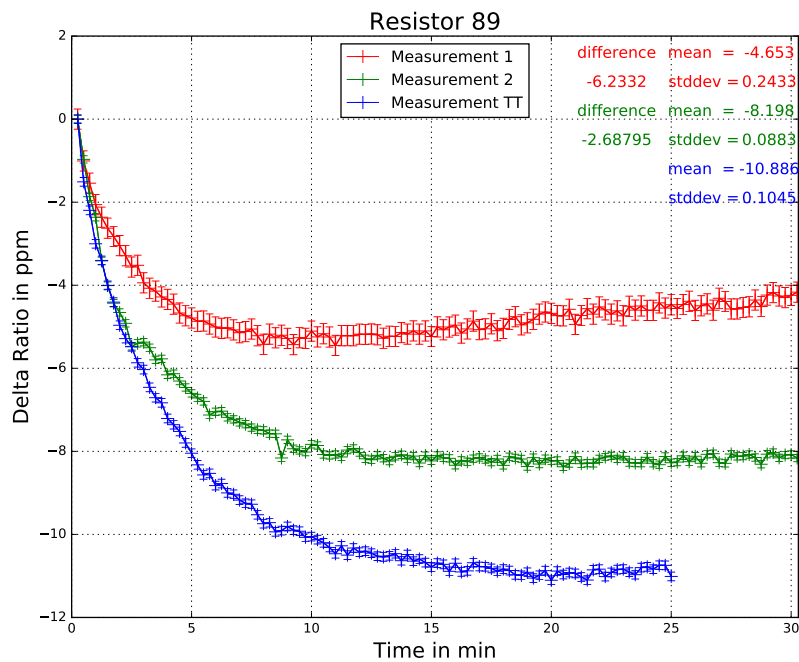


Abbildung 8.102: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 89.

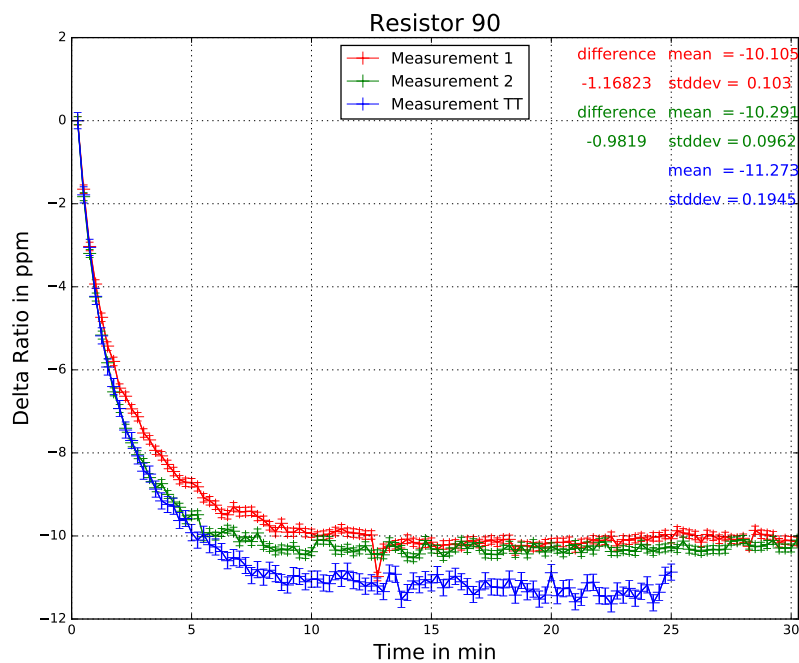


Abbildung 8.103: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 90.

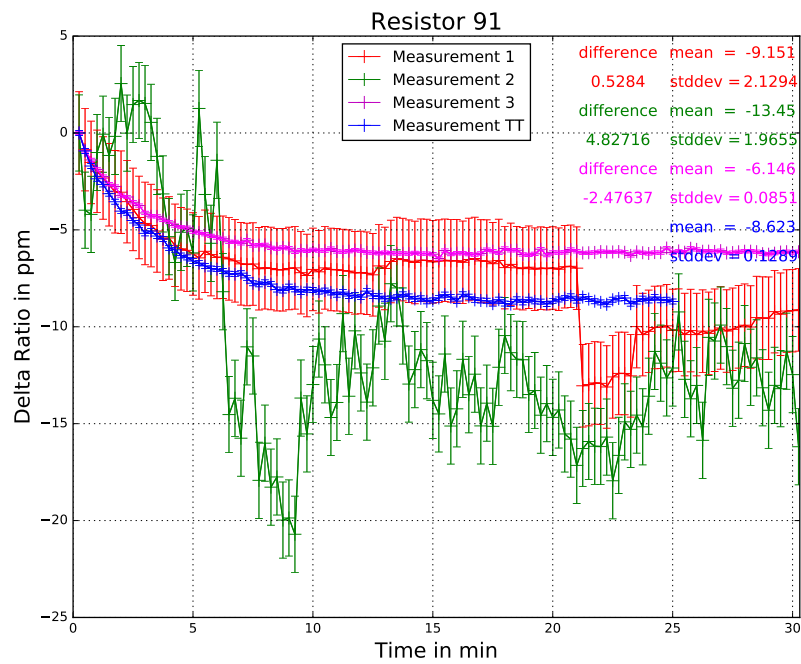


Abbildung 8.104: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 91.

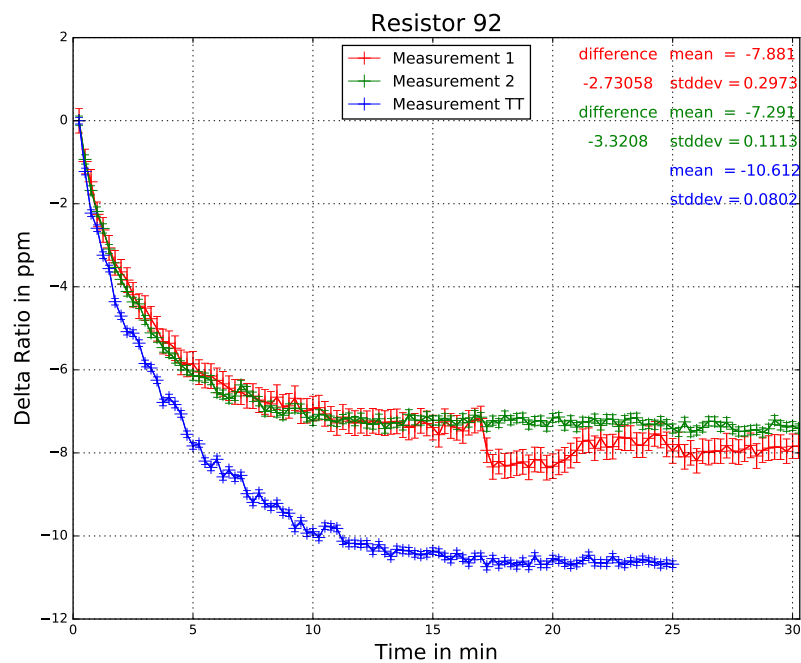


Abbildung 8.105: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 92.

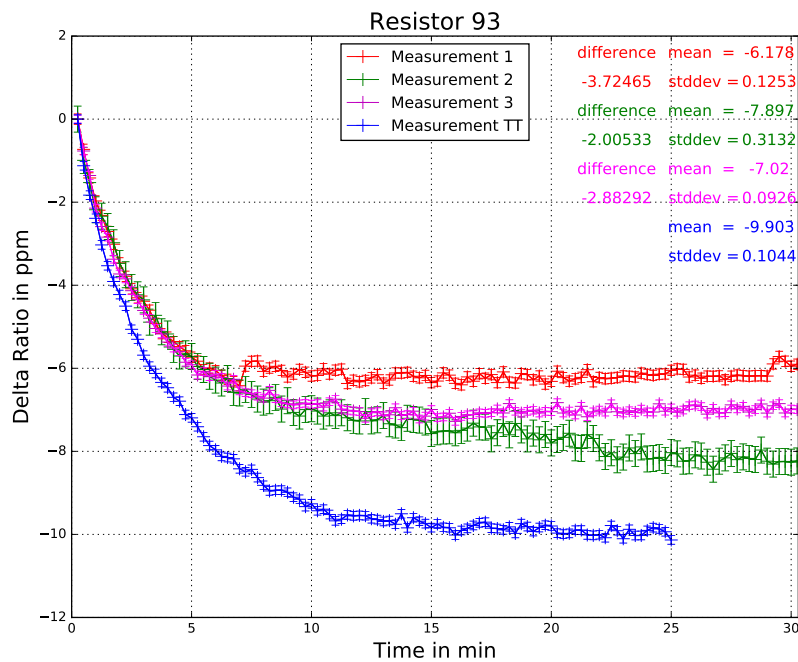


Abbildung 8.106: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 93.

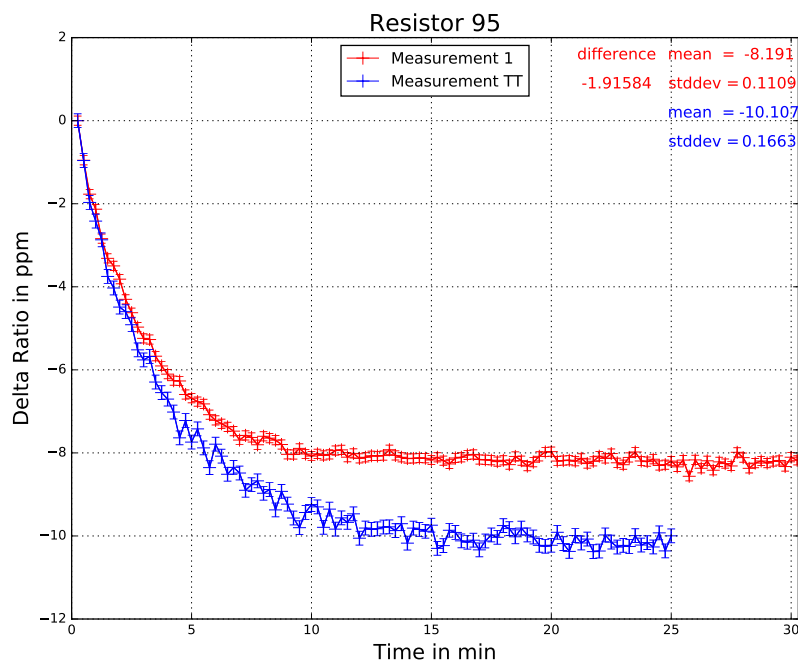


Abbildung 8.107: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 95.

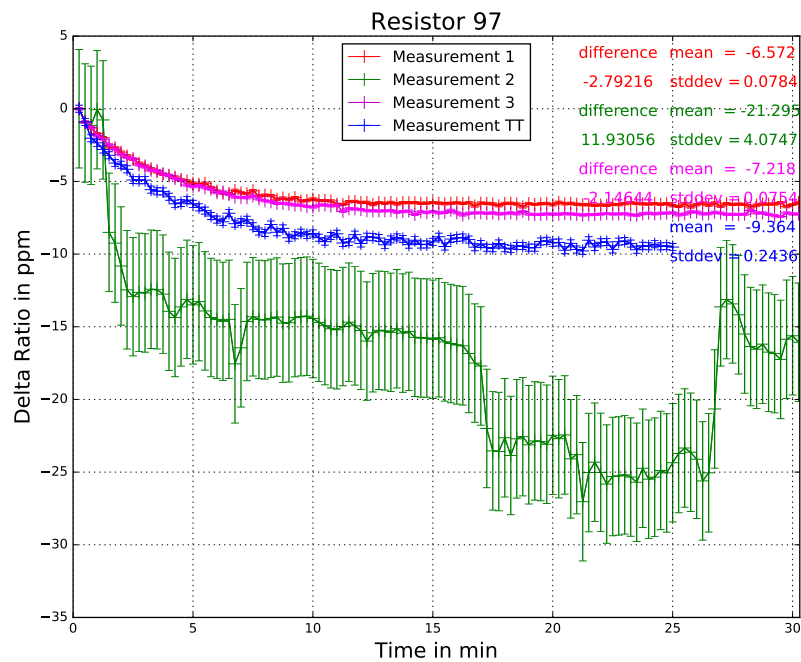


Abbildung 8.108: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 97.

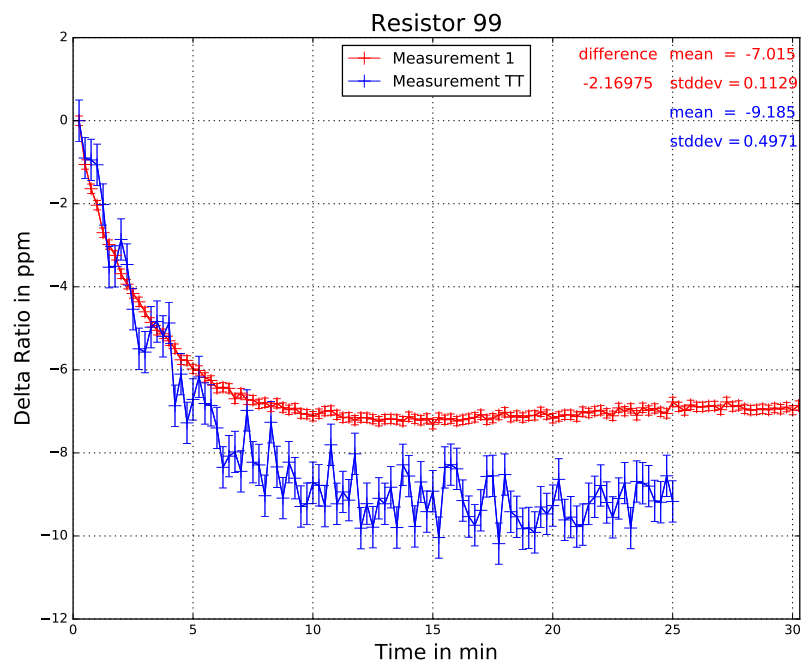


Abbildung 8.109: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 99.

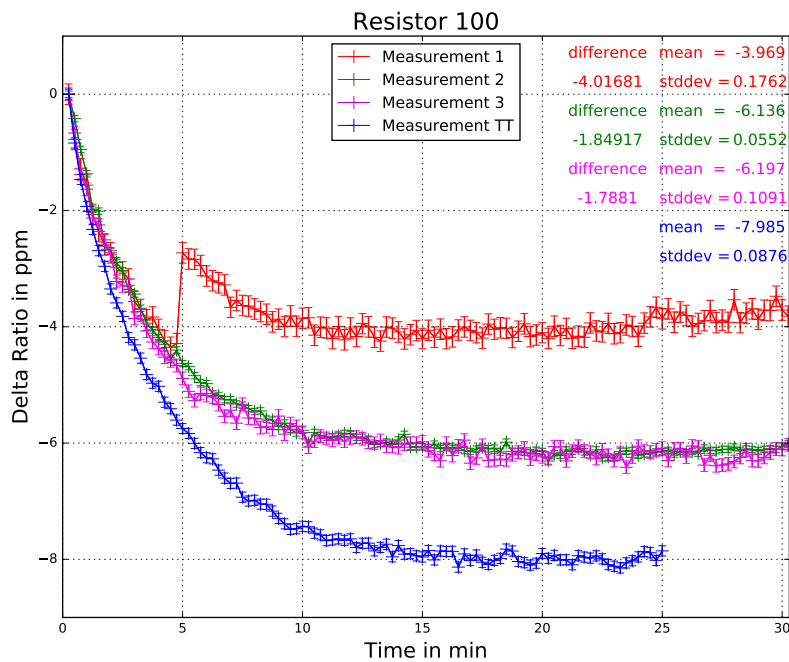


Abbildung 8.110: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 100.

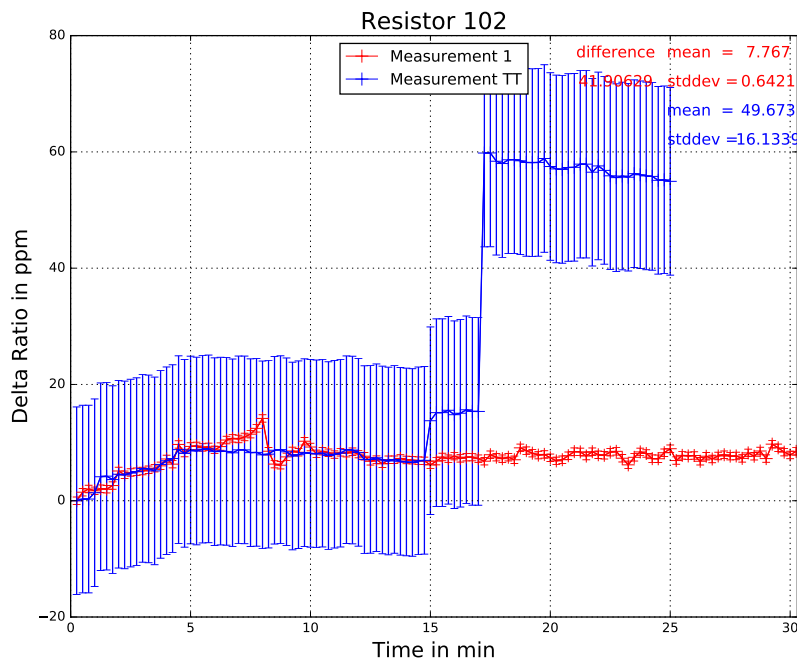


Abbildung 8.111: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 102.

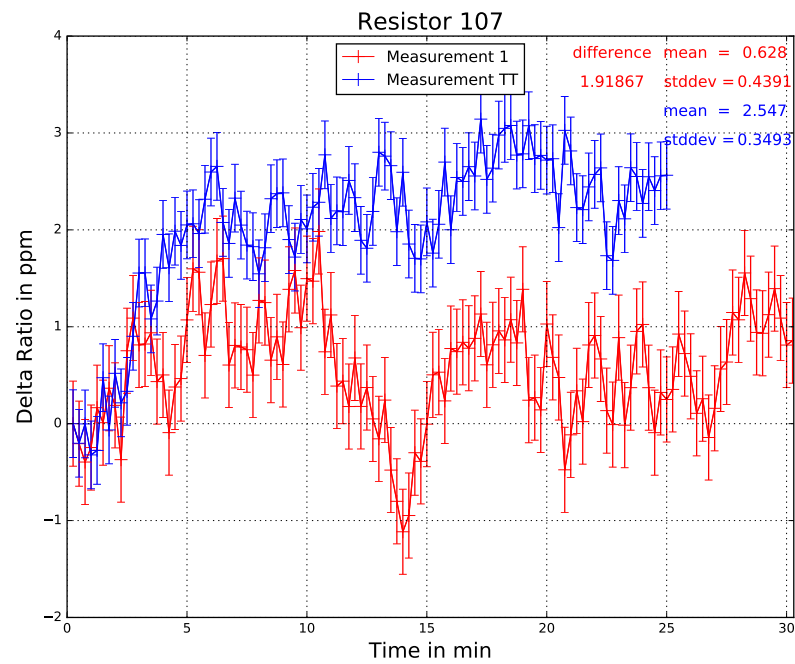


Abbildung 8.112: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 107.

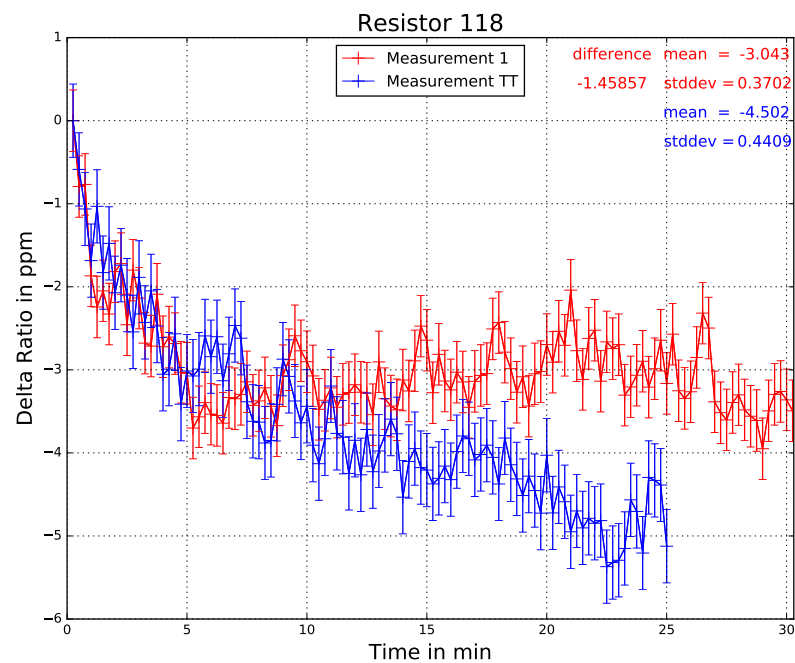


Abbildung 8.113: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 118.

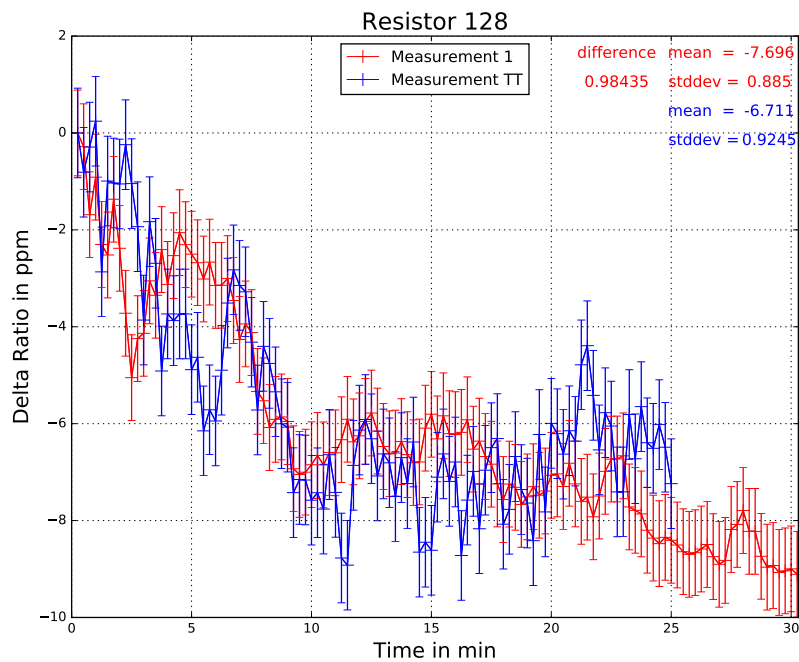


Abbildung 8.114: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 128.

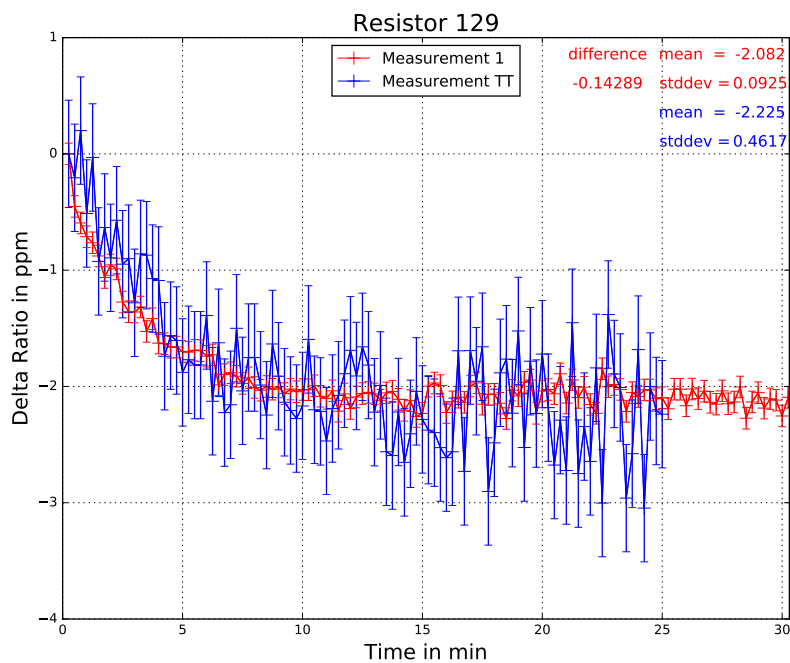


Abbildung 8.115: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 129.

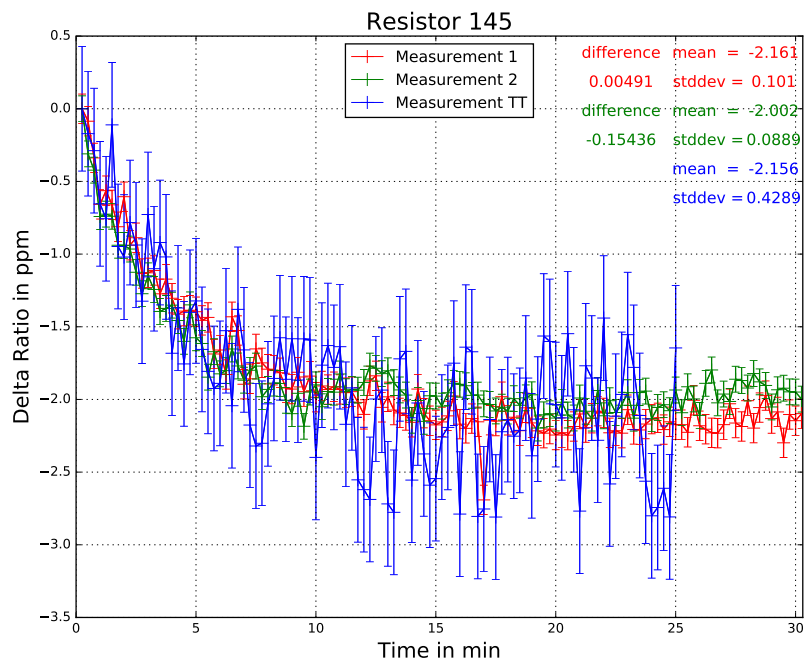


Abbildung 8.116: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 145.

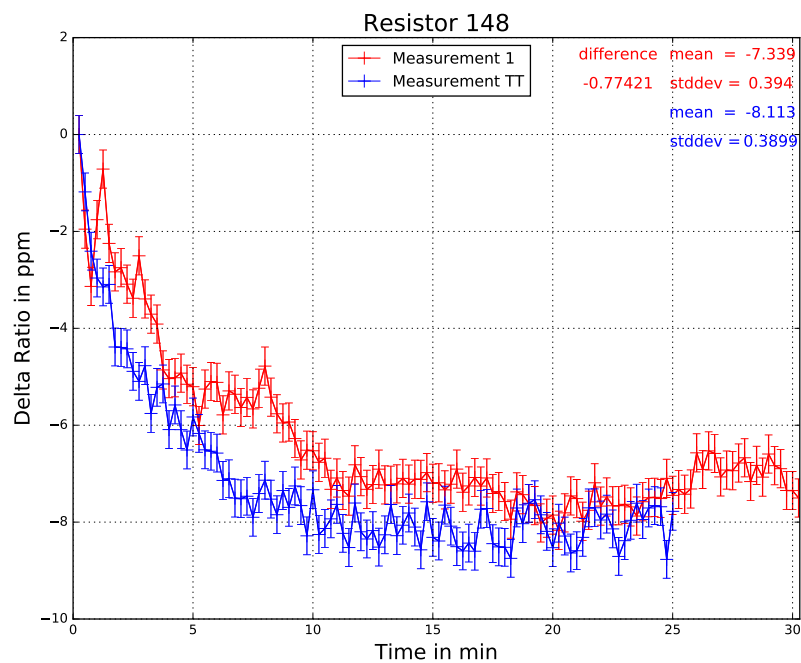


Abbildung 8.117: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 148.

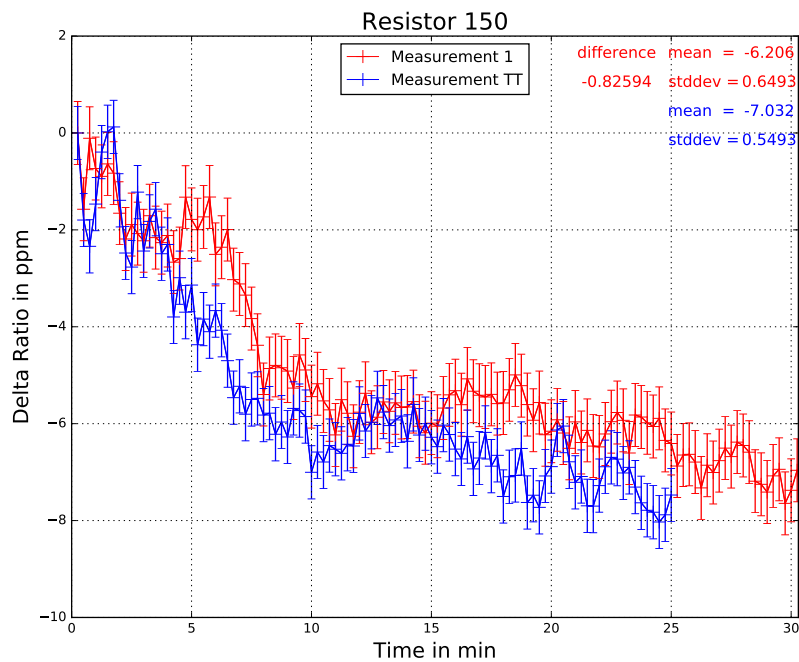


Abbildung 8.118: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 150.

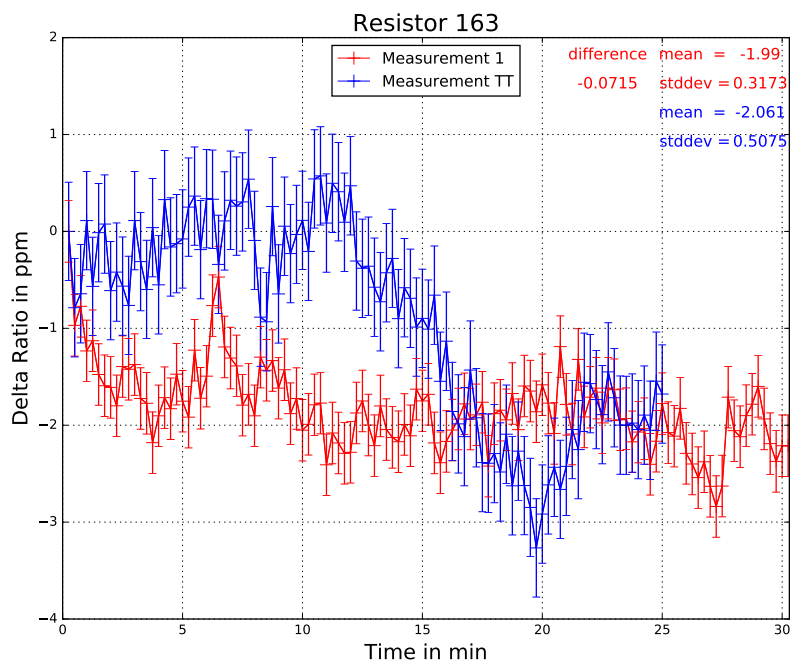


Abbildung 8.119: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 163.

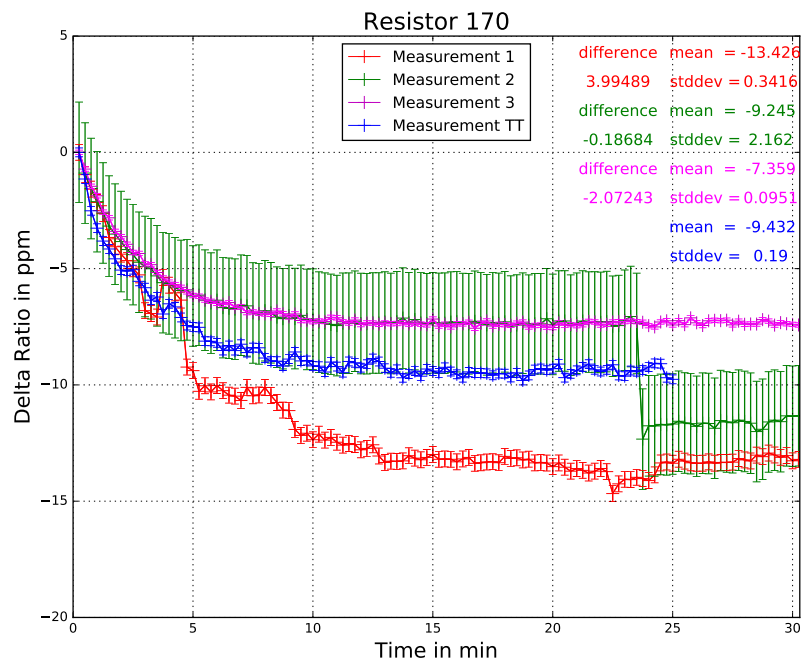


Abbildung 8.120: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 170.

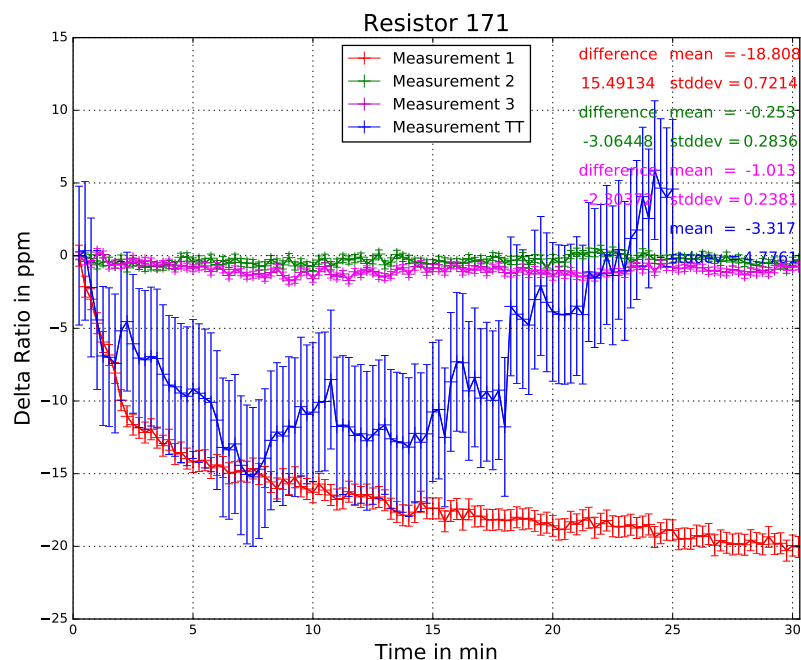


Abbildung 8.121: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 171.

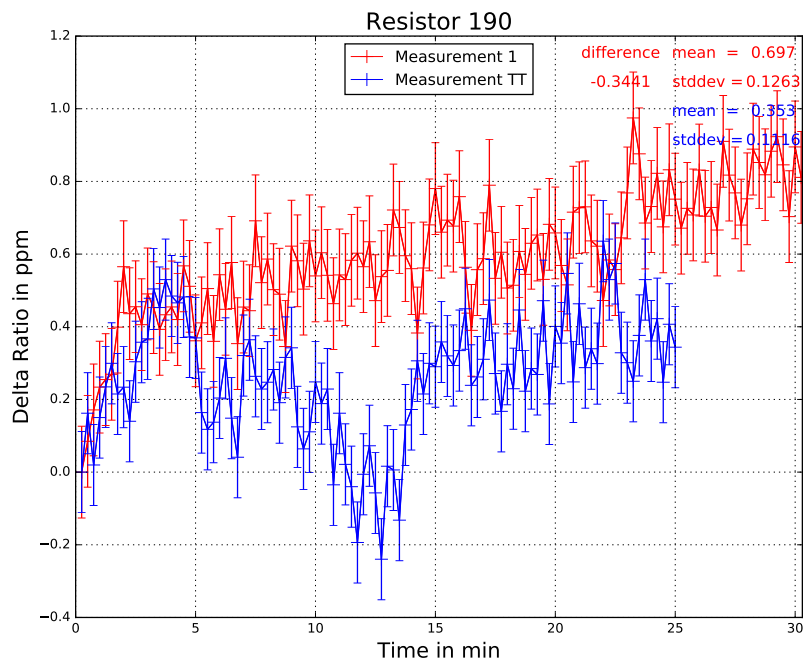


Abbildung 8.122: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 190.

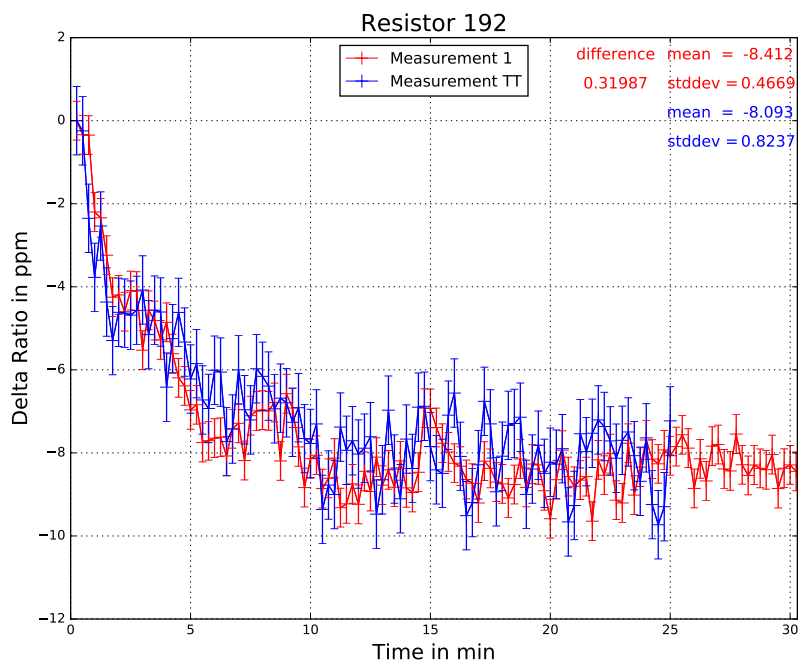


Abbildung 8.123: Vergleich zwischen alten und aktuellen Messwerten zum Aufwärmverhalten des Widerstands 192.

Abbildungen - Kapitel 4.4

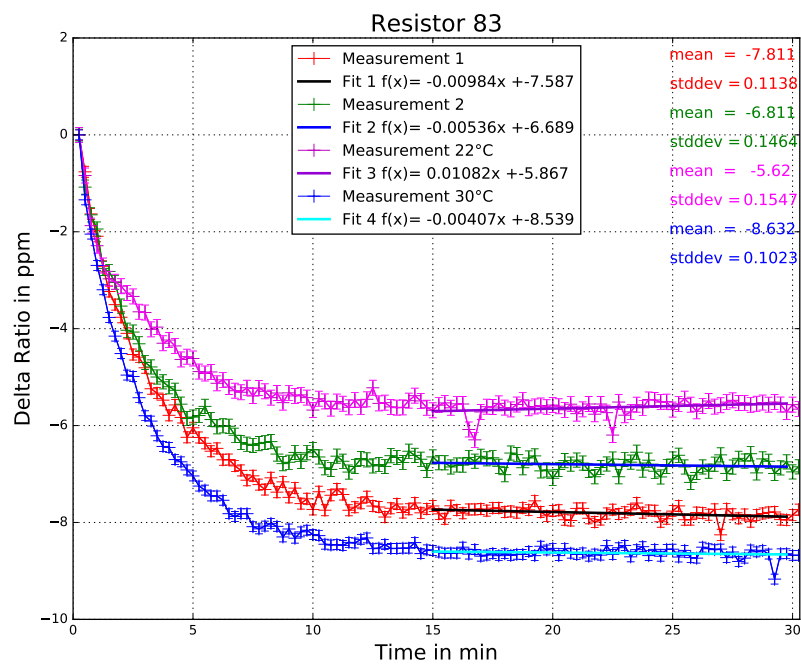


Abbildung 8.124: Vergleich zwischen Messungen bei 22°C, 25°C und 30°C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 83.

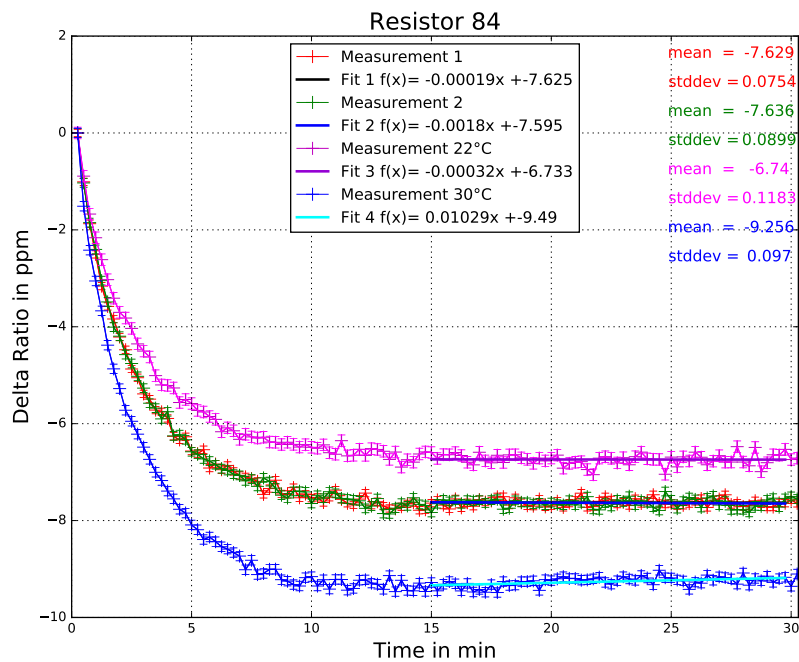


Abbildung 8.125: Vergleich zwischen Messungen bei 22°C, 25°C und 30°C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 84.

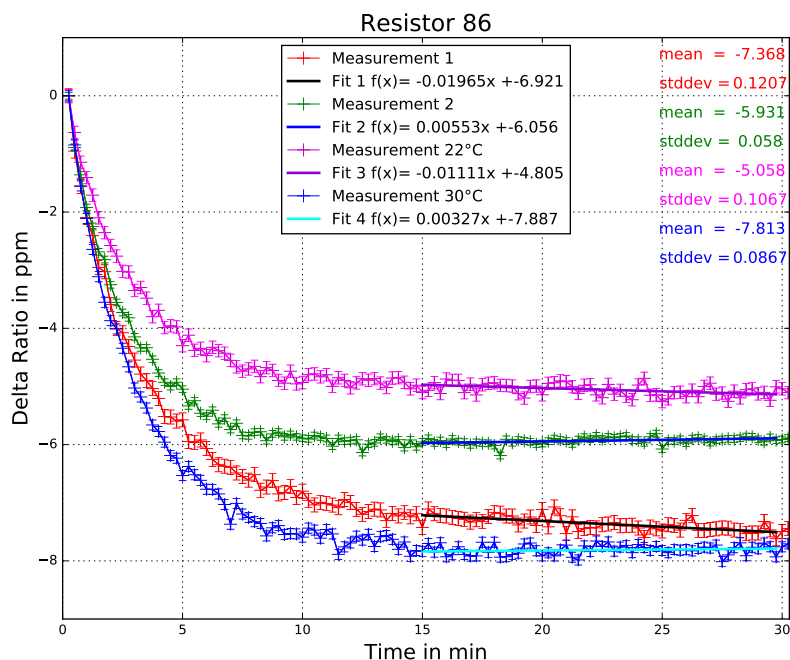


Abbildung 8.126: Vergleich zwischen Messungen bei 22°C, 25°C und 30°C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 83.

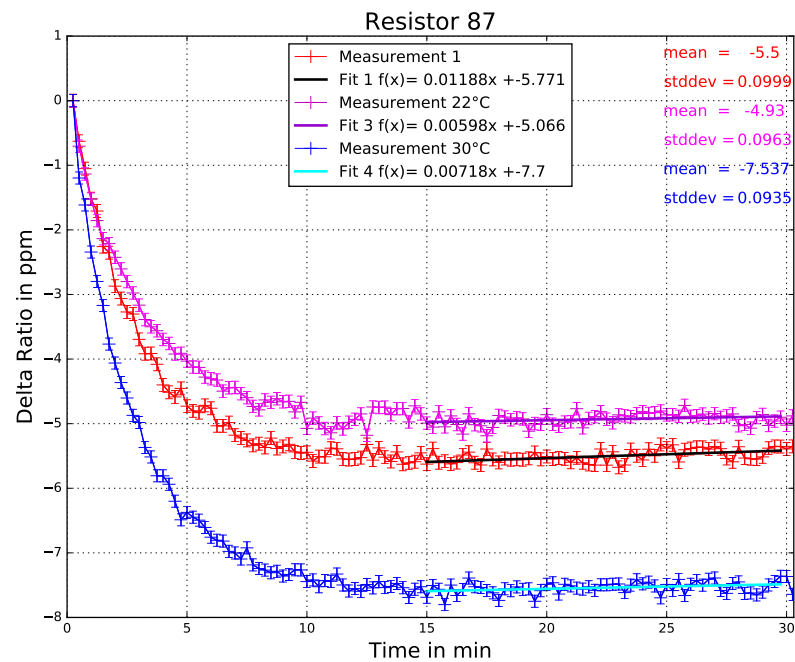


Abbildung 8.127: Vergleich zwischen Messungen bei 22°C, 25°C und 30°C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 87.

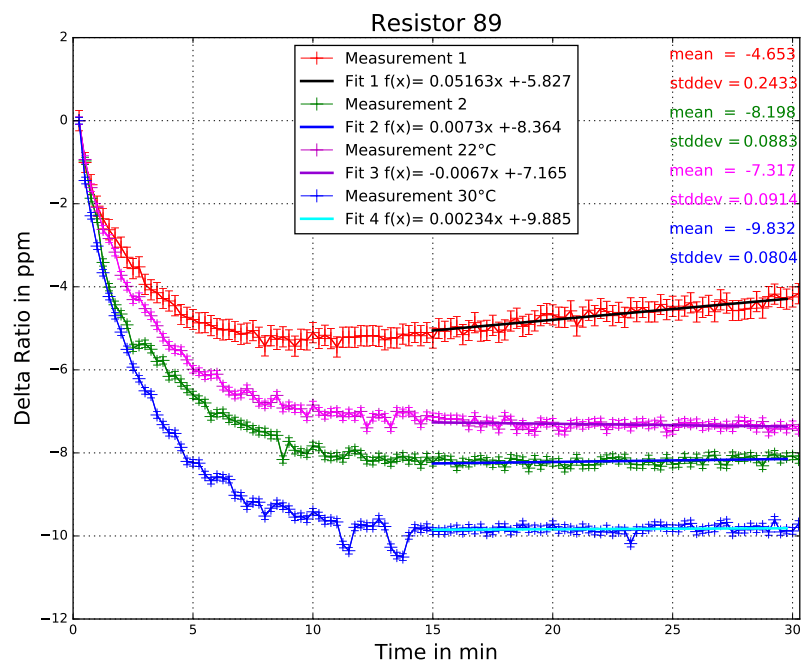


Abbildung 8.128: Vergleich zwischen Messungen bei 22°C, 25°C und 30°C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 89.

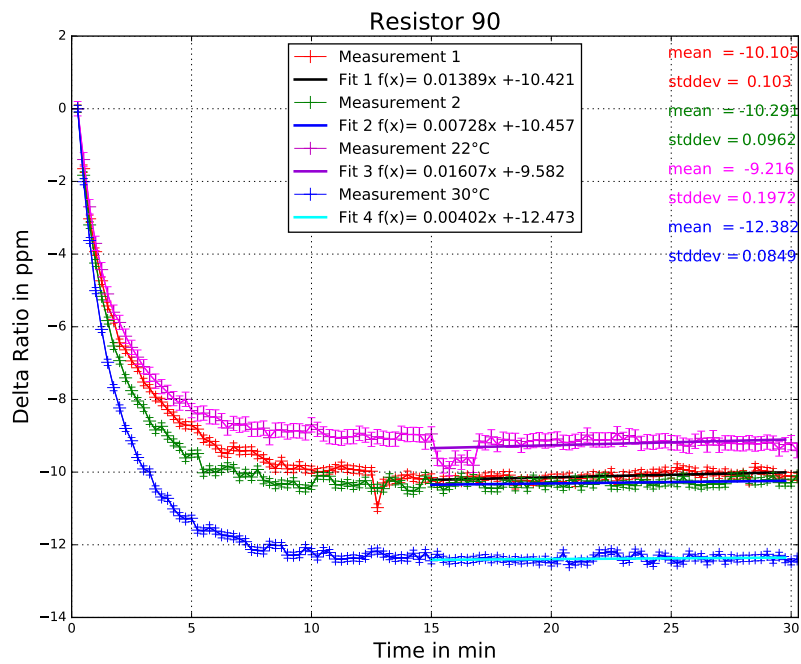


Abbildung 8.129: Vergleich zwischen Messungen bei 22 °C, 25 °C und 30 °C des Aufwärmverhaltens des Widerstands 90.

Abbildungen - Kapitel 5.2

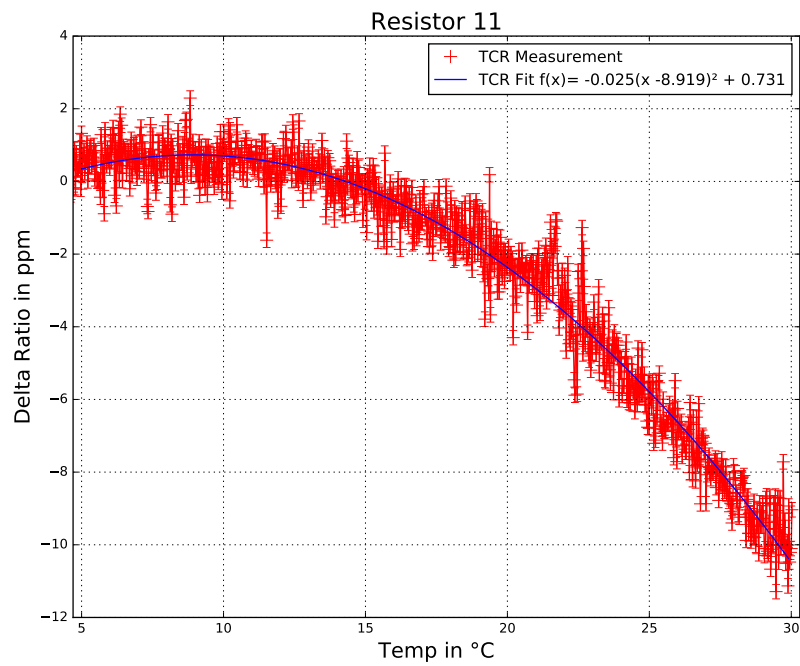


Abbildung 8.130: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 11 mit Referenzwiderstand 77.

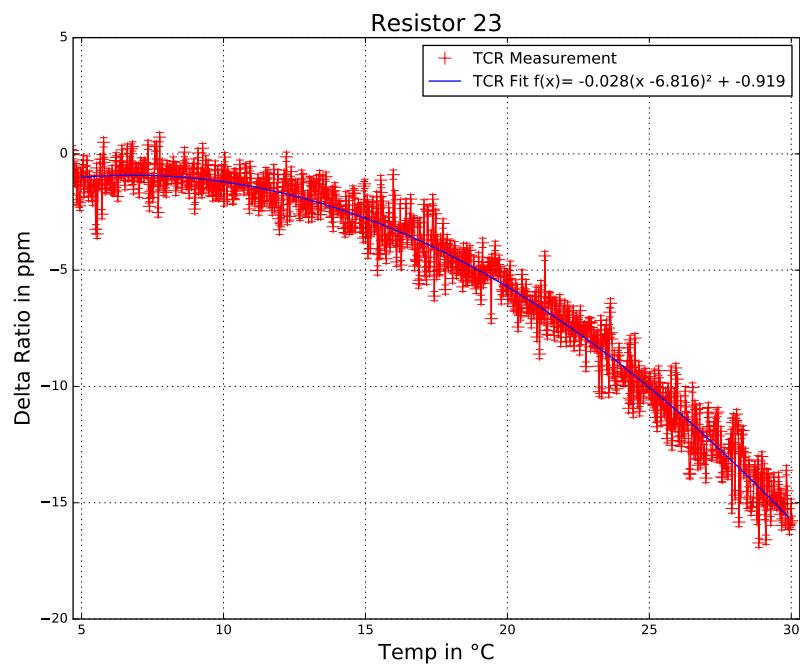


Abbildung 8.131: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 23 mit Referenzwiderstand 77.

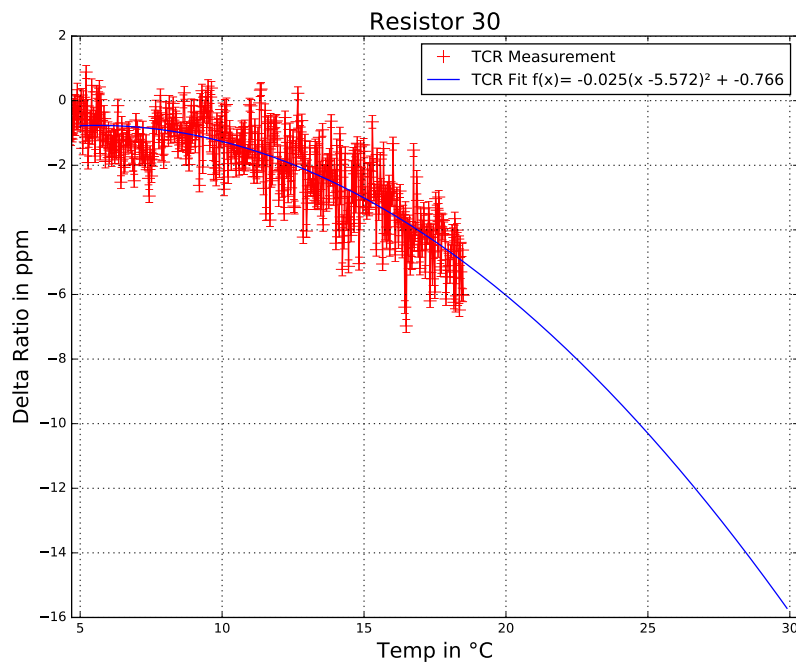


Abbildung 8.132: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 30 mit Referenzwiderstand 77.

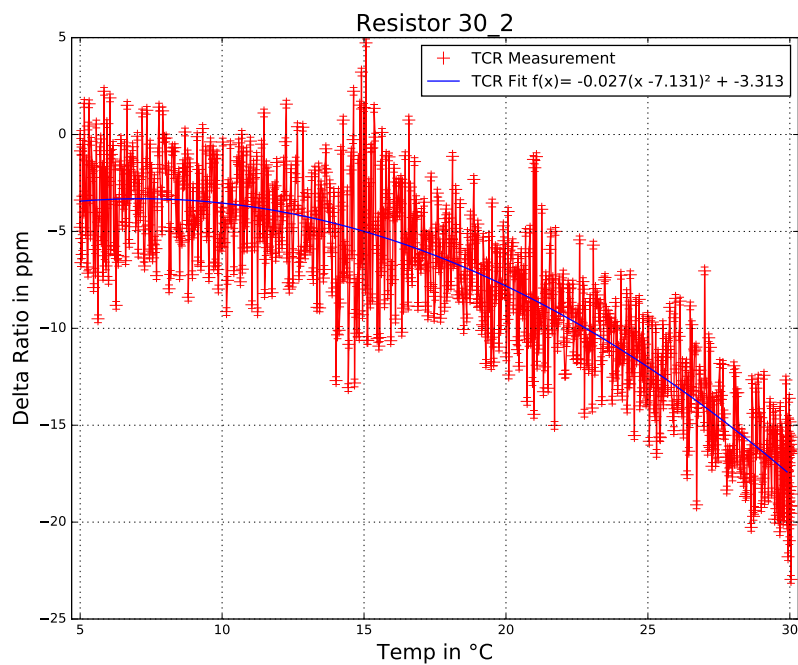


Abbildung 8.133: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 30 mit Referenzwiderstand 77.

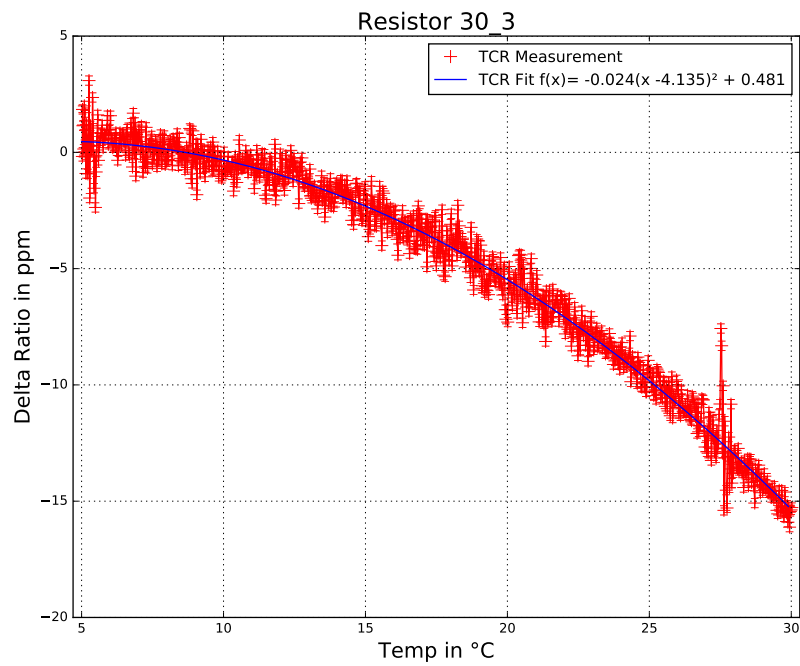


Abbildung 8.134: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 30 mit Referenzwiderstand 77.

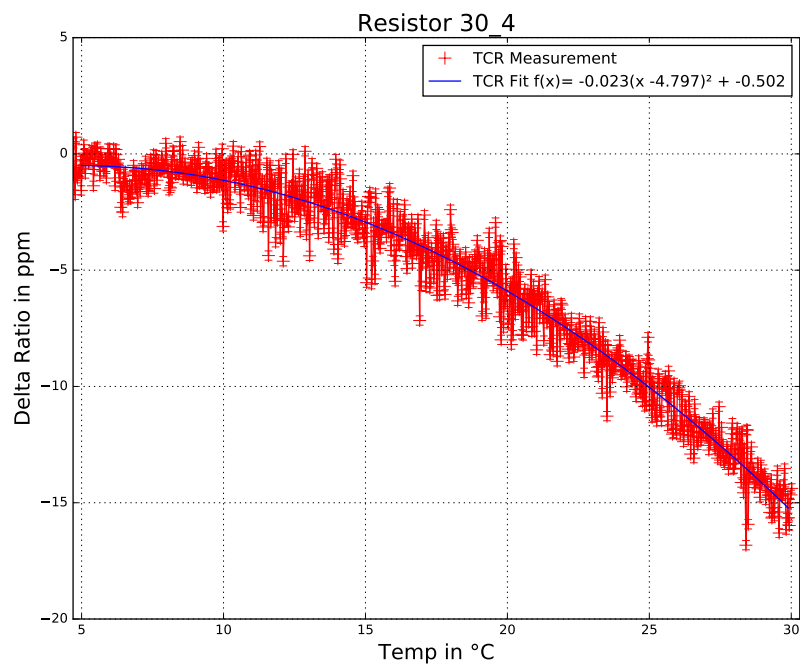


Abbildung 8.135: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 30 mit Referenzwiderstand 77.

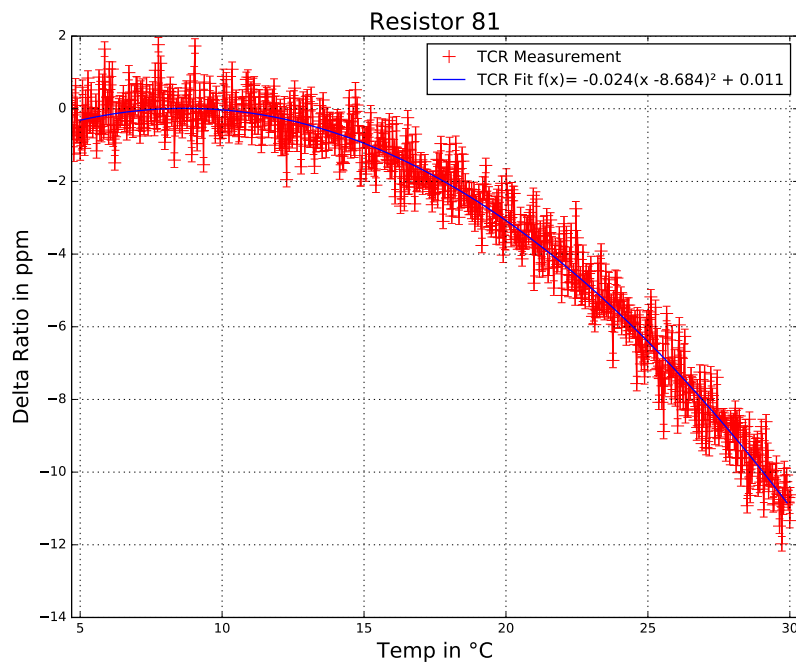


Abbildung 8.136: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 81 mit Referenzwiderstand 77.

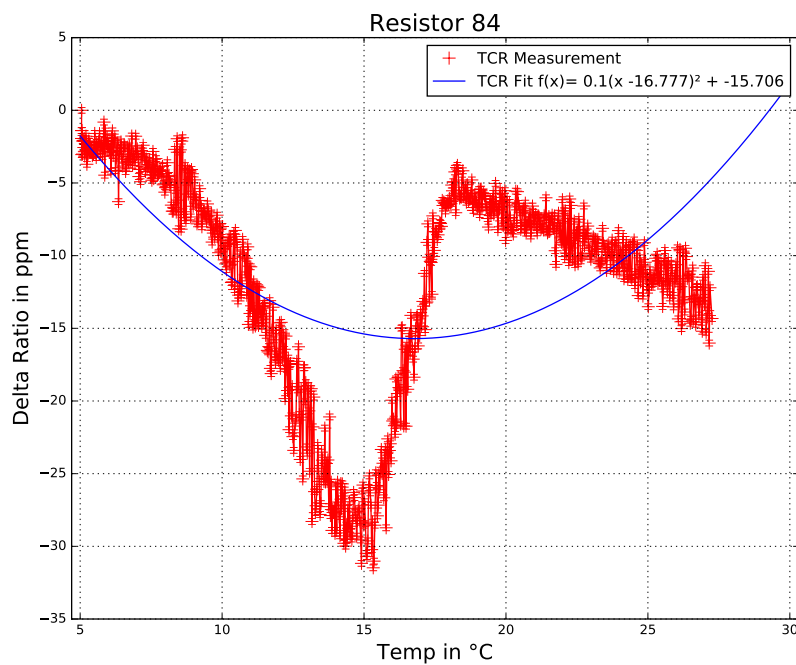


Abbildung 8.137: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

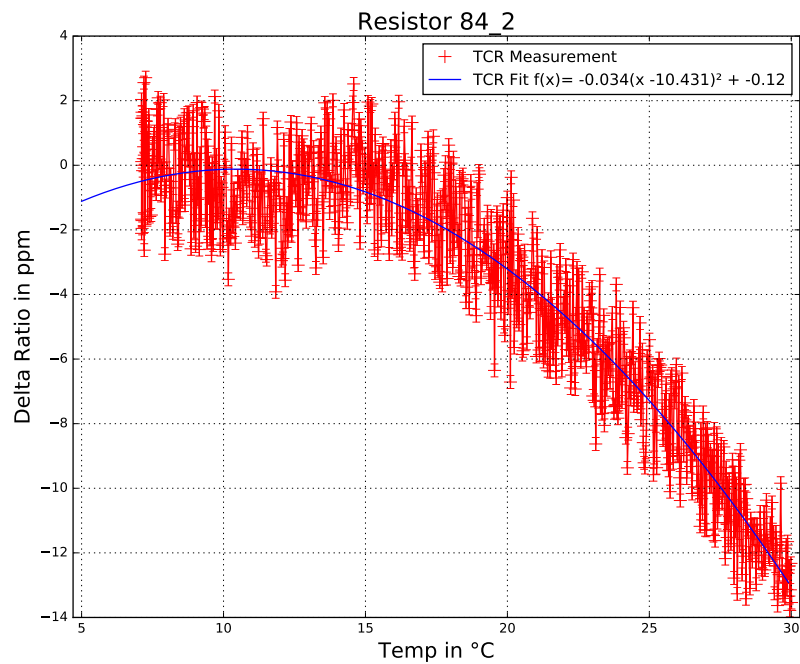


Abbildung 8.138: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

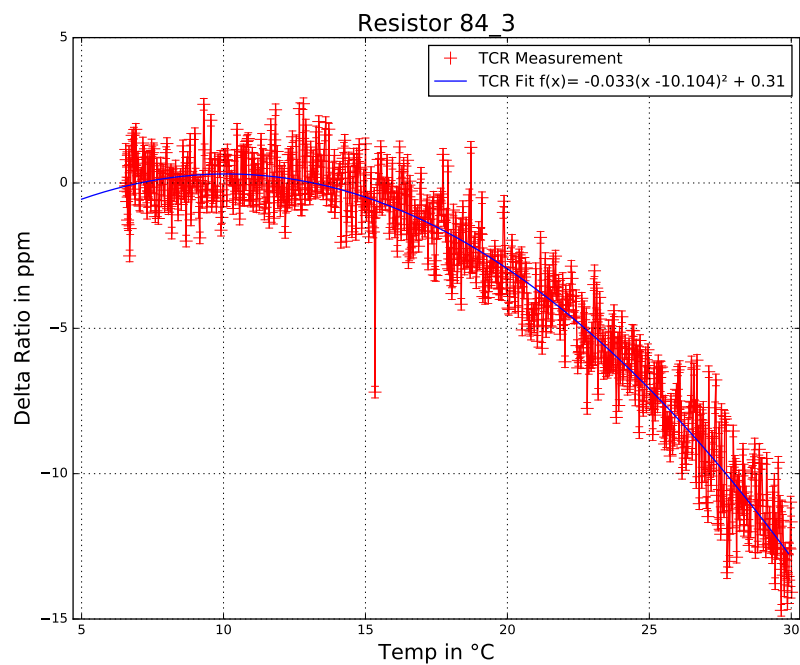


Abbildung 8.139: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

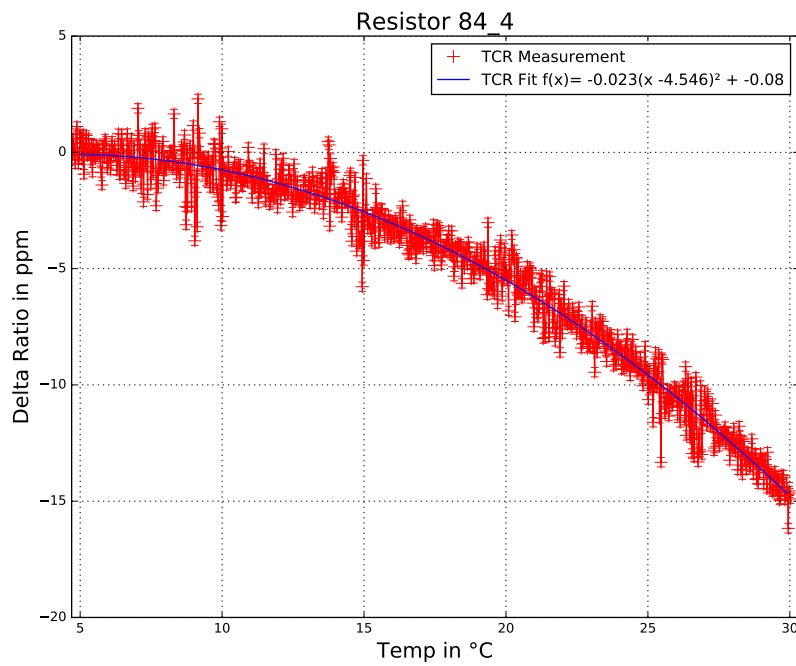


Abbildung 8.140: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

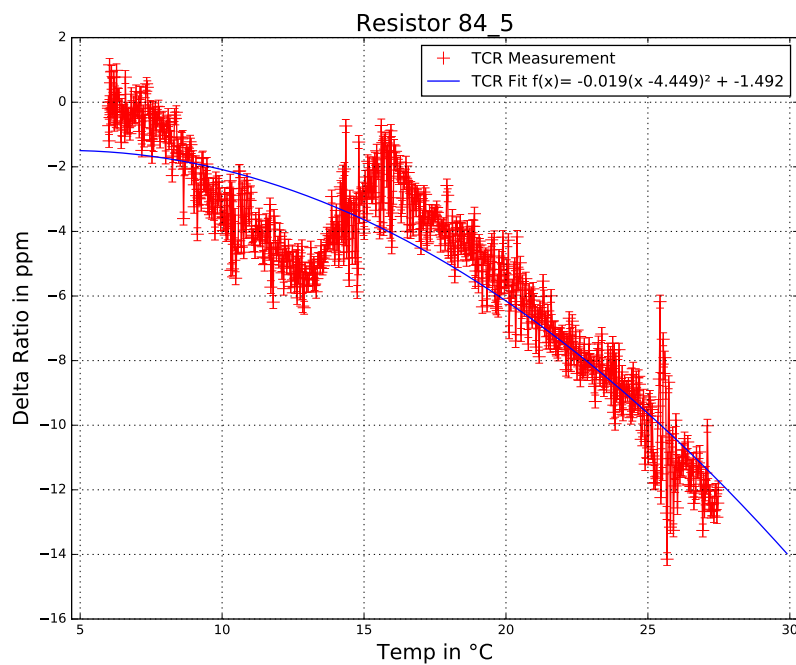


Abbildung 8.141: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

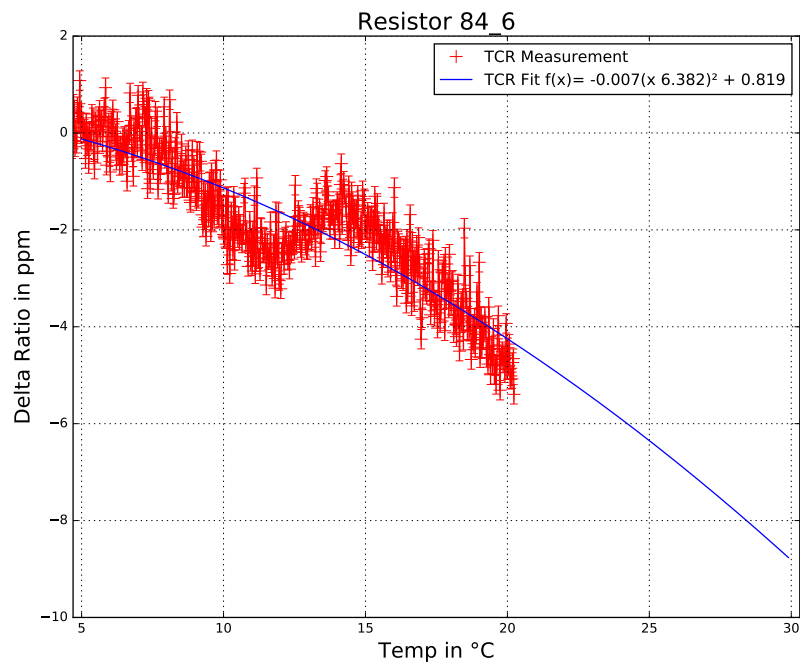


Abbildung 8.142: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

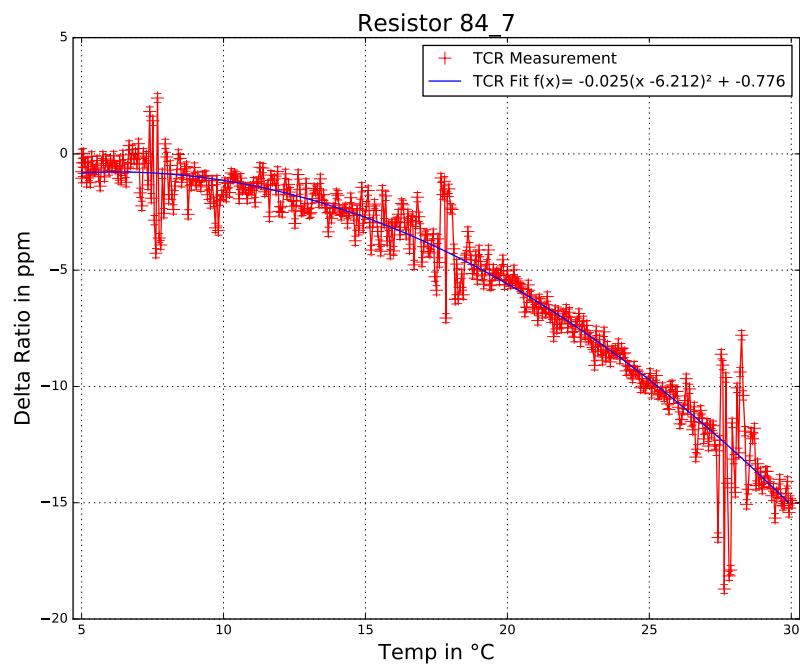


Abbildung 8.143: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

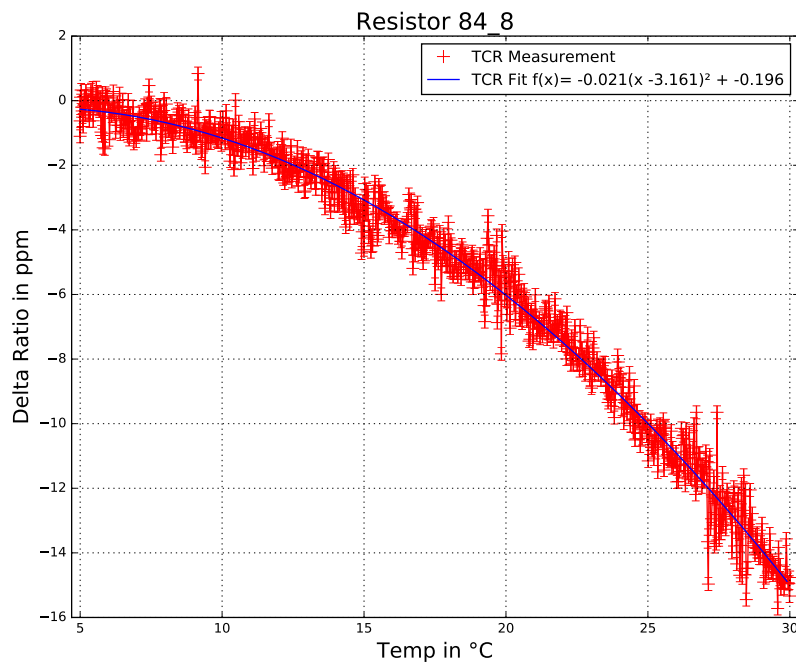


Abbildung 8.144: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

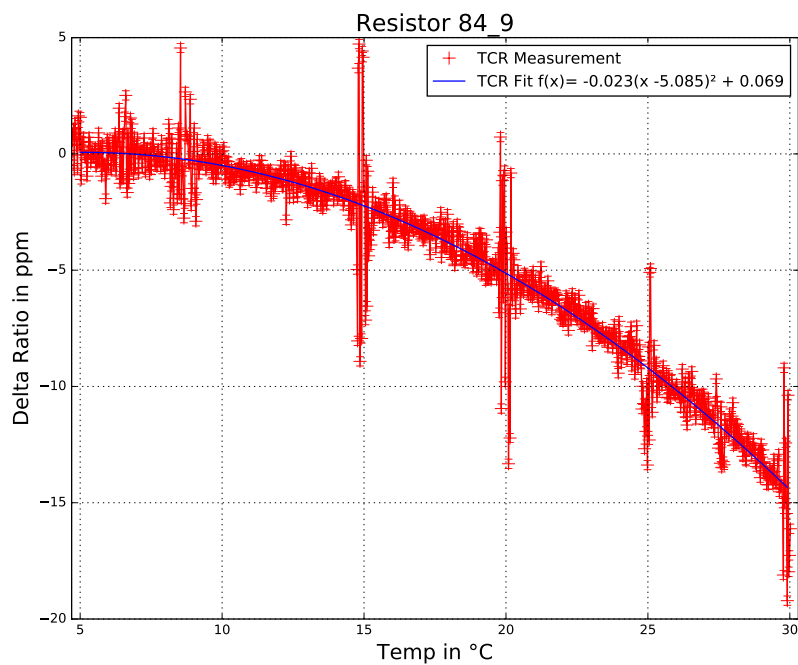


Abbildung 8.145: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 84 mit Referenzwiderstand 77.

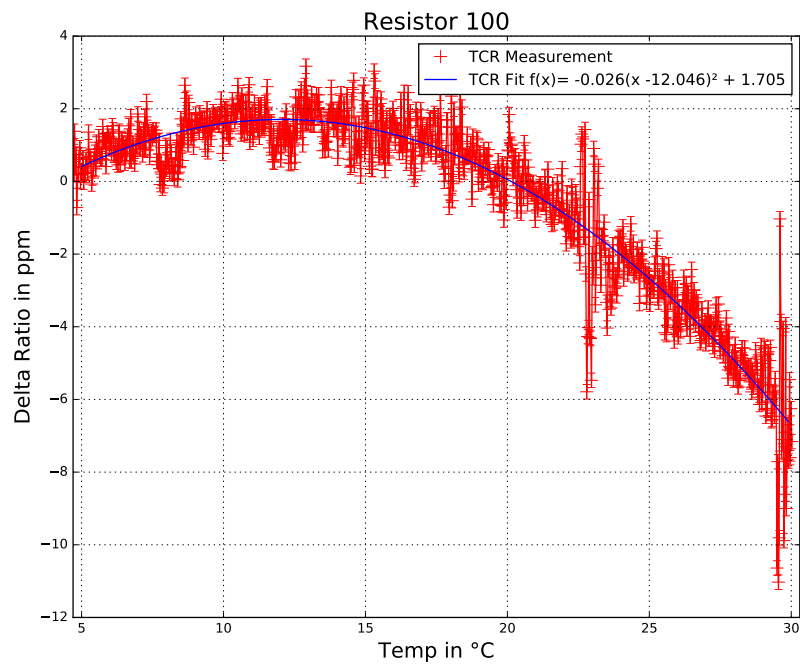


Abbildung 8.146: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 100 mit Referenzwiderstand 77.

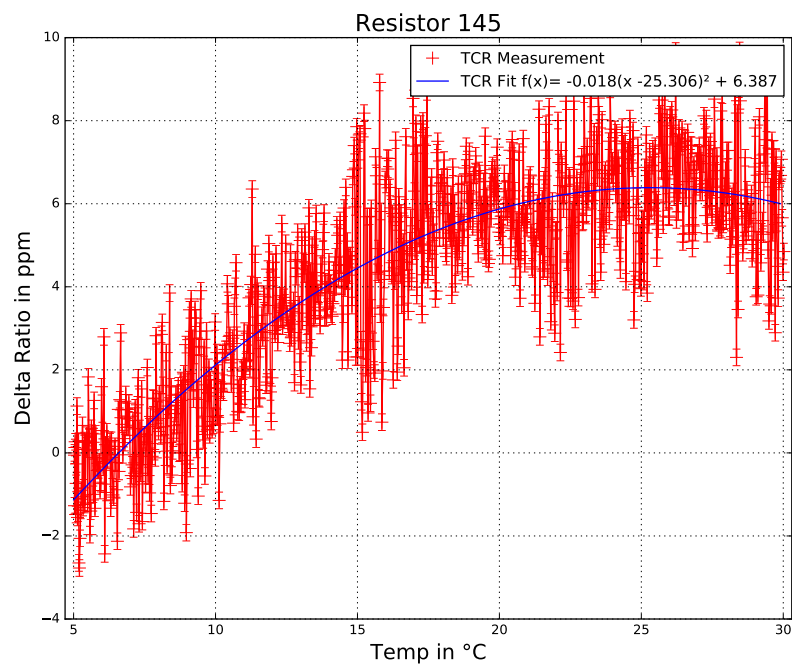


Abbildung 8.147: Temperaturkoeffizienten-Messung des Widerstands 145 mit Referenzwiderstand 77.