

---

## Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>                               | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzung und Lösungsweg</b>                                       | <b>7</b>  |
| 3.1      | Angestrebte Forschungsergebnisse _____                                  | 7         |
| <b>4</b> | <b>Methoden</b>   | <b>8</b>  |
| 4.1      | Probenahme und –vorbereitung _____                                      | 8         |
| 4.2      | Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden _____                   | 9         |
| 4.2.1    | Übersicht der angewandten Methoden _____                                | 9         |
| 4.2.2    | Chemische Analyse _____   | 10        |
| 4.2.3    | Bestimmung des Mineralphasenbestandes _____                             | 10        |
| 4.2.4    | Bestimmung der Mikrofazies mittels Dünnschliffmikroskopie _____         | 11        |
| 4.2.5    | Bestimmung der Dichte und der Porosität _____                           | 11        |
| 4.2.6    | Thermische Analyse _____  | 12        |
| 4.2.7    | Dilatometrie _____  | 12        |
| <b>5</b> | <b>Versuchsergebnisse und Diskussion</b>                                | <b>15</b> |
| 5.1      | Chemische Zusammensetzung der Kalksteinproben _____                     | 16        |
| 5.2      | Mineralphasenbestand der Kalksteinproben _____                          | 22        |
| 5.3      | Klassifikation der Kalksteinproben mittels Dünnschliffmikroskopie _____ | 24        |
| 5.4      | Dichten- und Porositäten der Kalksteinproben _____                      | 31        |
| 5.5      | Thermische Analysenergebnisse der Kalksteinproben _____                 | 33        |
| 5.6      | Ergebnisse der Dilatometrie _____                                       | 38        |
| 5.6.1    | Vorversuche _____   | 38        |
| 5.6.2    | Dilatometermessungen _____  | 40        |
| 5.7      | Prüfung von Korrelationen und Abhängigkeiten _____                      | 61        |
| 5.7.1    | Abhängigkeit der Dehnung von der chemischen Zusammensetzung _____       | 61        |
| 5.7.2    | Abhängigkeit der Dehnung von den Mineralphasen _____                    | 62        |
| 5.7.3    | Abhängigkeit der Dehnung von den petrographischen Daten _____           | 62        |
| 5.7.4    | Abhängigkeit der Dehnung von der Dichte und von der Porosität _____     | 67        |
| 5.8      | Klassifizierung und Bildung von Gruppen _____                           | 67        |
| <b>6</b> | <b>Praxisanbindung/Auswertung von Erfahrungsberichten</b>               | <b>69</b> |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>  | <b>70</b> |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>73</b> |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>9</b> | <b>Anhang</b>  | <b>75</b> |
| 9.1      | Chemische Zusammensetzung der Kalksteinproben _____    | 75        |
| 9.2      | Röntgendiffraktogramme _____                           | 79        |
| 9.3      | Dünnschliffabbildungen _____                           | 109       |
| 9.3.1    | Handstücke der Lagerstätte A _____                     | 109       |
| 9.3.2    | Handstücke der Lagerstätte B _____                     | 111       |
| 9.3.3    | Handstücke der Lagerstätte D _____                     | 123       |
| 9.3.4    | Handstücke der Lagerstätte G _____                     | 126       |
| 9.3.5    | Handstücke der Lagerstätte H _____                     | 129       |
| 9.3.6    | Handstücke der Lagerstätte J _____                     | 131       |
| 9.4      | Dichten _____  | 141       |
| 9.4.1    | Rohdichten _____                                       | 141       |
| 9.4.2    | Reindichten _____                                      | 142       |
| 9.5      | Porositäten und Porengrößenverteilungen _____          | 143       |
| 9.5.1    | Porositäten _____                                      | 143       |
| 9.5.2    | Porengrößenverteilungen _____                          | 144       |
| 9.6      | Dilatogramme _____                                     | 149       |
| 9.6.1    | Ausdehnungskurven der Vorversuche _____                | 149       |
| 9.6.2    | Ausdehnungskurven der neu beprobten Lagerstätten _____ | 156       |
| 9.6.1    | Dehnungsraten der Vorversuche _____                    | 166       |
| 9.6.2    | Dehnungsraten der neu beprobten Lagerstätten _____     | 174       |
| 9.7      | DSC Diagramme _____                                    | 184       |

## 1 Einleitung

Im Schachtofen erfolgt die Calcination von Kalkstein in einer Materialsäule aus Stückgut. Dabei soll in dem Maß Material durch den Schacht sacken, wie es unten abgezogen wird. Ein gleichmäßiger Ofengang, d.h. eine zeitlich und räumlich kontinuierliche Schüttgutbewegung im Ofen sind für eine hohe Produktqualität erforderlich.

Wird durch Brückenbildungen, d.h. einer Rückwirkung des Materials auf das Sinkverhalten der darüberliegenden Materialsäule, oder durch Akkretionen eine diskontinuierliche Schüttgutbewegung erzeugt, ist das Risiko einer Schachtblockade groß.

Die Brückenbildungen, die meistens in der Vorwärm- und Brennzone entstehen, sind auf chemische bzw.- mineralogische Ursachen, wie z.B. das Aufschmelzen von Brennstoffaschen, die oberflächliche Glasbildung durch anhaftende Tonminerale, kondensierende Kreislaufsalze, sowie das oberflächliche Verfritten von Ofengut, zurückzuführen. Auch eine ungleichmäßige Wärmeverteilung über den Ofenquerschnitt beschleunigt das Zusammenwachsen der Steine durch Schmelzphasenbildung. Der sich hierbei aufbauende mechanische Druck zeigt zu der vertikalen auch eine laterale Komponente, bedingt durch die thermische Ausdehnung des Kalksteines bis hin zur beginnenden Calcination. Ein diskontinuierlicher Ofenausrag durch Brückenbildung und/oder Akkretionen („Bären“) stellt ein unerwünschtes und in einigen Anlagen den Ofenbetrieb erhebliches beeinflussendes Problem dar. Insbesondere das periodische, schlagartige Absacken der aufgestauten Brenngutmassen führt zu mechanischer Überbeanspruchung der Ofenkonstruktion. Dies kann im ungünstigsten Fall bis zum Ofenstillstand führen, der einen Produktionsausfall von mehreren Wochen bedingt. Ein gleichmäßiger Ofengang ist nur dann möglich, wenn es gelingt eine gleichmäßige Schüttbewegung zu erzeugen.

Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, den Einfluss unterschiedlicher Kalksteine bzw. unterschiedliche Kalksteinparameter auf die thermische Ausdehnung und damit auf das Bewegungsverhalten im Schachtofen näher zu betrachten. Sind die Parameter bekannt und mit dem Ausdehnungsverhalten des Kalksteines korrelierbar, sollen diese in ein lagerstättenunabhängiges Modell zum Ausdehnungsverhalten des Kalksteines in Abhängigkeit seiner chemisch– petrographischen Parameter eingebunden werden.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

Brantkalk wird durch die thermische Zersetzung von Calciumcarbonat hergestellt. Die Reaktion verläuft endotherm unter Aufnahme einer Wärmemenge von 178 kJ/mol. Die Dissoziations- oder auch Calcinationstemperatur liegt zwischen 896 °C und 910 °C [STARCK, 2005].

Die Ausdehnung des Kalksteines unterhalb bzw. in der Nähe der Calcinationstemperatur wurde bisher nur unzureichend untersucht. Das Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Volumenabnahme während des Sintervorganges gelegt.

[POHL, 1956] veröffentlichte erste wissenschaftliche Arbeiten zur Volumenänderung von Kalksteinen unterhalb der Calcinationstemperatur. Die größten bleibenden Dehnungen treten zwischen 600 und 700 °C auf und sind nach Pohl auf die unterschiedliche Dehnung bzw. Schwindung in Richtung der unterschiedlichen kristallographischen Raumrichtungen zurückzuführen.

[D'ANS & LAX, 1998] ermittelten für Calcit im Temperaturbereich von 20-300 °C parallel zur c-Achse einen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  von  $+21 \cdot 10^{-6}/K$  und senkrecht zur c-Achse einen Koeffizienten von  $-3,8 \cdot 10^{-6}/K$ .

[SCHIELE & BERENS, 1972] berichten über Kalksteine mit oolithischer Textur, die häufig Dehnungserscheinungen beim Brennen aufweisen. [BOYNTON, 1980] untersuchte oolithischen Kalkstein und ermittelte einen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  von  $5 \cdot 10^{-6}/K$  bei Temperaturen zwischen 20 °C und 50 °C.

[MURRAY, 1957] untersuchte den Vorgang der Entsäuerung (vgl. Abb.2.1). Bis zu Beginn der Zersetzung nimmt das Volumen des Kalksteines zu. Dann setzt die Entcarbonisierung des Kalksteines an der Oberfläche ein und setzt sich in Richtung des Kernes fort. Die zunächst noch sehr kleinen Calciumoxid-Teilchen werden von dem noch nicht entsäuerten Kern an ihrem Platz gehalten. Wenn die Entsäuerung beendet ist, wachsen die Calciumoxid-Kristallite und eine weitere Temperaturerhöhung des Kalksteines führt zur Sinterung des Materials und zur Abnahme des Volumens.

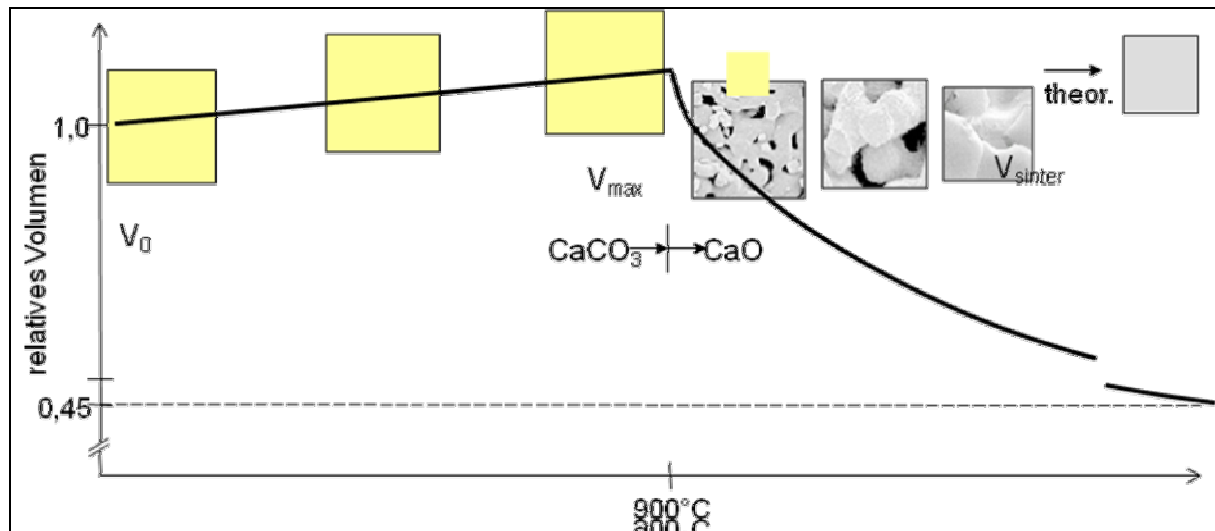


Abbildung 2.1: Einfluss der Temperatur auf die Kalkstein- und Branntkalkeigenschaften [Wolter, 2008]

[LEHMANN & GATZKE, 1957] entwickelten eine Methode zur direkten Bestimmung des Dehnungs- bzw. Schwindverhaltens in Kombination mit der Differentialthermoanalyse. Sie wiesen einen kontinuierlichen Volumenanstieg für Calciumcarbonat bis zu einer Temperatur von 845 °C nach.

Schon geringe Mengen an Begleitmineralen haben einen Einfluss auf das Kristallwachstum. [MURRAY, 1957] stellte fest, dass sich Kalksteine, die einen höheren Natriumoxidgehalt im Vergleich zu Kalksteinen mit niedrigem Natriumoxidgehalt aufweisen, beim Brennen eher dehnen. Nach [LEHMAN, WUHRER & LAHL, 1958] trifft diese Aussage nicht allgemein zu, da auch andere Begleitminerale als Mineralisatoren in Betracht kommen.

Die Ursache des unterschiedlichen Dehnungsverhaltens führen LEHMANN et. al. auf Beimengungen im Kalkstein zurück, die das Wachstum der Calciumoxid- Kristalle im Temperaturbereich von 800-1100 °C erhöhen. Folglich entstehen große Kristalle und ein enges Kornband, die zu einer sperrigen Lagerung und zu einer Volumenzunahme führen können. Sie ermittelten, dass die Zersetzungstemperatur bei sich dehrenden Kristallen geringer ist als bei Kalksteinen die schwinden. [LEHMANN, WUHRER & LAHL, 1958] führen das Volumenverhalten nach der Calcination ebenfalls auf die Abhängigkeit vom Kristallwachstum und deren Abhängigkeit von den Beimengungen zurück.

[WIEDEN & WEININGER, 1962] haben die Volumenänderung von Kalksteinen in Abhängigkeit von der Temperatur auch unterhalb der Calcinationstemperatur betrachtet. Für die im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichten Untersuchungen wurden Kalksteine aus Lagerstätten in der Umgebung von Wien verwendet. Die Autoren führten das Dehnungsverhalten unterhalb der Entsäuerungstemperatur auf sekundäres Kristallwachstum in Teilbezirken des Kalksteines zurück.

Den Einfluss der Temperatur auf den Typ der Kristallstruktur untersuchten [MARKGRAF & REEDER, 1985] anhand von Calcit und Magnesit. Mittels Röntgendiffraktometrie wurden sowohl die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten von der jeweiligen Temperatur als auch der thermische Einfluss auf die atomaren Abstände innerhalb der Elementarzelle des Kristalls durch Korrekturrechnungen analysiert. Die Ergebnisse zeigen nach einer Erwärmung auf bis zu 800 °C bei Calcit vor allem eine Veränderung der Schraubenachse der Kristallstruktur und damit eine deutliche Temperaturabhängigkeit der C-O- Abstände der Carbonatgruppe. Allerdings beschränken sich die Untersuchungen auf die Probe einer sparitischen Zementfüllung einer Molluskenschale, so dass eine Generalisierung nicht gegeben ist.

[LUO, QIN UND LIU, 2011] ermittelten mit der nachfolgend dargestellten Apparatur den Ausdehnungsdruck von biomikritischem Kalkstein bei Temperaturen von 200-700 °C. Das Messsystem dieser Apparatur (Abb. 2.2) nimmt den Ausdehnungsdruck des Kalksteins in zwei unterschiedliche Richtungen mit Hilfe eines piezoelektrischen Sensors auf.

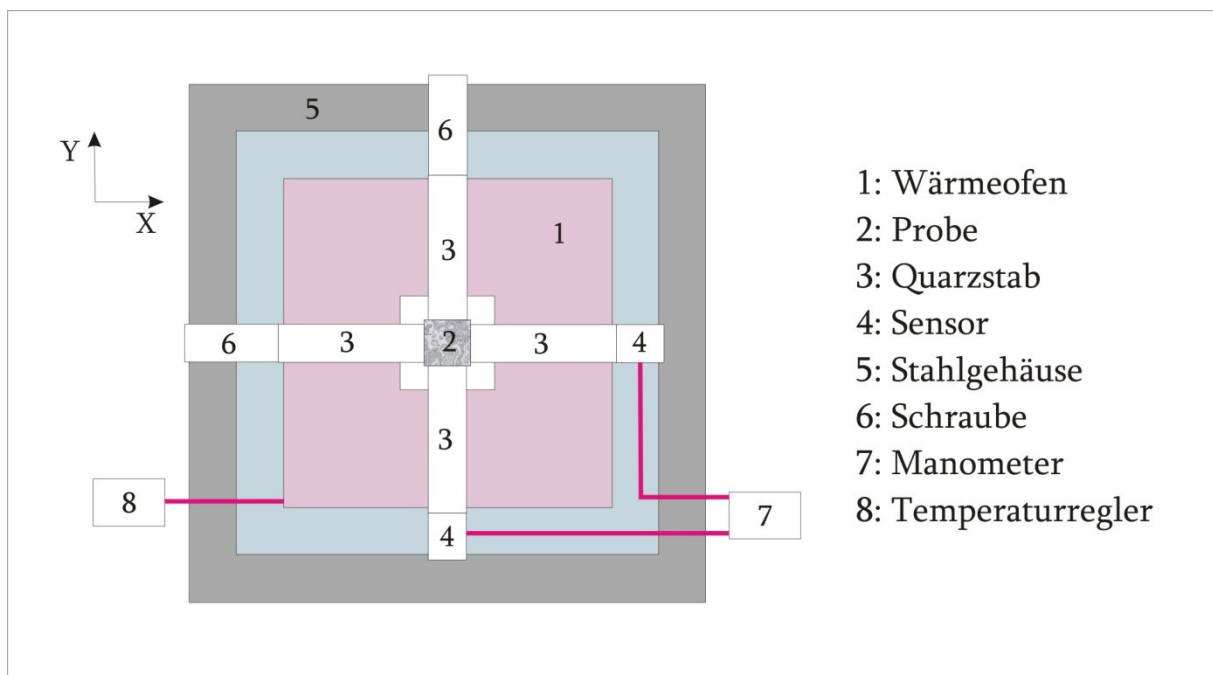


Abbildung 2.2: Messsystem zur experimentellen Bestimmung des Ausdehnungsdruckes (LUO,2011)

Bei einer Erhöhung der Temperatur von 200 bis 600 °C steigt der Ausdehnungsdruck der biomikritischen Kalksteine in X- und Y- Richtung, wobei der Ausdehnungsdruck in Y- Richtung größer ist. In X- Richtung fällt der Ausdehnungsdruck ab 600 °C und in Y-Richtung ab 650 °C. Die Ausdehnungsdruckkurven zeigen bei 250 °C einen Umkehrpunkt. Ab dieser Temperatur steigt die Ausdehnungsdruckrate.

### 3 Zielsetzung und Lösungsweg

#### 3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Ziel des Vorhabens ist es, Kalksteinparameter zu ermitteln, welche das thermische Ausdehnungsverhalten beeinflussen und aus den Untersuchungen ein lagerstättenunabhängiges Modell zum Ausdehnungsverhalten des Kalksteines zu entwickeln. Hierzu sollen die Kalksteine chemisch und petrographisch untersucht, Ausdehnungskurven der verschiedenen Kalksteine aufgenommen und die chemischen und petrographischen Daten mit den ermittelten Ausdehnungen und Ausdehnungsraten korreliert werden. Anhand der herausgearbeiteten Abhängigkeiten soll durch Klassifizierung und Bildung von verschiedenen Kalksteingruppen ein Modell entwickelt werden, mit dem die Rohmaterialzusammenstellung bei der Ofenausgabe so ausgerichtet werden kann, dass ein gleichmäßiger Materialfluss durch den Ofen erreicht werden kann.

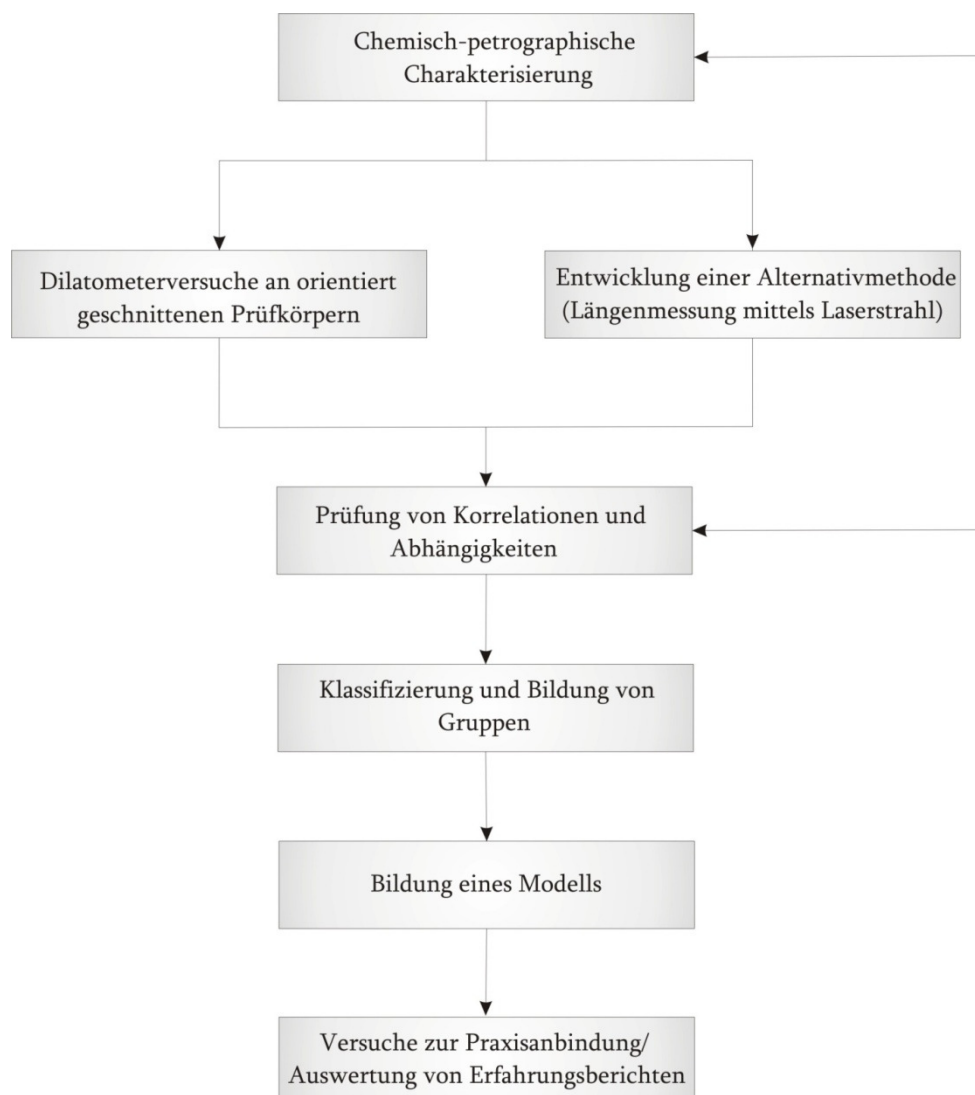


Abbildung 3.1: Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels

## 4 Methoden

### 4.1 Probenahme und –vorbereitung

Die geplanten Untersuchungen werden mit unterschiedlichen Kalksteinen aus bundesdeutschen Lagerstätten durchgeführt, um möglichst viele Faziesgruppen von Kalksteinen in die Untersuchungen einzubeziehen, die für die Branntkalkproduktion genutzt werden. Die Probenahme erfolgt sowohl aus den Ofenlagern als auch aus verschiedenen Schichten des Steinbruchs. Die unterschiedlichen Handstücke einer Probe zeigen eine große Varietät der Kalksteineigenschaften. Die Steine der Ofenlager sind häufig Mischungen aus verschiedenen Bereichen der Lagerstätte.

Folgende Kalksteinproben wurden ausgewählt:

**Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Kalksteinproben [HOGEWONING](nach GOTTHARDT und KASIG, 1996, WALTER, 1995)**

| Probenbezeichnung | Alter/Stratigraphie           | Petrographie/Geologie  |
|-------------------|-------------------------------|--|
| <b>A</b>          | Kreide (Cenoman)              | Pelagische Flachmeersedimentation  |
| <b>M</b>          | Jura (Dogger)                 | Oolithische Kalke mit geringmächtigen mergeligen Zwischenlagern  |
| <b>E</b>          | Jura (Malm)                   | Fossilreiche Riffkalke   |
| <b>G</b>          | Jura (Malm)                   | Schwammriffkalk mit Biomikriten und Onkoiden, z.T. sparitisch  |
| <b>H</b>          | Jura (Malm)                   | Bank- und Plattenkalke in Schichtfazies  |
| <b>J</b>          | Jura (Malm)                   | Massige Korallenkalksteine   |
| <b>K</b>          | Jura (Malm)                   | Bankkalke und feinbrecciose, mit Calcit verkittete Kalke   |
| <b>L</b>          | Jura (Malm)                   | Schwamm- und Stromatoporenkalke  |
| <b>O</b>          | Trias (Muschelkalk)           | Plattig-dichte und kristallin-oolithische Kalksteine in Wechsellagerung  |
| <b>Y</b>          | Trias (Muschelkalk)           | Schichtenfolge: Von Wellenkalk über Schaumkalk zu Hauptmuschelkalk   |
| <b>P</b>          | Perm (Zechstein)              | Dolomit der Schwellenfazies  |
| <b>R</b>          | Karbon (Unterkarbon)          | Kohlenkalk mit Rudit-Arenit, Oolith und Lurit in zyklischer Abfolge, z.T. Crinoiden und tabulate Korallen  |
| <b>D</b>          | Devon (Mitteldevon)           | Pelagischer Massenkalk (ehemaliges Tiefschwellengebiet)  |
| <b>W</b>          | Devon (Mitteldevon)           | Massiger Stromatoporenriffkalk mit faserig-lagig eingeregeltten Komponenten (Brachiopodenschill, Korallen, Stromatoporen), lutitisch-arsenitisch |
| <b>T</b>          | Devon (Mittel- bis Oberdevon) | Massenkalk   |
| <b>U</b>          | Devon (Mittel- bis Oberdevon) | Massenkalk   |
| <b>V</b>          | Devon (Mittel- bis Oberdevon) | Massig, dickbankiger Kalkstein mit Bioklasten (Stromatoporen und Korallen)   |
| <b>B</b>          | Devon (Mittel- bis Oberdevon) | Massenkalk, ehemaliges Atollriff   |
| <b>C</b>          | Devon (Mittel- bis Oberdevon) | Massenkalk der Schwelfazies  |
| <b>S</b>          | Devon (Oberdevon)             | Massig-dichter Riffkalk des back-reef Bereiches, z.T. mit Stromatoporen, Korallen und Brachiopoden   |
| <b>I</b>          | Unbekannte Herkunft           | Dolomit  |

## 4.2 Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden

### Übersicht der angewandten Methoden

Die angewandten Messmethoden sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Für genormte Verfahren bzw. bei validierten Prüfvorschriften sind die jeweiligen Verweise angegeben. Methoden ohne allgemeingültige Prüfvorschriften werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

**Tabelle 4.2: Übersicht der angewendeten Analysenmethoden**

| Parameter                           | Analysenmethode         | Prüfvorschrift/<br>Beschreibung                         | Hinweise                    |
|-------------------------------------|-------------------------|---|-----------------------------|
| CaO                                 | Titration               | DIN EN 12485<br>BVK-<br>Prüfverfahrensammlung<br>Teil 2 |                             |
| MgO                                 | ICP- OES                | BVK-<br>Prüfverfahrensammlung<br>Teil 3                 |                             |
| SiO <sub>2</sub>                    |                         |   |                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      |                         |   |                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      |                         |   |                             |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      |                         |   |                             |
| Na <sub>2</sub> O                   |                         |   |                             |
| K <sub>2</sub> O                    |                         |   |                             |
| SO <sub>3</sub>                     |                         |   |                             |
| CO <sub>2</sub>                     | Coulometrie             | BVK-<br>Prüfverfahrensammlung<br>Teil 2                 |                             |
| Glühverlust                         | Gravimetrie             | DIN EN 12485<br>BVK-<br>Prüfverfahrensammlung           |                             |
| Mineralphasen-<br>bestimmung        | Röntgendiffraktometrie  | Kapitel 4.2.3   | Qualitative<br>Bestimmung   |
| Rohdichte                           | Feststoffpyknometrie    | Kapitel 4.2.5   |                             |
| Porosität                           | Quecksilberporosimetrie | Kapitel 4.2.5   |                             |
| Petrographische<br>Beschreibung     | Dünnschliffuntersuchung | Kapitel 4.2.4   | Qualitative<br>Beschreibung |
| Endotherme und<br>exotherme Effekte | DSC                     | Kapitel 4.2.6   | Qualitative<br>Beschreibung |
| Ausdehnungs-<br>messungen           | Dilatometrie            | Kapitel 4.2.7   |                             |

## Chemische Analyse

Siehe Tabelle 4.2.

## Bestimmung des Mineralphasenbestandes

Die Bestimmung der Mineralphasen erfolgte mittels Röntgen- Pulverdiffraktometrie an Pulverpresslingen der zuvor aufgemahlene Kalksteinproben. Tabelle 4.3 zeigt die Geräte- und Scan-Parameter.

### 4.3: Geräte- und Scanparameter der Mineralphasenbestimmung

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Röntgengerät               | Philips PW 3710  |
| Strahlung                  | Cu K $\alpha$  |
| Röhrenspannung             | 40kV   |
| Röhrenstrom                | 40 mA  |
| Primärstrahloptik          | Sollerblende 0,04 rad<br>Feste Divergenzblende 0,5°  |
| Streustrahloptik           | Fester Empfängerspalt 0,2 mm<br>Feste Streustrahlblende 0,5°<br>Graphit- Monochromator<br>Xe- Miniproportionalzähler |
| Rotation des Probenträgers | 1/sec  |
| 2 $\theta$ - Messbereich   | 3-65°  |
| Schrittweite               | 0,02°  |
| Zeit pro Schritt           | 1 sec  |
| Scangeschwindigkeit        | 0,02°/sec  |

Von jeder Kalksteinprobe wurden die Haupt- und Nebenbestandteile qualitativ bestimmt. Der erste Scan des Röntgendiffraktometers zeigt den qualitativen Anteil der Hauptbestandteile (i.A. Calcit, Dolomit und Quarz).

Für die Untersuchung der Nebenbestandteile (2. Scan) wurden die Calcit- Anteile der Proben mit 50%- iger Essigsäure gelöst. Der säureunlösliche mit Mineralien ( i.A. Glimmer, Chlorit, Goethit, Feldspäte) angereicherte Rückstand wurde qualitativ analysiert.

Von einigen sehr reinen Kalksteinen blieb zu wenig säureunlöslicher Rückstand übrig, so dass auf die Präparation eines Pulverpresslings verzichtet werden musste. Stattdessen wurde der Rückstand mit Isopropanol auf einen Si- Träger aufgebracht. Von den Proben D1 und D2 konnte aufgrund einer zu geringen Menge an Probenmaterial kein Röntgenscan zur Analyse der Nebenbestandteile durchgeführt werden. Da der Rückstand nur 0,2 Gew.- % der Ausgangsmasse ausmachte, wird davon ausgegangen, dass er das thermische Ausdehnungsverhalten nicht beeinflusst.

Bei einigen Proben (P2, J1, I1, I2, ) war der in 50 %iger Essigsäure nur schwerlösliche Dolomit in den Rückständen anteilmäßig so hoch, dass sich keine oder nur wenige der Nebenbestandteile detektieren ließen.

Die Auswertung der Röntgendiffraktogramme erfolgte mit der Software „X’Pert HighScore 1 0b“.

Die in den Proben nachgewiesenen Minerale wurden nach [Hogewoning, 2008] in Haupt- und Nebenbestandteile eingeordnet.

### **Bestimmung der Mikrofazies mittels Dünnschliffmikroskopie**

Die Anfertigung der Dünnschliffe erfolgte direkt aus den Handstücken in unmittelbarer Nähe zu den Dilatometerproben. Die Dünnschliffe wurden halbseitig mit Alizarin S angefärbt. Die abgedeckten Dünnschliffe wurden mittels Polarisationsmikroskopie mit parallelen und gekreuzten Polarisatoren untersucht und nach Dunham klassifiziert.

### **Bestimmung der Dichte und der Porosität**

Die Rohdichte wird mittels eines Feststoffpyknometers (GeoPyc 1360 von Micromeritics) bestimmt. Das Volumen der Probe wird durch einen Kolbenvorschub in einer Messzelle unter definiertem Druck mit und ohne Probe gemessen. Über die Differenz der Weglänge des Kolbenvorschubs mit und ohne Probe erfolgt die Bestimmung der Rohdichte.

Die Reindichte wird mit einem Pyknometer von Porotec gemessen.

Die Gesamtporosität eines Stoffes setzt sich zusammen aus der Summe der Hohlräume, die untereinander und mit der Umgebung in Verbindung stehen (*offene Porosität, Nutzporosität*) und den nicht miteinander verbundenen Hohlräumen (*abzementierte* oder *geschlossene Porosität*). Die Quecksilberporosimetrie wird zur Bestimmung der offenen Porosität angewendet. Hierbei wird Quecksilber (nicht benetzende Flüssigkeit) in die Poren des Feststoffes gedrückt, wobei zuerst die großen und bei höheren Drücken die kleineren Poren gefüllt werden. Beschrieben wird

die Abhängigkeit von Druck und Porengröße, unter der Annahme, dass die Poren die Form von zylinderförmigen Kapillaren aufweisen, durch die Washburn-Gleichung:

$$r = \frac{2\gamma}{p} \cdot \cos \Theta$$

wobei  $p$  den sich isostatisch einstellende Gleichgewichtsdruck,  $\gamma$  die Oberflächenspannung des Quecksilbers,  $\Theta$  den Benetzungs- oder Kontaktwinkel und  $r$  der durchschnittliche Porenradius darstellt.

Aus den sogenannten Intrusionskurven erfolgt die Berechnung der Porengrößenverteilung.

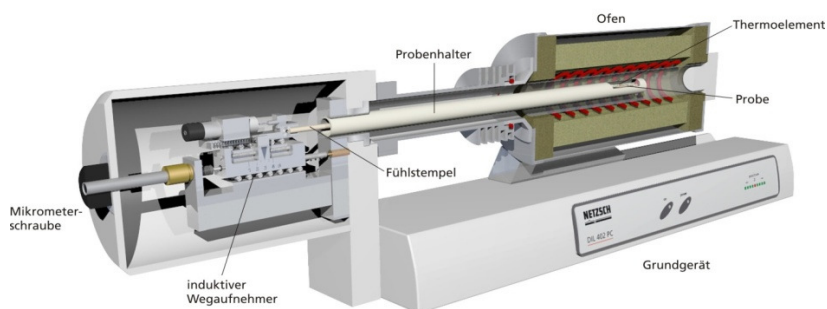
### Thermische Analyse

Die Ermittlung endothermer und exothermer Effekte an ausgesuchten Kalksteinproben erfolgt mittels einem Differentialkalorimeter DSC 404 der Fa. Netzsch.

Dabei sollen reversible und irreversible Effekte betrachtet werden, indem die Probe bis 750 °C aufgeheizt, abgekühlt und wieder aufgeheizt wird.

### Dilatometrie

Um Aussagen über die thermische Ausdehnung in zwei unterschiedliche Richtungen zu erhalten (Längs- und Querrichtung) wurden aus einem Handstück mindestens zwei, jeweils in senkrechter Richtung zueinander stehende, Prüfkörper geschnitten. Die Messungen erfolgten mittels klassischer Dilatometrie mit einem Dilatometer der Fa. Netzsch (Modell 402).



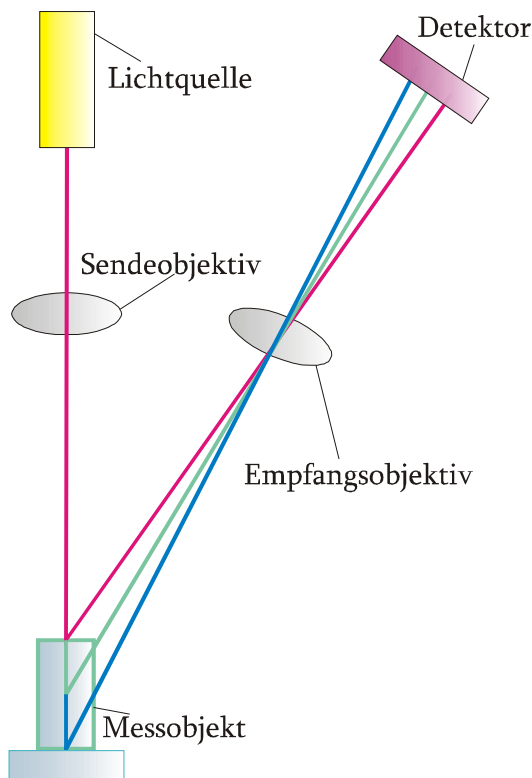
**Abbildung 4.1: Aufbau des klassischen Dilatometers von Netzsch**

Da klassische Messungen immer die Probe kontaktieren und die thermische Historie des Messsystems von Bedeutung ist, kann es bei diesem Messverfahren zu Variationen in der Reproduzierbarkeit kommen. Deshalb sollte eine zweite berührungslose Messmethode entwickelt werden. Die hierfür durchgeführte Literaturrecherche führte zu den im folgenden Abschnitt beschriebenen Ergebnissen.

Für den Aufbau einer berührungslosen Messanordnung wurden verschiedene Lösungsansätze entwickelt. Diese sollen nachfolgend skizziert werden.

## a) Messung mittels Lasertriangulation

Lasertriangulations-Sensoren arbeiten mit einer Laserdiode, die einen sichtbaren Lichtpunkt auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert. Das reflektierte Licht wird über eine Empfangsoptik auf ein positionsempfindliches Gerät abgebildet.



Bei Ausdehnung oder Schrumpfung durch Temperatureinwirkung des Messobjektes verändert der Lichtpunkt seine Position. Diese Veränderung kann auf dem Empfangselement abgebildet und ausgewertet werden.

Mit dieser Methode wäre es möglich, die Ausdehnung eines auf die Spitze gestellten Würfels mit einem auf den Körper fokussierten Laserstrahl in drei Raumrichtungen zu messen. Ein Problem ergibt sich dadurch, dass die Lasertriangulation, bei der geforderten Genauigkeit, nur für geringe Entfernungen geeignet ist. Diese erforderliche geringe Entfernung kann beim Aufbau der Versuchsanordnung nicht eingehalten werden.

**Abbildung 4.2: Messprinzip der Lasertriangulation**  
modifiziert nach [DÜCKER]

## b) optische Wegmessung mittels Echtzeit- Lichtvorhang

Die Mikrometer arbeiten nach dem Durchlichtverfahren. Von einem Sender (Laser) wird ein paralleler Lichtvorhang erzeugt, der auf eine Empfängereinheit trifft. Wird ein Messobjekt in den Lichtstrahl geführt, wird der Strahl unterbrochen, die daraus resultierende Abschattung von der Empfangsoptik erfasst und als geometrischer Wert ausgegeben.

Mit einer optischen Wegmessung ist eine Erfassung der Ausdehnung in zwei Richtungen möglich. Diese Messapparatur eignet sich hauptsächlich zur Bestimmung von Durchmessern.

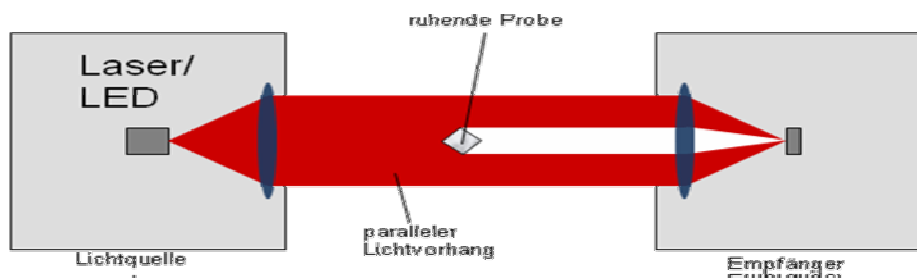


Abbildung 4.3: Echtzeit- Lichtvorhang [MICRO-EPSILON]

c) Messung der Dehnung mittels Laser und Anwendung der Interferometrie (Abb.4.4)

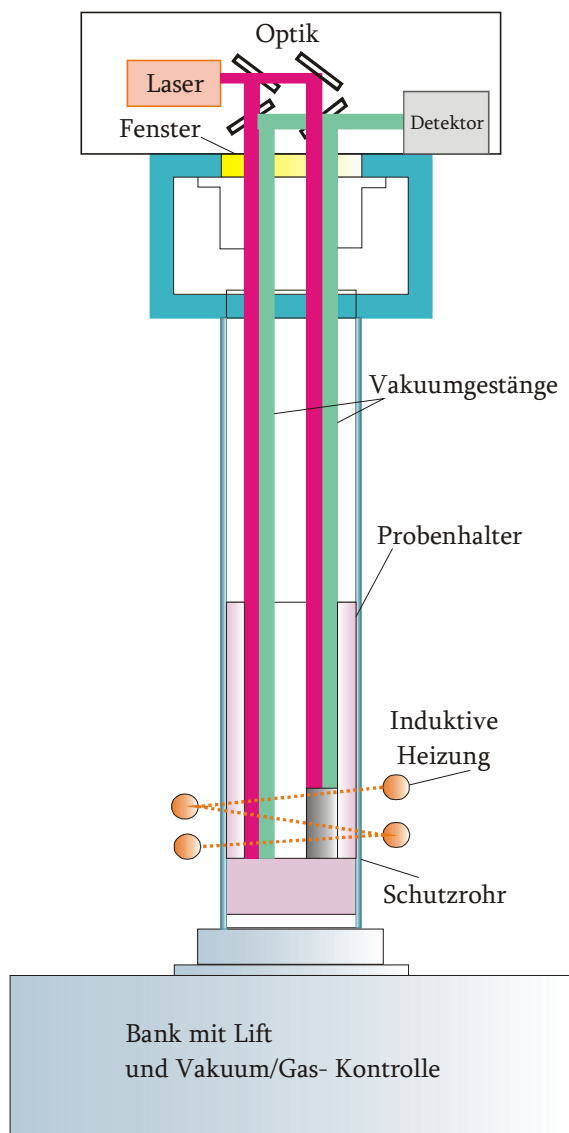


Abbildung 4.4: Laserdilatometer [Linseis]

Die Messung des Ausdehnungsverhaltens von Kalkstein ist mittels eines He-Ne- Lasers und Anwendung der Interferometrie möglich. Die Konstruktion und der Aufbau einer solchen Messapparatur würden den Zeit- und Kostenrahmen dieses Projektes unverträglich überschreiten.

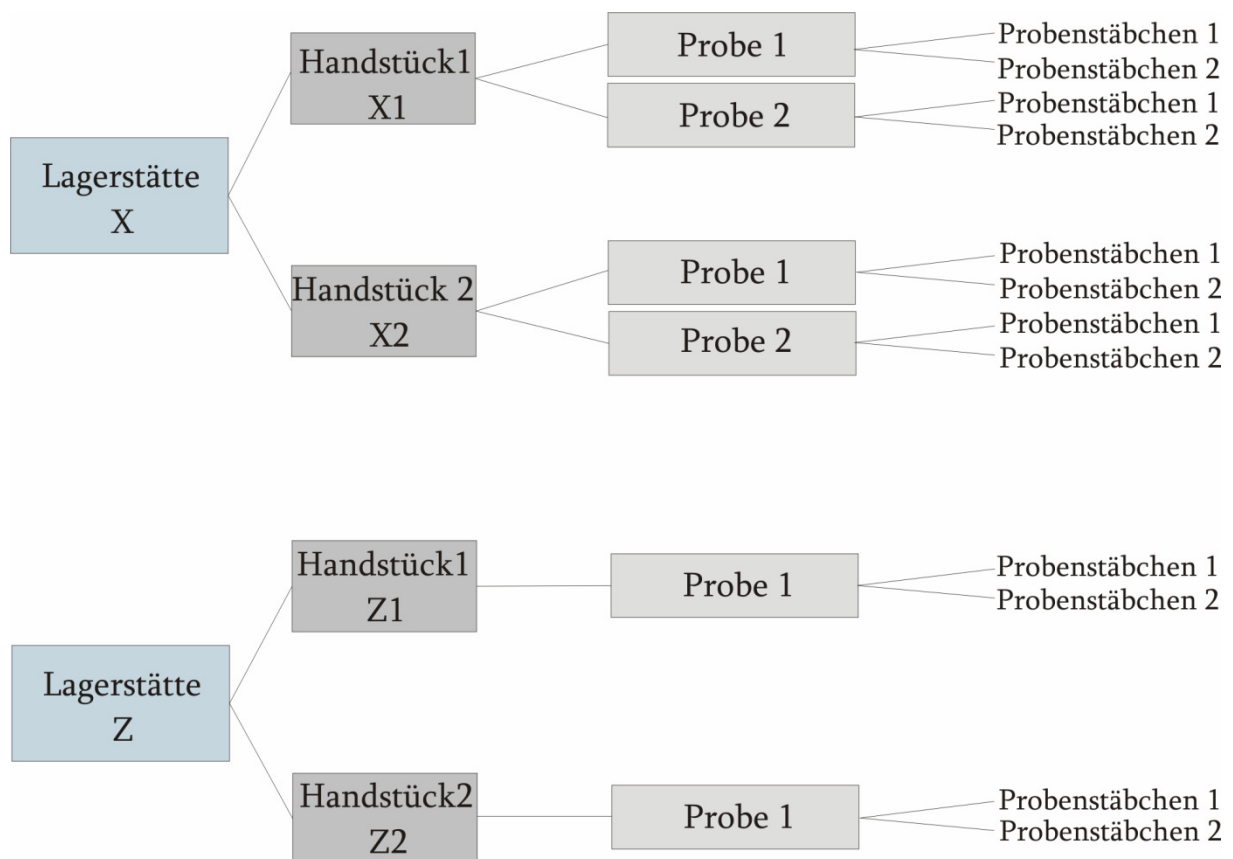
Recherchen haben ergeben, dass die Firma Linseis ein neuartiges Laser Dilatometer entwickelt hat, dass bezüglich der Auflösung und der absoluten Genauigkeit, die klassischen Dilatometer übertrifft (siehe Abb.4.4). Das Dilatometer erreicht eine Auflösung im Picometerbereich und eine Genauigkeit bis zu 30 nm. Ein weiterer Vorteil dieser Apparatur besteht darin, dass die Messungen in unterschiedlichen Gasatmosphären durchgeführt werden können.

## 5 Versuchsergebnisse und Diskussion

Die untersuchten Gesteinsproben werden wie folgt bezeichnet:

- Großbuchstabe (Abb.5.1) kennzeichnet die Lagerstätte.
- Ziffer X1 und X2 kennzeichnen verschiedene Handstücke einer Lagerstätte.
- Probe 1 und Probe 2 stehen für zwei verschiedene Proben, die aus dem entsprechenden Handstück präpariert wurden
- Aus den Proben 1 und 2 (Verfahrensweise 1), bzw. aus der Probe 1 (Verfahrensweise 2) wurden jeweils zwei senkrecht zueinander orientierte Probenstäbchen gesägt, um die Richtungsabhängigkeit zu untersuchen

Im Folgenden ist eine Übersicht der verschiedenen untersuchten Gesteinsproben dargestellt:



**Abbildung 5.1: Probenschema, Vorgehensweise 1 (Lagerstätte X) und Vorgehensweise 2 (Lagerstätte Z)**

Unter die Vorgehensweise 1 fallen die Kalksteinproben A, B, H, Y

Für die Lagerstätte B wurden nicht nur zwei, sondern sechs verschiedene Handstücke beprobt, um den Einfluss der unterschiedlichen Gehalte an Nebenbestandteilen auf das Ausdehnungsverhalten zu ermitteln. Für die Lagerstätte H stand ein Handstück zur Verfügung. Nur bei ausgewählten Handstücken wurden bei der Vorgehensweise 1 für die verschiedenen Proben eins und zwei die

chemische Analysen, Diffraktometermessungen, Dichte- und Porositätsmessungen jeweils für Probe1 und Probe2 getrennt durchgeführt.

Unter die Vorgehensweise 2 fallen die Kalksteinproben D, G, I, P, J

Da Lagerstätte J neben einem sehr geringen Gehalt an Nebenbestandteilen eine große petrographische Inhomogenität aufweist, wurden sechs verschiedene Handstücke untersucht, um den Einfluss von Gefügeinhomogenitäten auf das Ausdehnungsverhalten differenzierter zu betrachten.

## 5.1 Chemische Zusammensetzung der Kalksteinproben

Die chemische Analyse der Gesteinsproben erfolgte mittels ICP- OES, die Bestimmung des CaO-Gehaltes mittels Titration (siehe Kapitel 4.2, Tabelle 4.2). Die glühverlustfreien Gehalte an CaO der Proben zeigen eine Spannweite von 57,9 bis 99,15 Masse- % ohne Berücksichtigung des CaO-Gehaltes des Metapelits (Handstück B5). Eine tabellarische Übersicht der Analysenergebnisse, sowohl im Anlieferungszustand, als auch im glühverlustfreien Zustand sind im Anhang dargestellt.

Ein Indikator für den Gehalt an Nebenbestandteilen bildet der Kalkstandard. Nach [Hogewoning, 2008] besitzt ein Kalkstein mit einem Kalkstandard  $<10^3$  einen hohen Anteil an Nebenbestandteilen und ein generell sehr feinkörniges Gefüge. Ein Kalkstandard mit einem Wert zwischen  $10^3$  und  $10^4$  weist einen mittleren Anteil an Nebenbestandteilen auf und ein Kalkstandard  $> 10^4$  hat einen geringen Anteil an Nebenbestandteilen. Als weitere Kennwerte wurden zusätzlich der Silikat- und Tonerdemodul nach folgenden Gleichungen berechnet:

**Kalkstandard:**

$$Kst = 100 \times \frac{CaO}{(2,8 \times SiO_2) + (1,18 \times Al_2O_3) + (0,65 \times Fe_2O_3)}$$

**Silikatmodul:**

$$Kst = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

**Tonerdemodul:**

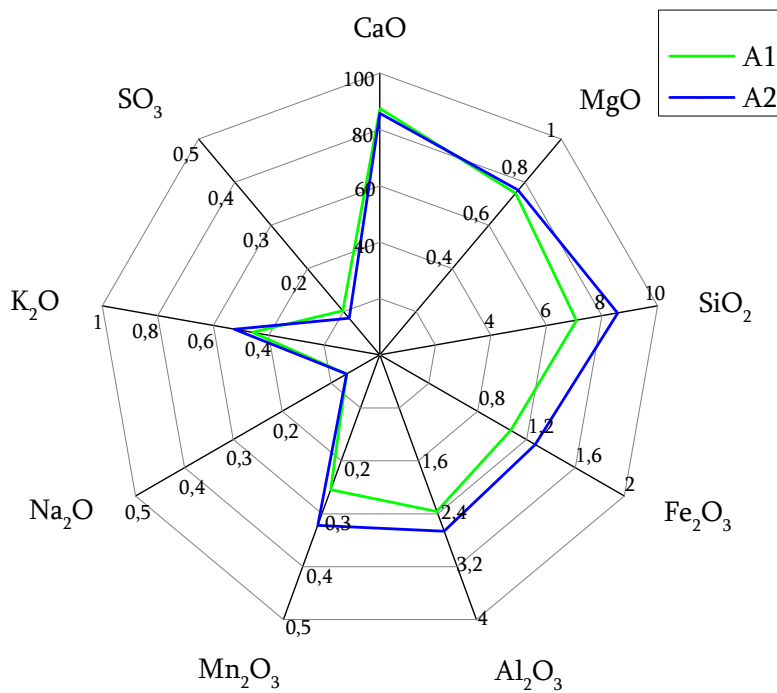
$$Kst = 100 \times \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Für die beprobten Kalksteinlagerstätten sind die Ergebnisse in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 5.1: Kalkstandard, Silikatmodul und Tonerdemodul der Kalksteinlagerstätten

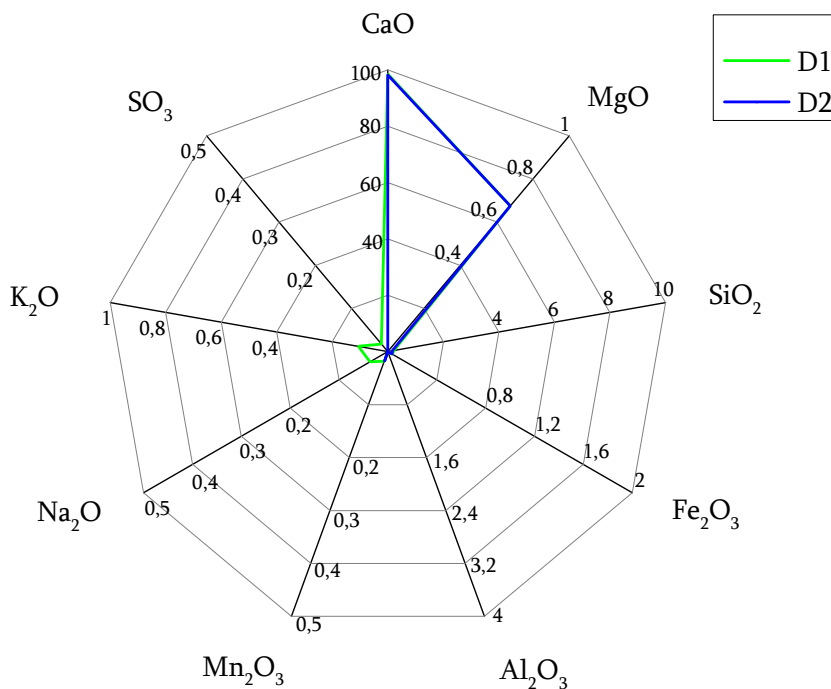
| KST     | Kalkstandard | Silikatmodul | Tonerdemodul |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| am      | 2,96E+02     | 2,06         | 2,21         |
| Ao      | 2,42E+02     | 2,18         | 2,09         |
| B1      | 1,74E+03     | 0,05         | 9,24         |
| B2      | 8,88E+03     | -            | 0,33         |
| B3 Pr.1 | 6,61E+01     | 0,07         | 0,05         |
| B3 Pr.2 | 1,76E+02     | 0,23         | 0,18         |
| B4 Pr.1 | 1,52E+03     | 0,84         | 0,78         |
| B4 Pr.2 | 7,29E+03     | 0,31         | 0,44         |
| B5 Pr.1 | 6,40E+00     | 1,71         | 2,41         |
| B5 Pr.2 | 2,30E+01     | 1,43         | 2,13         |
| B6      | 9,27E+03     | -            | 0,11         |
| D1      | 1,19E+04     | 5,92         | -            |
| D2      | 1,44E+04     | 4,44         | -            |
| G1      | 6,36E+03     | 3,5          | 0,51         |
| G2      | 6,14E+02     | 0,17         | 0,05         |
| H       | 2,19E+03     | 2,31         | 1,6          |
| J1      | 1,22E+04     | -            | -            |
| J2      | 1,16E+04     | 0,83         | 0,2          |
| J3      | 1,07E+04     | -            | -            |
| J4      | 2,28E+03     | 2,67         | 0,12         |
| J5      | 1,15E+04     | 2            | -            |
| J6      | 1,80E+03     | 0,28         | 0,02         |
| I1      | 1,21E+03     | 1,74         | -            |
| I2      | 1,79E+03     | 1,11         | -            |
| P2      | 3,21E+03     | 0,48         | 0,28         |
| P2      | 2,80E+02     | 0,11         | -            |
| Y2      | 1,84E+03     | 1,02         | 0,6          |
| Y2      | 3,56E+02     | 2,3          | 3            |
| Y3      | 4,67E+02     | 1,89         | 2,19         |
| Y4      | 1,23E+03     | 1,47         | 1,32         |

Von der Lagerstätte A wurden 2 verschiedene Handstücke A1 (stammt aus dem mittleren und unteren Cenoman) und A2 (aus dem oberen Cenoman) untersucht. Die Kalkstandards dieser Handstücke liegen im unteren Bereich. Das folgende Radardiagramm zeigt die chemische Ähnlichkeit und den hohen Anteil der Nebenbestandteile der beiden Proben.



**Abbildung 5.2: oxidische Zusammensetzung der Kalksteine A [Masse- %]**

Das Netzdiagramm für die Kalksteinproben D zeigt die oxidische Zusammensetzung der Handstücke D1 und D2. Der Polygonzug ist fast deckungsgleich und weist auf die ähnlichen Gehalte der oxidischen Komponenten der Proben der Lagerstätte D hin. Im Vergleich zur Lagerstätte A sind die Gehalte der Nebenbestandteile deutlich geringer.



**Abbildung 5.3: oxidische Zusammensetzung der Kalksteine D [Masse- %]**

Die Kalkstandards der Handstücke der Lagerstätte G (Tabelle 5.1) weisen einen mittleren Kalkstandard auf. Die Probe G2 (dolomitisch) hat im Vergleich zu Probe G1 einen wesentlich höheren Magnesium- und Eisenoxidgehalt, sowie einen größeren Aluminium-, Kalium-, Schwefel-, Natrium-, und Manganoxidgehalt.

**Tabelle 5.2: chemische Analysenergebnisse der Kalksteine G [Masse- %]**

| KST | CaO    | MgO    | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|-----|--------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| G1  | 98,629 | 0,32   | 0,374            | 0,071                          | 0,036                          | 0,036                          | 0,018             | 0,071            | 0               |
| G2  | 77,443 | 19,909 | 0,311            | 1,79                           | 0,091                          | 0,055                          | 0,091             | 0,11             | 0,219           |

Die chemischen Analysenergebnisse der dolomitischen Handstücke I1, I2, P1 und P2 sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 5.3: chemische Analysenergebnisse der dolomitischen Gesteine [Masse- %]**

| KST | CaO  | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|-----|------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| I1  | 60,0 | 39,1 | 0,76             | 0,44                           | 0                              | 0,15                           | 0,02              | 0,02             | 0,02            |
| I2  | 88,2 | 13,8 | 0,57             | 0,51                           | 0                              | 0,19                           | 0                 | 0,02             | 0               |
| P1  | 88,9 | 9,37 | 0,2              | 0,32                           | 0,09                           | 0,14                           | 0,02              | 0,09             | 0,02            |
| P2  | 57,9 | 33,8 | 0,32             | 3,04                           | 0                              | 2,11                           | 0                 | 0                | 0               |

Der Dolomit P2 weist einen höheren Eisenoxid- und Manganengehalt im Vergleich zu den weiteren beprobenen dolomitischen Gesteinen auf. Die Handstücke I1 und P2 zeigen einen deutlich höheren Magnesiumgehalt als die Handstücke I2 und P1.

Um den Einfluss von bestimmten Mineralphasen auf das Ausdehnungsverhalten zu untersuchen, wurde ein Handstück mit einem hohen, Quarz-, Chlorit-, Muskovit- Gehalt (Metapelit) des Steinbruches B (Metapelit) ausgesucht (Kalkstandard 6 und 23). Die Metapelitprobe B5 Pr.1 hat mit einem Gehalt von 47,7 M.- % SiO<sub>2</sub> einen sehr hohen Silikatanteil. Die Probe 1 des Handstückes B3 weist mit 17,5 M.- % den höchsten Eisengehalt und mit 0,51 M.- % den höchsten Manganengehalt auf.

**Tabelle 5.4: chemische Analysenergebnisse der Gesteine der Lagerstätte B [Masse- %]**

| KST     | CaO  | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|---------|------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| B1      | 97,9 | 0,64 | 0,14             | 0,30                           | 2,78                           | 0,34                           | 0,07              | 0,55             | 0,09            |
| B2      | 97,9 | 0,8  | 0                | 0,16                           | 0,05                           | 0,09                           | 0                 | 0,02             | 0               |
| B3 Pr.1 | 78,2 | 1,0  | 1,24             | 17,5                           | 0,87                           | 0,51                           | 0,02              | 0,05             | 0,08            |
| B3 Pr.2 | 88,2 | 0,79 | 1,83             | 6,70                           | 1,2                            | 0,34                           | 0,03              | 0,14             | 0,05            |
| B4 Pr.1 | 96,2 | 0,87 | 0,81             | 0,55                           | 0,43                           | 0,04                           | 0,02              | 0,14             | 0,09            |
| B4 Pr.2 | 96,4 | 0,87 | 0,07             | 0,16                           | 0,07                           | 0,02                           | 0,02              | 0,05             | 0,05            |
| B5 Pr.1 | 13,7 | 3,45 | 47,7             | 8,2                            | 19,7                           | 0,06                           | 0,34              | 5,54             | 0,14            |
| B5 Pr.2 | 35,3 | 3,48 | 31,85            | 7,15                           | 15,2                           | 0,13                           | 0,15              | 4,16             | 0,16            |
| B6      | 98,4 | 0,49 | 0                | 0,16                           | 0,02                           | 0,04                           | 0,04              | 0,09             | 0,02            |

Die Analyse der Probenstäbchen und die petrographischen Untersuchungen der Lagerstätte J zeigen, dass die untersuchten Handstücke J1, J2, J3 und J5 wenig Nebenbestandteile und eine große Gefügevarietät aufweisen und aufgrunddessen geeignet sind, den Einfluss des Gefüges auf das Ausdehnungsverhalten genauer zu untersuchen. (siehe Abb.5.4 und Abb. 5.5).

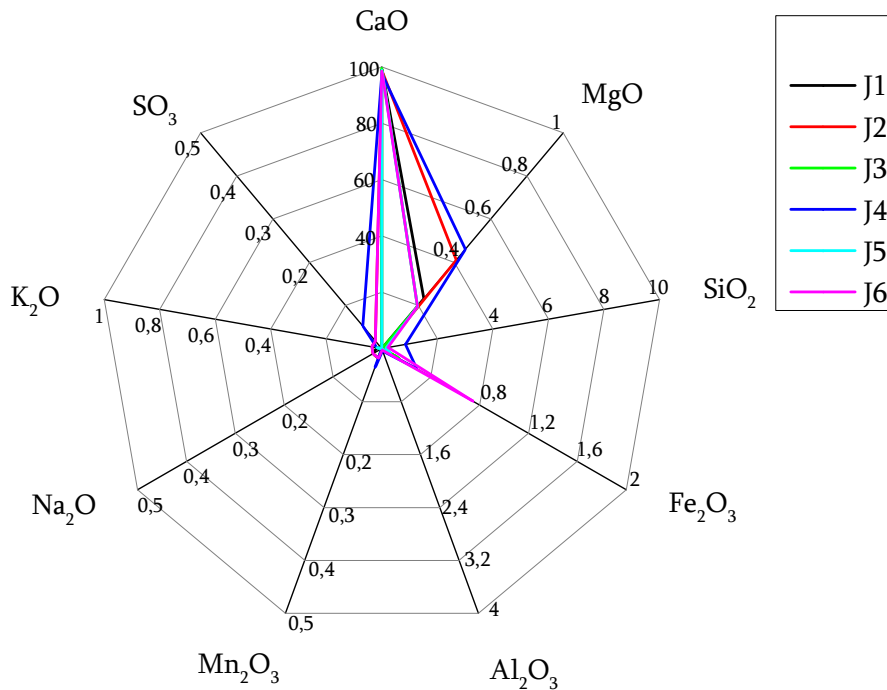


Abbildung 5.4: oxidische Zusammensetzung der Kalksteine J [Masse- %]

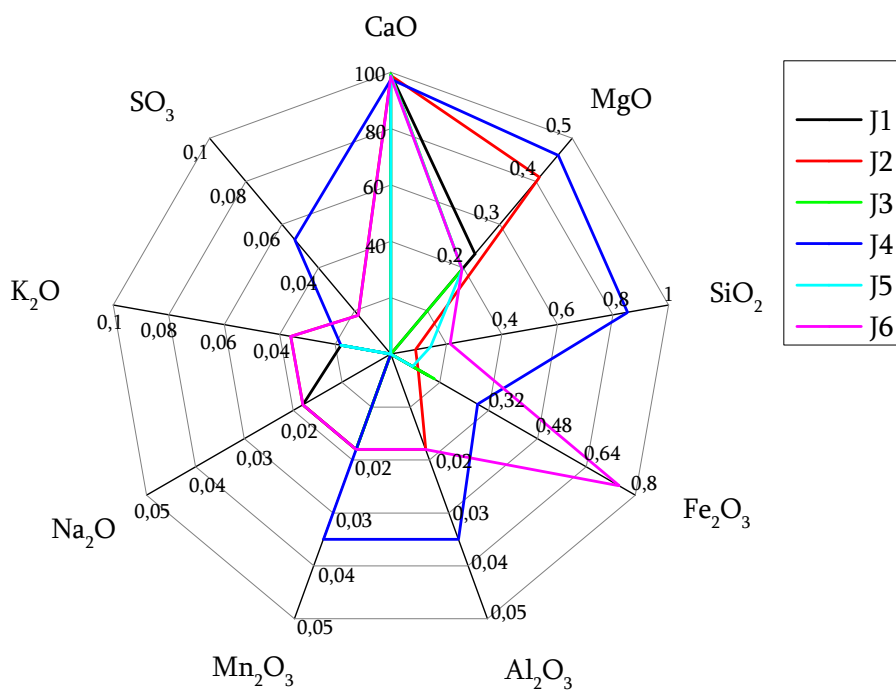


Abbildung 5.5: oxidische Zusammensetzung Kalksteine J mit anderer Skalierung [Masse- %]

Um die Unterschiede der oxidischen Zusammensetzung graphisch darzustellen, wurden die Skalierungen einiger Achsen der Abb. 5.5 verändert. Das Handstück J4 hat von den lagerstätteninternen Proben den größten Silicium-, Aluminium-, Mangan, Magnesium- und Schwefelgehalt. J6 zeigt im Vergleich zu den restlichen Proben der Lagerstätte J einen sehr hohen Eisengehalt.

Die folgenden Tabellen zeigen einen Auszug aus den chemischen Analysen der Handstücke der Lagerstätte Y:

**Tabelle 5.5: chemische Analyseergebnisse der Probe Y [Masse- %]**

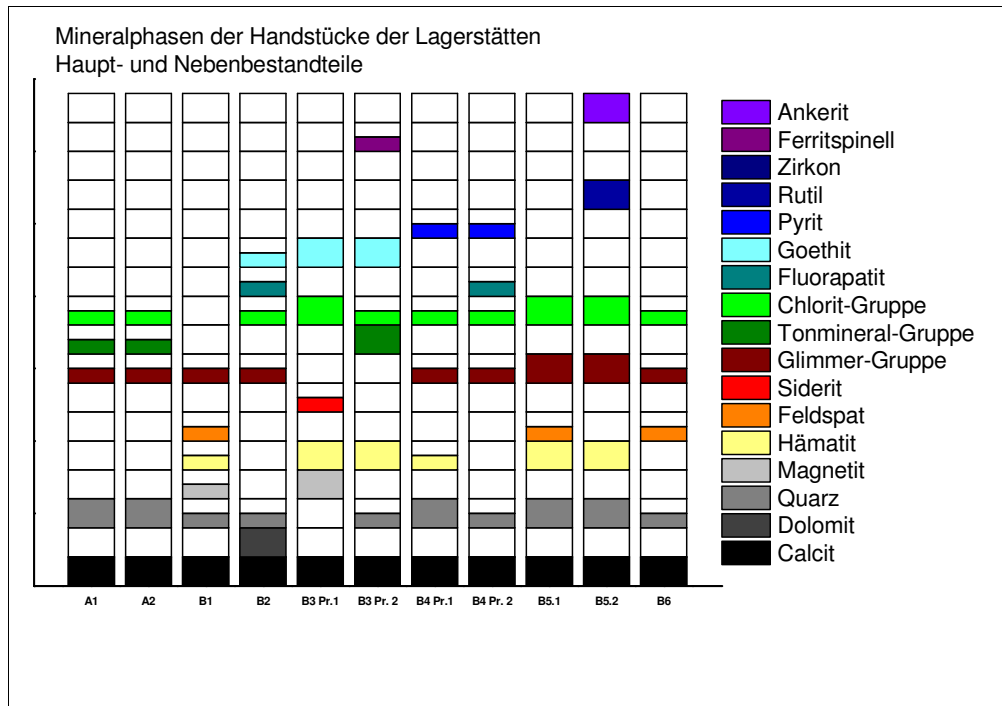
| KST | CaO   | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|-----|-------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Y1  | 96,61 | 1,0  | 0,73             | 0,45                           | 0,27                           | 0,02                           | 0,09              | 0,16             | 0,07            |
| Y2  | 87,15 | 1,08 | 6,29             | 0,68                           | 2,05                           | 0,02                           | 0,09              | 0,55             | 0,4             |
| Y3  | 89,49 | 1,07 | 4,449            | 0,74                           | 1,62                           | 0,02                           | 0,10              | 0,5              | 0,62            |
| Y4  | 95,06 | 0,81 | 1,50             | 0,44                           | 0,58                           | 0,02                           | 0,11              | 0,23             | 0,32            |

Die Handstücke Y1 und Y4 weisen mit 96,6 M.- % bzw. 95,1 M.- % einen deutlich höheren Calciumgehalt als die Handstücke Y2 und Y3 auf. Das Handstück Y2 hat im Vergleich zu den anderen Proben der Lagerstätte Y einen höheren SiO<sub>2</sub>-, K<sub>2</sub>O- bzw Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Gehalt.

## 5.2 Mineralphasenbestand der Kalksteinproben

Der Mineralphasenbestand wurde röntgenographisch ermittelt. Hauptbestandteile sind die Mineralphasen, die vor dem Lösen des Calcits mit Essigsäure zur Bestimmung der Nebenbestandteile mit dem Röntgendiffraktometer bestimmt wurden.

Die folgende Abbildung zeigt die Haupt- und Nebenbestandteile der Handstücke der Lagerstätten A und B. Die Hauptbestandteile sind durch ausgefüllte und die Nebenbestandteile durch halb gefüllte Kästchen gekennzeichnet.



**Abbildung 5.6: Mineralphasen der Handstücke aus den Lagerstätten A und B**

Die Handstücke der Lagerstätte A enthalten als Hauptbestandteil zusätzlich zum Calcit Quarz und als Nebenbestandteile Glimmer, Tonminerale und Chlorite. Der Mineralphasenbestand der Handstücke der Lagerstätte B hingegen unterscheidet sich sowohl in den Haupt- als auch in den Nebenbestandteilen. Die hier aufgeführten Handstücke haben, bis auf die Handstücke A1, A2, B3 und B5 ( $K_{st} < 10^3$ ), einen mittleren Kalkstandard von  $10^3$ -  $10^4$ .

In Abbildung 5.7 sind die Mineralphasenbestandteile der Handstücke der Lagerstätte D, J, und H aufgeführt. Für D1 und D2 wurden mittels Röntgendiffraktometrie keine Mineralphasen ermittelt.

Von den Handstücken der Probe J haben J1, J2, J3 und J5 einen  $K_{st} > 10^5$ . Alle Proben der Lagerstätte J enthalten als Nebenbestandteil Chlorite.

In Abbildung 5.8 sind die Haupt- und Nebenbestandteile der Handstücke der Lagerstätte G, I, P und Y dargestellt. Zu den dolomitischen Handstücken zählt auch die Probe G2, in der als Hauptbestandteil Christobalit nachgewiesen wurde. Die Handstücke der Lagerstätte G unterscheiden sich deutlich in ihrem Mineralphasenbestand.

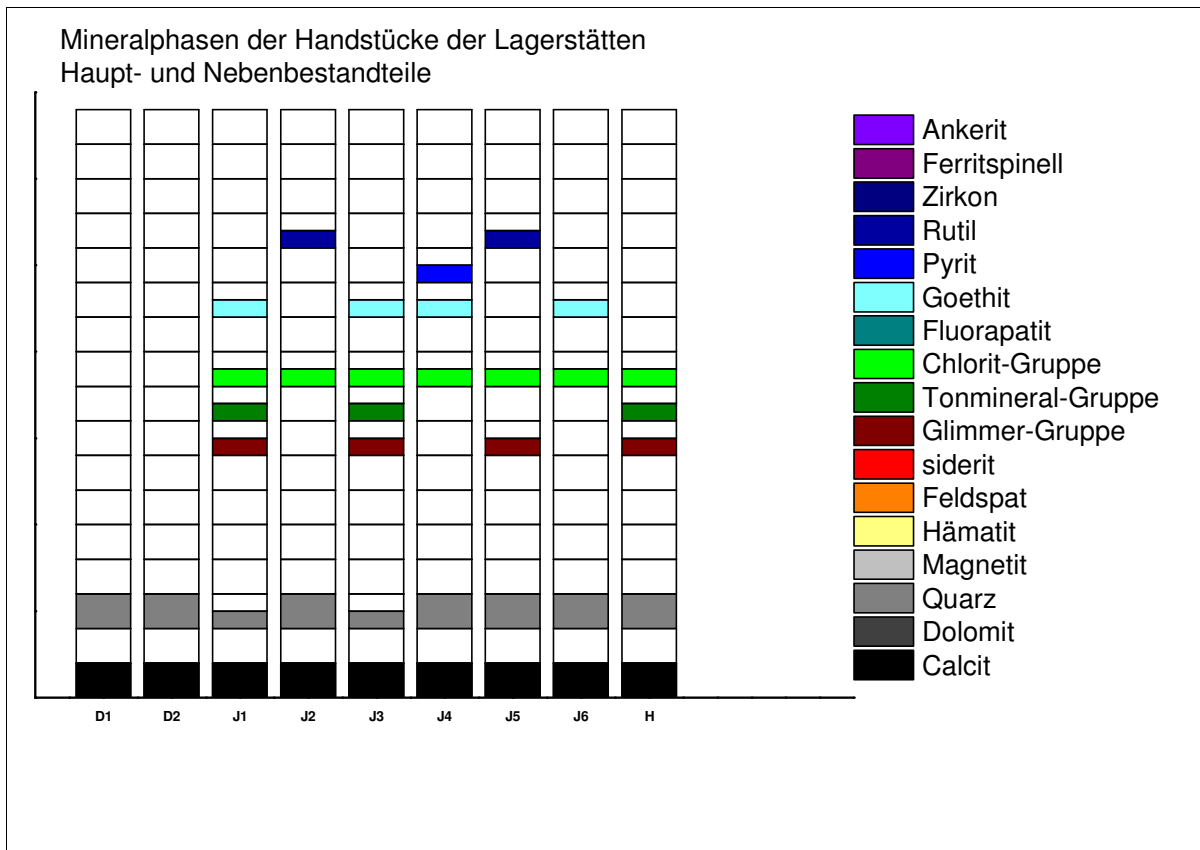


Abbildung 5.7: Mineralphasen der Handstücke der Lagerstätten D, J und H

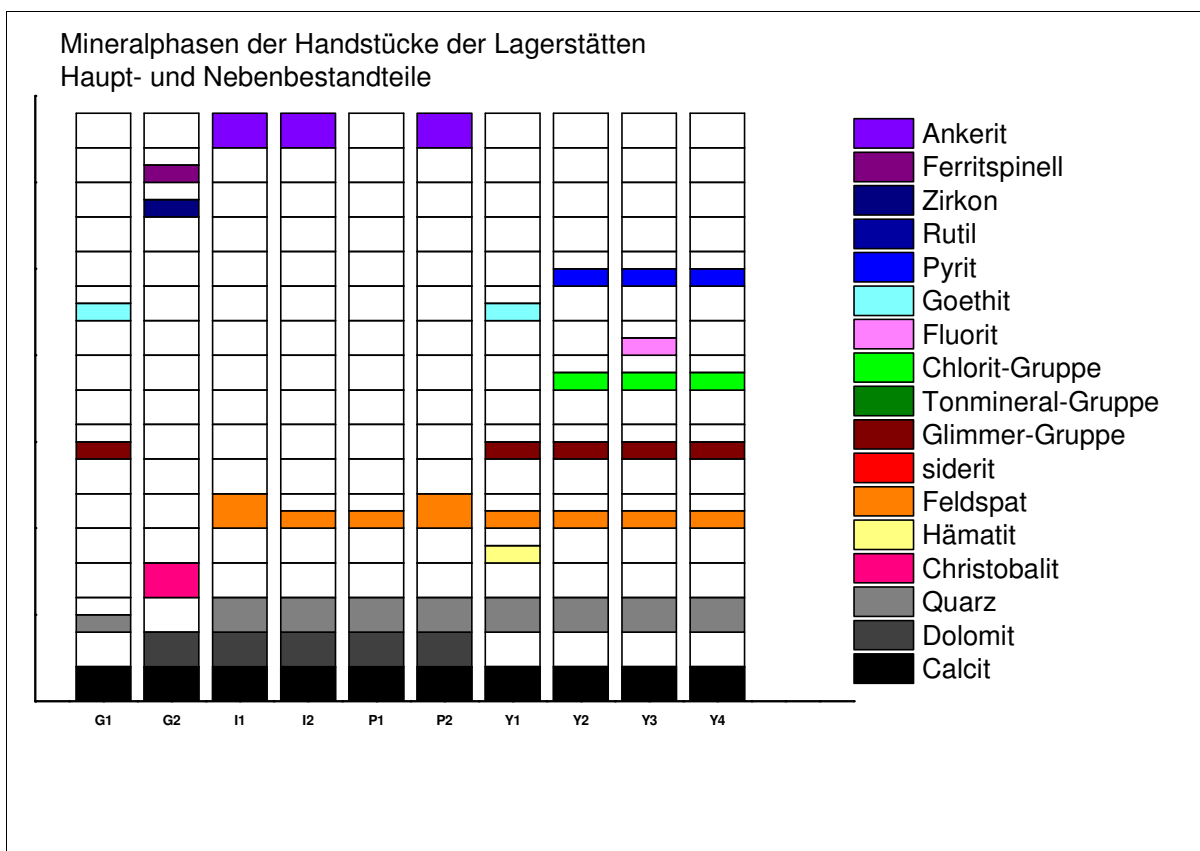
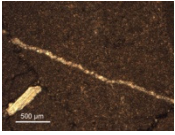
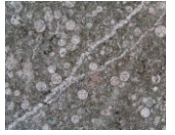
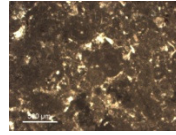
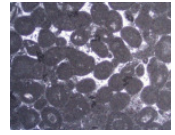
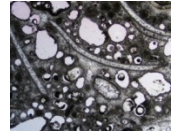
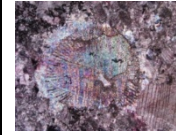


Abbildung 5.8: Mineralphasen der Handstücke der Lagerstätten G, I, P und Y

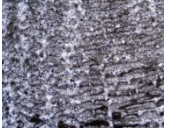
### 5.3 Klassifikation der Kalksteinproben mittels Dünnschliffmikroskopie

Die Kalksteine wurden durch Abschätzung der Anteile und Größen der Minerale im Schliffbild unter dem Polarisationsmikroskop in verschiedene Faziestypen der Klassifikation nach [Dunham, 1962], modifiziert nach [Embry, 1972] & Klovan, eingeordnet [TUCKER, 1981]:

**Tabelle 5.6: Klassifikation der abgelagerten Komponenten nach [Dunham] mit Modifikationen nach Embry & Klovan**

|  |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
| Primäre Komponenten während der Sedimentation nicht organogen verbunden (Allochthone Kalksteine) |   |   |   |   |   |
| Weniger als 10% der Komponenten > 2 mm   |   |   | Mehr als 10% der Komponenten > 2 mm   |   |   |
| Mit Mikrit (< 0,03 mm)= Matrix   |   | Ohne Mikrit   |   | Mit Mikrit  | Ohne Mikrit   |
| Gefüge <b>matrixgestützt</b>   |   | Gefüge <b>komponentengestützt</b>   |   | <b>Matrixgestützt</b>   | <b>Komponentengestützt</b>  |
| Weniger als 10% Komponenten  | Mehr als 10% Komponenten  |   |   |   |   |
| <b>MUDSTONE</b>  | <b>WACKESTONE</b>   | <b>PACKSTONE</b>  | <b>GRAINSTONE</b>   | <b>FLOATSTONE</b>   | <b>RUDSTONE</b>   |
|               |  |  |  |  |  |

**Tabelle 5.7: Klassifikation der gewachsenen Strukturen mit Modifikationen nach Embry & Klovan nach Dunham**

|  |                                  |  |
|--|----------------------------------|--|
| Primäre Komponenten während der Sedimentation organogen verbunden (autochthone Kalksteine) |                                  |  |
| Gehalte an Mikrit, Komponenten und Zement unterschiedlich                                  |                                  |  |
| Gefüge durch biogene Komponenten in Lebensstellung geprägt                                 |                                  |  |
| Organismen wirken als Partikelfilter   | Partikel an Organismen angeklebt | Kalkstein ganz aus Organismen aufgebaut  |
| <b>BOUNDSTONE</b>  |                                  |  |
| <b>BAFFLESTONE</b>   | <b>BINDSTONE</b>                 | <b>FRAMESTONE</b>  |

Auf die Einordnung nach [Folk, 1962] wurde aufgrund des hohen Probenaufkommens verzichtet. Außerdem zeigte sich, dass eine allgemeingültige Faziesbeschreibung für die einzelnen Handstücke einer einzigen Lagerstätte nicht möglich ist, da eine große Varianz zwischen den Handstücken innerhalb einer Probengruppe festzustellen ist (siehe Darstellung der Dünnschliffe J Tabelle 5.11). Im Bereich eines Riffee gibt es mehrere Faziesbereiche gleichzeitig (z.B. Fore Reef, Back Reef, Reef Flat), so dass man unterschiedliche Proben bekommt, je nachdem, wo sie genommen wurden.

Auch innerhalb eines Handstückes zeigen die Proben zum Teil einen Wechsel des Faziestyps (siehe Probe B Tabelle 5.9), so dass die gewählte Einordnung der Probe aufgrund eines Dünnschliffes in einen bestimmten Faziestyp für die betrachteten Dünnschliffe nur eingeschränkt möglich ist. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurden die Dünnschliffe in direkter Nachbarschaft zu den gesägten Proben der Dilatometermessung hergestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen als Beispiel anhand von drei Bildern eines Schliffes die Inhomogenität des Handstückes D2.



**Abbildung 5.9, 5.10 und 5.11 Dünnschliffabbildungen des Handstückes D2**

Die gewählte Einordnung der Kalksteinproben mittels Dünnschliffe nach [Dunham,1962] und modifiziert nach [Embry & Klovan,1972] zeigen die folgenden Tabellen.

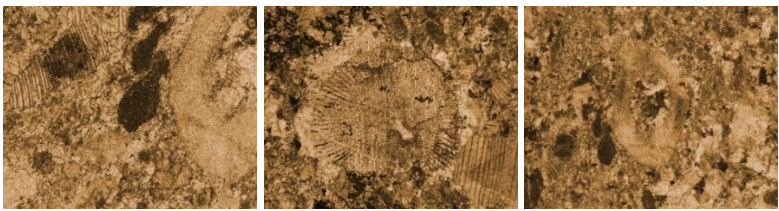
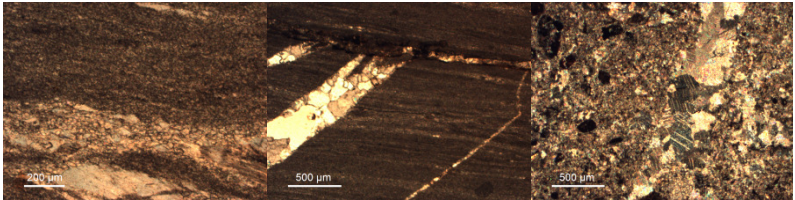
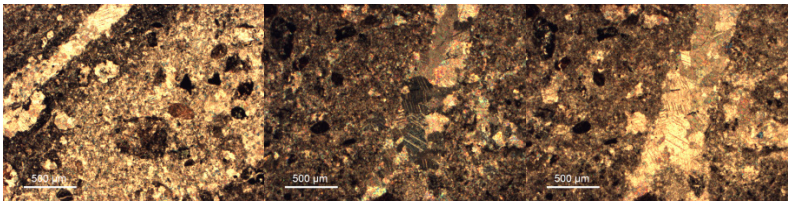
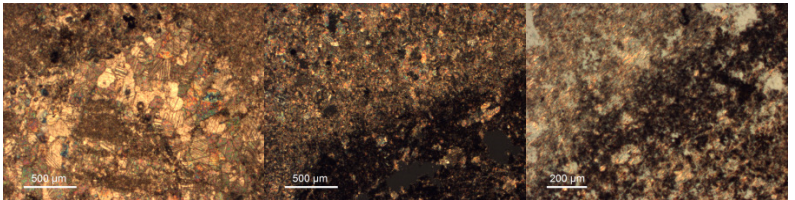
Die der Lagerstätte A entnommenen Handstücke A1 (Tabelle 5.8 Bild 1 und 2) und A2 (Tabelle 5.8 Bild 3) zeigen sehr ähnliche Schliffbilder, die zur Einordnung der beiden Kalksteine als Wackestone führen.

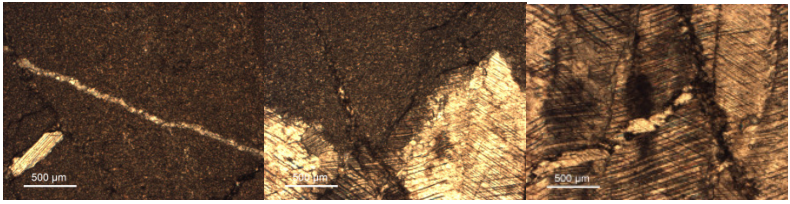
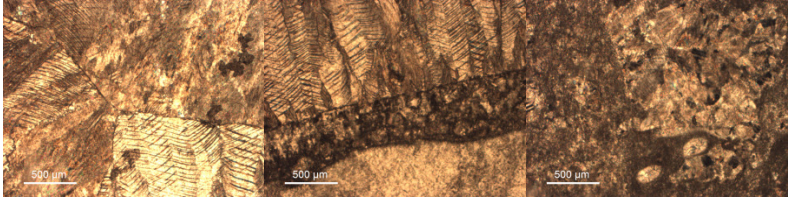
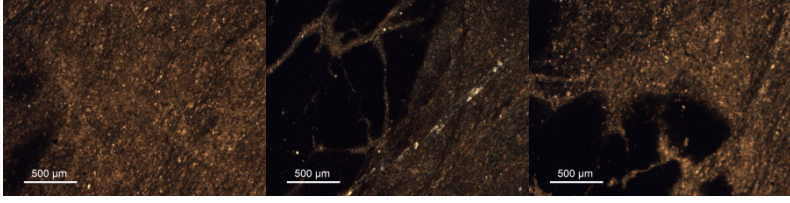
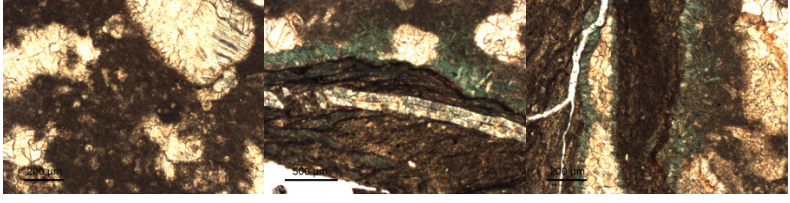
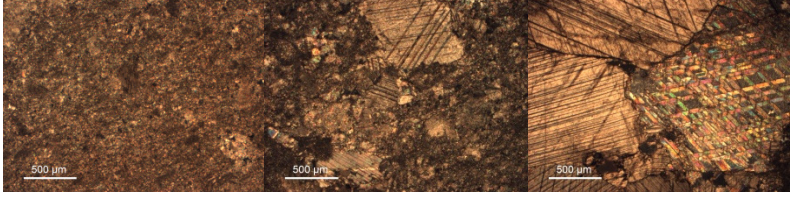
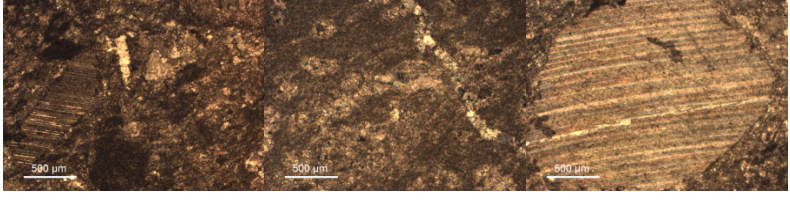
**5.8: Klassifizierung der Handstücke A1 und A2 (Maßstäbe der Abbildungen siehe Tab.9.9)**

| Kalkstein | Klassifizierung | Charakteristische Dünnschliffbilder  |
|-----------|-----------------|--|
| A1, A2    | Wackestone      |  |

Ein Beispiel für verschiedene Faziestypen innerhalb eines Kalksteines gibt der Kalkstein B. Die Dünnschliffe des Handstückes B4 weisen in der Probe 1 überwiegend auf einen Mudstone (Kalk mit einem Anteil <10% an Partikeln größer 2mm) und in der Probe 2 überwiegend auf einen Rudstone (einem Anteil >10% an Partikeln größer 2mm) hin. Bild 2 des Handstückes B4 Probe1 (Tab. 5.9) zeigt den Übergang eines rekristallisierten Bereiches in einen Mudstone und Bild 3 den rekristallisierten Bereich. Auch in den Dünnschliffaufnahmen des Handstückes B4 Probe2 sind große rekristallisierte Bereiche zu erkennen. Die Probe 1 des Handstückes B6 wird als Rudstone eingeordnet. Die Probe 2 des Handstückes B6 hingegen zeigt verschiedene Fazien, wie z.B. Grainstone, Rudstone und zum Teil Floatstone (im Prinzip ein Wackestone mit größeren Partikelkalken, Anteil der groben Partikel von 10% über 2 mm). Bei dem Handstück B5 handelt es sich um keinen Kalkstein. Die Abbildung 3 der Handstückes B5 Pr.2 zeigt einen Kristallrasen aus Chlorit und einen Klust aus Carbonat.

**Tabelle 5.9: Klassifikation der Handstücke der Lagerstätte B (Maßstäbe B1 siehe Tab.9.11)**

| Kalkstein | Klassifizierung                                    | Charakteristische Dünnschliffbilder  |
|-----------|--|--|
| B1        | Rudstone   |   |
| B2        | Wackestone-Packstone mit lagiger Rekristallisation |  |
| B3        | Packstone-Grainstone                               |  |
| B3 Pr.2   | überwiegend nichtcarbonatisch                      |  |

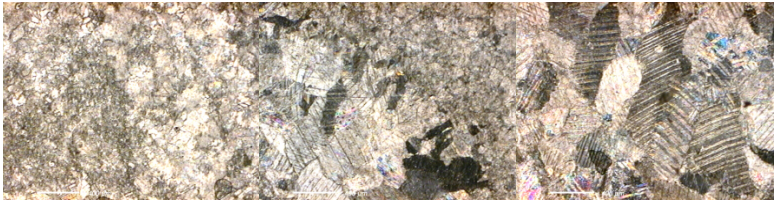
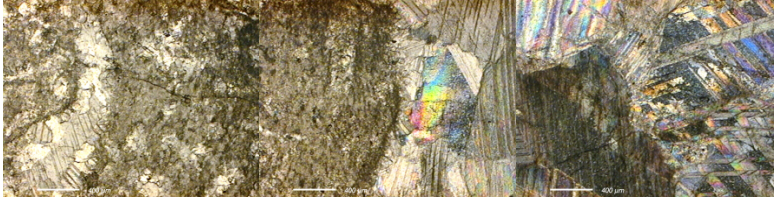
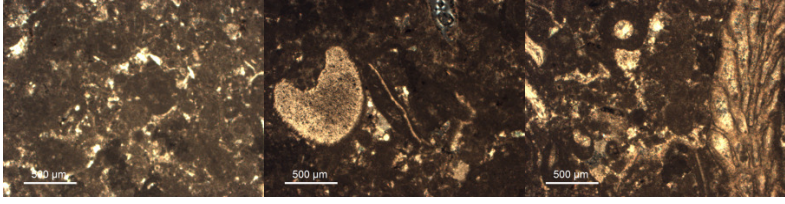
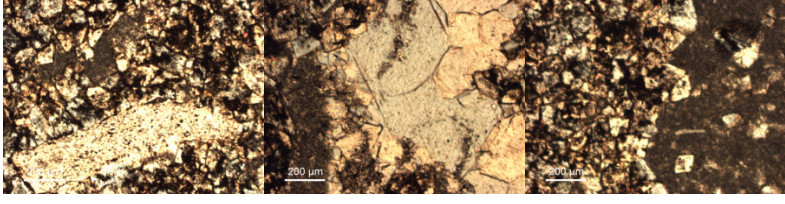
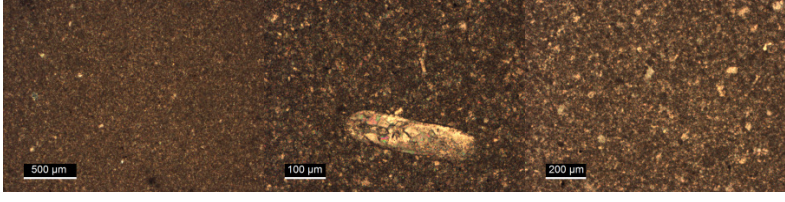
|         |   |  |
|---------|---|--|
| B4 Pr.1 | überwiegend<br>Mudstone                     |    |
| B4 Pr.2 | Rudstone                                    |    |
| B5 Pr.1 | nichtkarbonatisch                           |    |
| B5 Pr.2 | nichtkarbonatisch                           |   |
| B6 Pr.1 | Wackestone<br>Rudstone                      |  |
| B6 Pr.2 | Grainstone-<br>Rudstone, z.T.<br>Floatstone |  |

Die Kalksteine der Lagerstätte D sind als Boundstone (gewachsene Strukturen, wobei die Partikelgröße von D2 überwiegend größer ist) einzuordnen. Der Dünnschliff von D2 weist einen großflächigen Klust im Boundstone auf. D1 hat zum Teil auch große rekristallisierte Bereiche.

Die Handstücke G1 und G2 unterscheiden sich chemisch und petrographisch deutlich. G1 ist ein Grainstone mit mikritisierten Körnern, und G2 hingegen zeigt eine Grundmasse, die z.T. dolomitiert ist.

Das homogene Schliffbild der Lagerstätte H zeigt einen Mudstone.

**Tabelle 5.10: Klassifikation der Handstücke der Lagerstätten D,G und H**

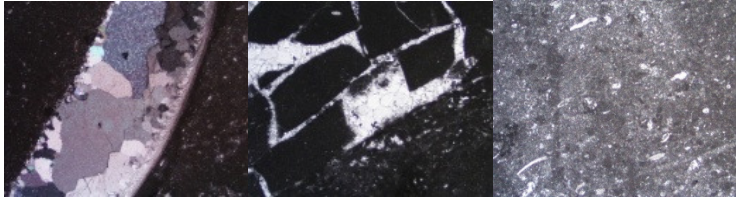
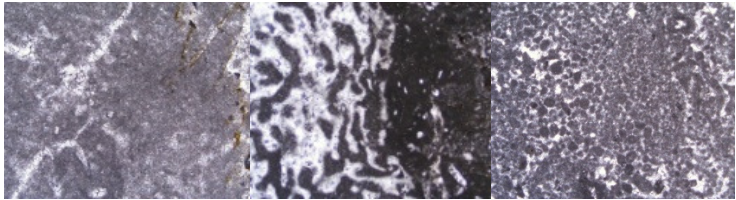
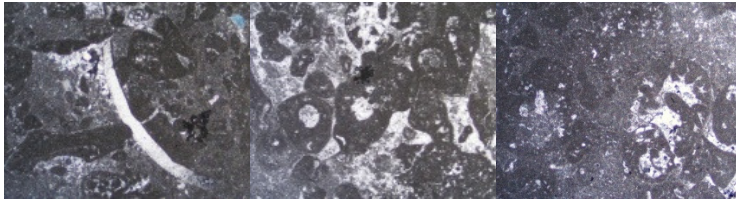
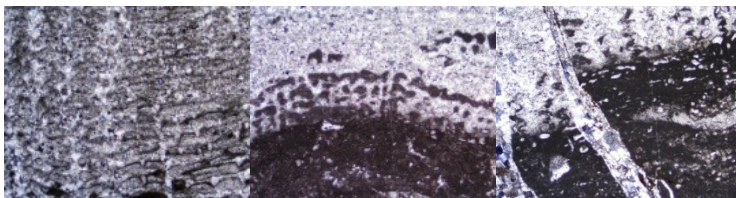
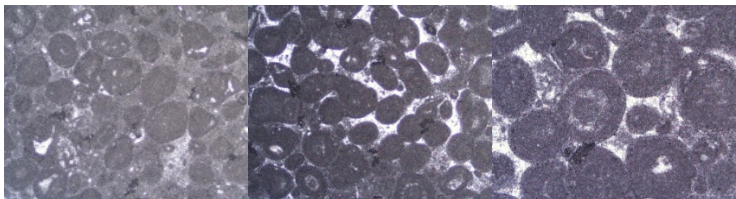
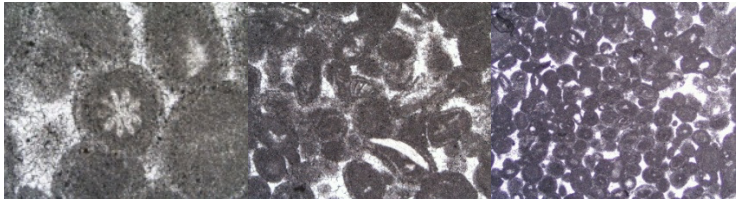
|    |                               |  |
|----|-------------------------------|--|
| D1 | Boundstone                    |    |
| D2 | Clust im Boundstone           |    |
| G1 | Packstone-Grainstone          |    |
| G2 | Grundmasse z.T. dolomitisiert |   |
| H  | Mudstone                      |  |

Die Kalksteinproben J sind verschiedenen Sohlen des Kalksteinbruches entnommen; J1 und J2 der Sohle 320-300 m, J3 und J4 der Sohle 340-320 m und J5 und J6 der Sohle 360-340 m. Diese Kalksteine zeigen sowohl eine große Varietät innerhalb des Steinbruchs als auch innerhalb der Steine selbst. Es konnten sowohl abgelagerte (allochthone), als auch gewachsene (autochthone) Strukturen nachgewiesen werden. Anhand der Dünnschliffbilder der Handstücke dieses Kalksteinbruches wurden fünf unterschiedliche Faziesgruppen (vom Mudstone bis zum Boundstone) bestimmt.

Das Handstück J1 zeigt zum Beispiel einen grob sparitisch rekristallisierten Fossilrest in mikritischer Matrix (zementierte Schirmpore unter Bivalvenschale). Nach Dunham ist dieses typisch für einen Floatstone-Bereich. Das zweite Bild zeigt den Übergangsbereich Mudstone-

Wackestone und das dritte Bild den Faziestyp Wackestone. Die zerbrochenen Mudstones sind wieder calcitisch zementiert.

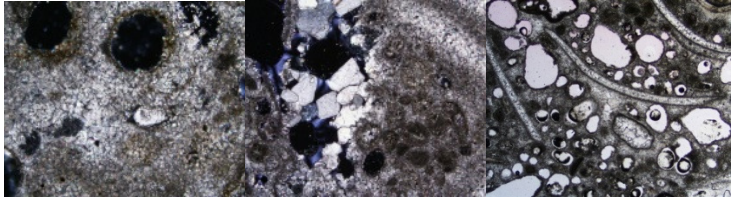
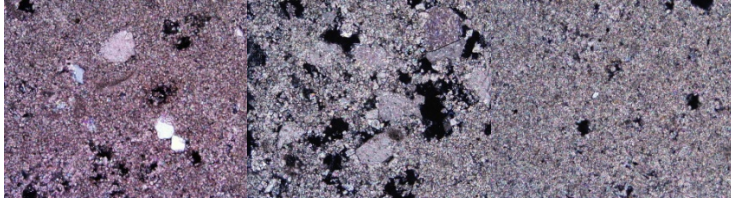
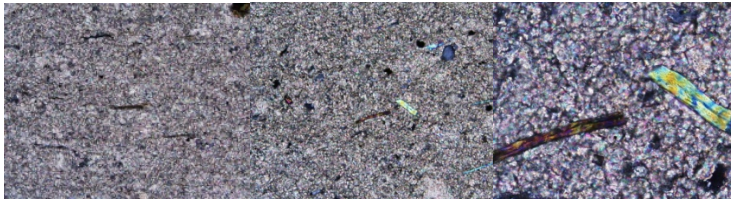
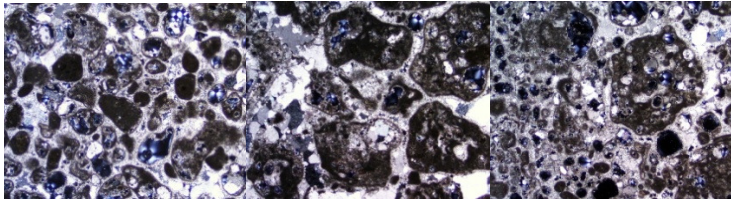
*Tabelle 5.11: Klassifikation der Handstücke der Lagerstätte J (Maßstäbe siehe Tab. 9.26-9.31)*

|    |   |  |
|----|---|--|
| J1 | Floatstone<br>Mudstone-<br>Wackestone<br>Wackestone |    |
| J2 | Mudstone<br>Wackestone<br>Peloidaler<br>Grainstone  |    |
| J3 | Grainstone  |   |
| J4 | Boundstone,<br>bindstone                            |  |
| J5 | Peloidaler<br>Grainstone                            |  |
| J6 | Grainstone  |  |

Die Varietät der Kalksteine Y begrenzt sich auf Mudstone, Floatstone und Grainstone. Die Peloiden des Handstückes Y1 wurden weggelöst und sekundär z.T. wieder sparitisch gefüllt. Die großen schwarzen Bereiche weisen auf offenen Hohlräume hin. Das Handstück Y2 zeigt, wie das Handstück Y3 eine feinkristalline Matrix. In den Handstücken Y2 und Y3 ist siltiger Quarz zu

erkennen (Tab. 5.12, siehe Anhang Tab. 9.33 und Tab.9.34). Das Handstück Y3 zeigt z.T. eingeregelter Glimmer (hell: Muskovit, dunkel: Biotit, Abb. 5.12).

**Tabelle 5.12: Klassifikation der Handstücke der Lagerstätte Y (Maßstäbe siehe Tab.9.32-9.35)**

|    |                          |  |
|----|--------------------------|--|
| Y1 | Grainstone<br>Floatstone |    |
| Y2 | Mudstone                 |    |
| Y3 | Mudstone                 |   |
| Y4 | Grainstone               |  |

#### 5.4 Dichten- und Porositäten der Kalksteinproben

Die Werte der gemessenen Rohdichten der Handstücke weisen teilweise eine große Streubreite auf, was die Ergebnisse der Dünnschliffbetrachtungen bezüglich der Inhomogenität bestätigt. Die gemessenen Rohdichten sind im Anhang dargestellt. Aufgrund dieser großen Streuung der Rohdichten ist eine Korrelation mit der Dehnung nicht möglich. Die Mittelwerte der Rohdichten sind in folgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 5.13: Mittelwerte der Rohdichten der verschiedenen Handstücke**

| Handstück     | Rohdichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Handstück | Rohdichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Handstück | Rohdichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|---------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <i>A1</i>     | 2,72                              | <i>D1</i> | 2,64                              | <i>J1</i> | 2,67                              |
| <i>A2</i>     | 2,63                              | <i>D2</i> | 2,67                              | <i>J2</i> | 2,69                              |
| <i>B1</i>     | 2,64                              | <i>G1</i> | 2,49                              | <i>J3</i> | 2,6                               |
| <i>B2</i>     | 2,66                              | <i>G2</i> | 2,72                              | <i>J4</i> | 2,68                              |
| <i>B3Pr.1</i> | 2,7                               | <i>H</i>  | 2,62                              | <i>J5</i> | 2,65                              |
| <i>B3Pr.2</i> | 2,69                              | <i>I1</i> | 2,68                              | <i>J6</i> | 2,63                              |
| <i>B4Pr.1</i> | 2,84                              | <i>I2</i> | 2,68                              | <i>Y1</i> | 1,84                              |
| <i>B5Pr.1</i> | 2,71                              | <i>P1</i> | 2,54                              | <i>Y2</i> | 2,46                              |
| <i>B5Pr.2</i> | 2,74                              | <i>P2</i> | 2,46                              | <i>Y3</i> | 2,72                              |
| <i>B6</i>     | 2,57                              |           |                                   | <i>Y4</i> | 1,99                              |

Die größten Schwankungen der Rohdichten (der Mittelwerte) der verschiedenen Handstücke zeigen die Handstücke der Lagerstätte Y mit Rohdichten von 1,84 bis 2,72 g/cm<sup>3</sup>. Gleich sind die Rohdichten der Lagerstätte I und sehr ähnlich die Rohdichten von D1, D2 mit einer Differenz von 0,03 g/cm<sup>3</sup>.

Die Reindichten (siehe Anhang.Tab.9.4.2) aller Handstücke liegen im Bereich von 2,67 bis 2,83 g/cm<sup>3</sup>. Gleiche Mittelwerte der Reindichten weisen D1 und D2 mit 2,72 g/cm<sup>3</sup> auf. Den größten Unterschied gibt es bei den Proben B, die einen hohen Gehalt an Nebenbestandteilen aufweisen.

Die folgende Graphik zeigt die Spannweiten der Porositäten innerhalb der Lagerstätte. Die Unterschiede der Porositäten der Handstücke der Probe D sind am geringsten und die Unterschiede der Handstücke Y innerhalb der Lagerstätte am größten. Die gemessenen Porositäten der Handstücke sind im Anhang (Tab.9.5.1) dargestellt.

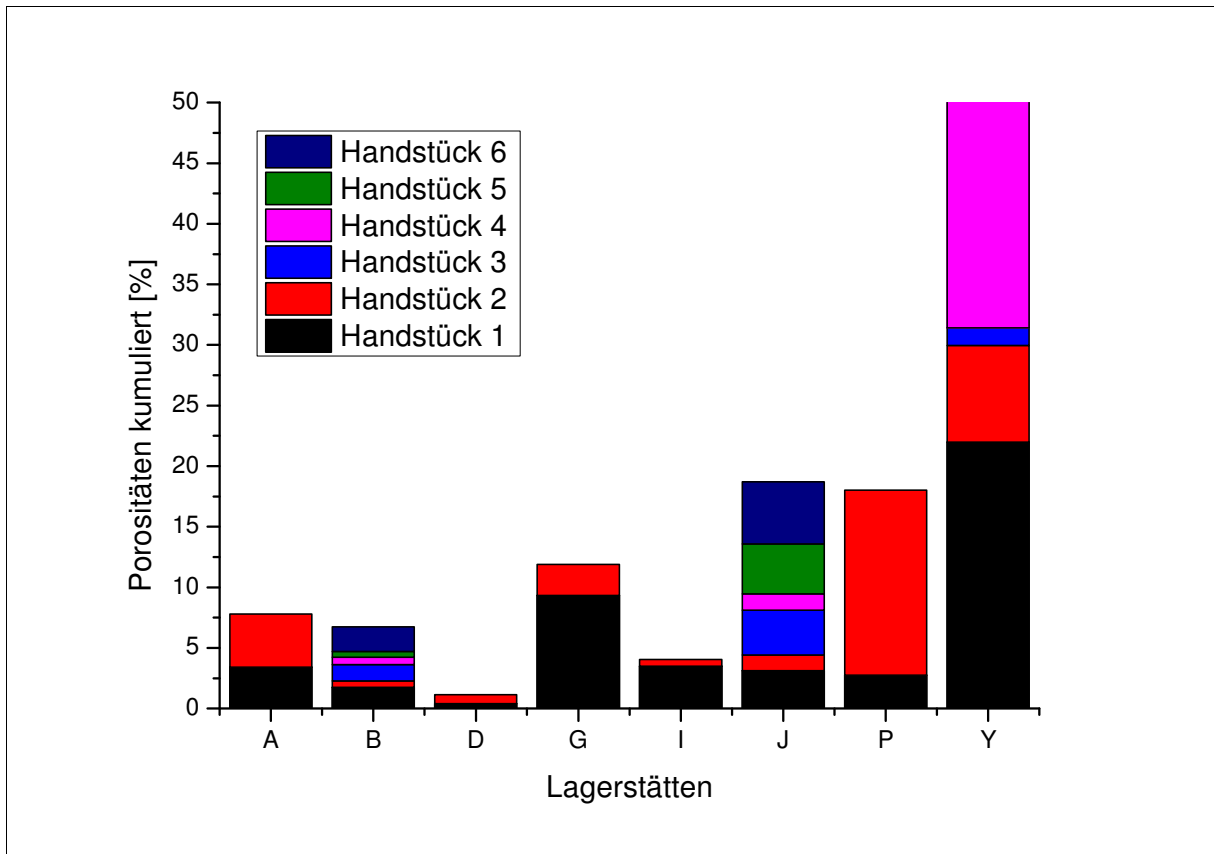


Abbildung 5.12: Spannweiten der Porositäten innerhalb der Lagerstätten

## 5.5 Thermische Analysenergebnisse der Kalksteinproben

An den Pulvern der Handstücke B5 und H mit sehr unterschiedlichem Quarzgehalt wurden DSC-Messungen durchgeführt.

Bei der Probe B5 handelt es sich um einen Metapelit. Das ursprünglich tonreiche Sediment (Pelit) ist sehr niedriggradig metamorph überprägt. Aus den ursprünglich vorhandenen Tonmineralen bildeten sich zunächst Chlorit und Illit. Der Illit wurde bereits teilweise durch Muskovit ersetzt (siehe hierzu auch [BRUCE, 1997]). Abbildung 5.13 zeigt die Mineralparagenese der Probe B5. In der Probe befinden sich: Calcit, Quarz, Muskovit, Chlorit, Hämatit und Illit.

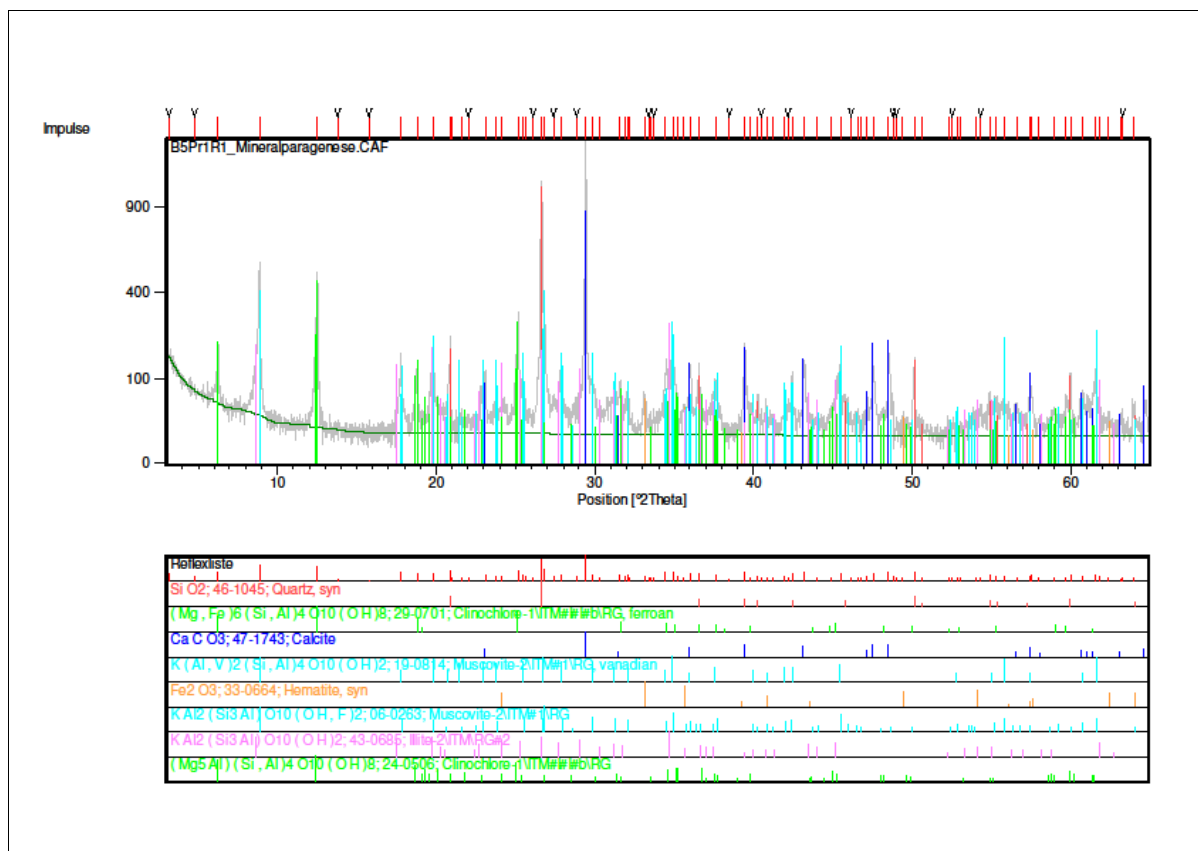


Abbildung 5.13: Röntgen-Pulverdiffraktogramm der Probe B5 (Metapelit)

Die Probenstäbchen (Abb.5.14) wurden im Dilatometer auf 1200 ° C aufgeheizt.

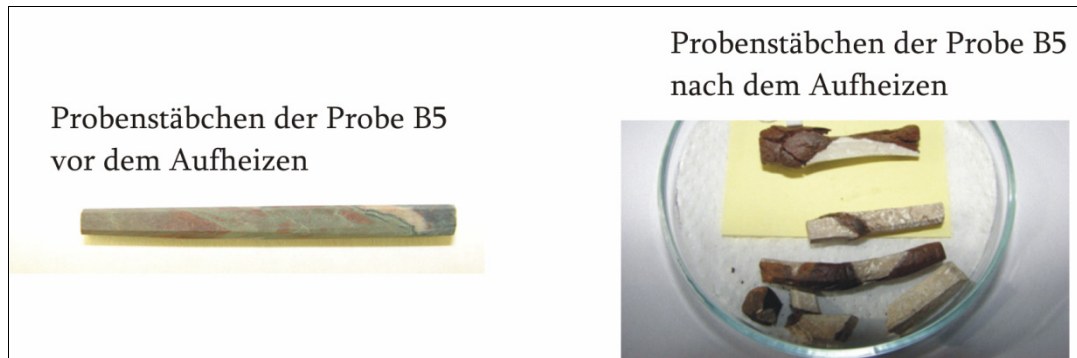


Abbildung 5.14: Probenstäbchen B5 vor und nach dem Aufheizen

Die starke Volumenzunahme im Temperaturbereich von 1000 – 1100° C (siehe Dilatogramm, Abb. 5.29 und 5.30) ist auf die Bildung von Spinell auf Kosten von Hämatit, Chlorit und Muskovit zurückzuführen.

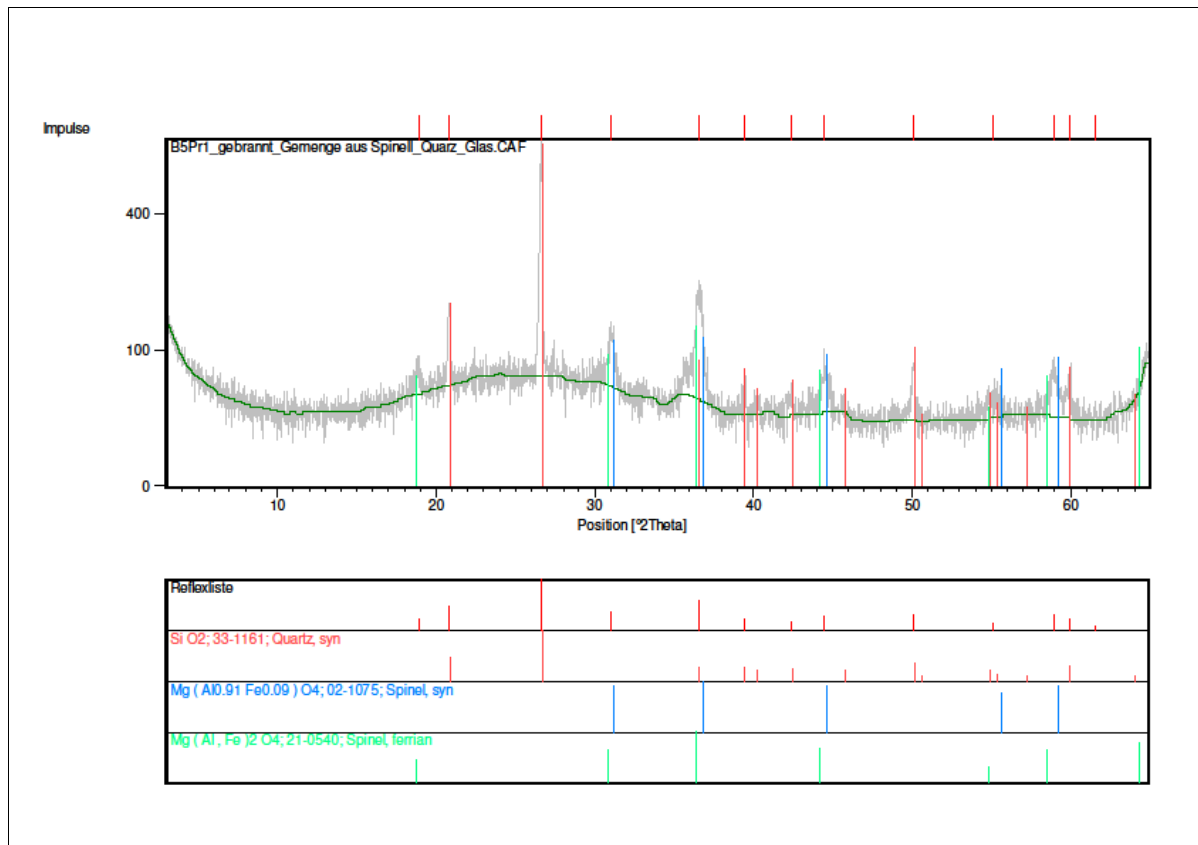
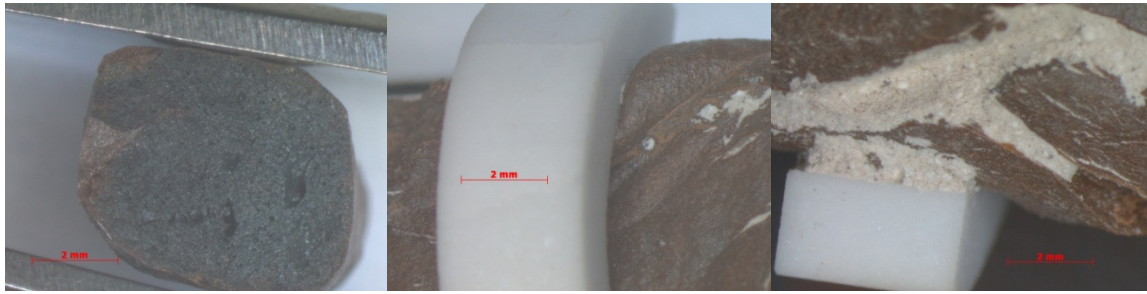


Abbildung 5.15: Röntgen-Pulverdiffraktogramm einer Teilprobe von B5 nach dem Aufheizen im Dilatometer

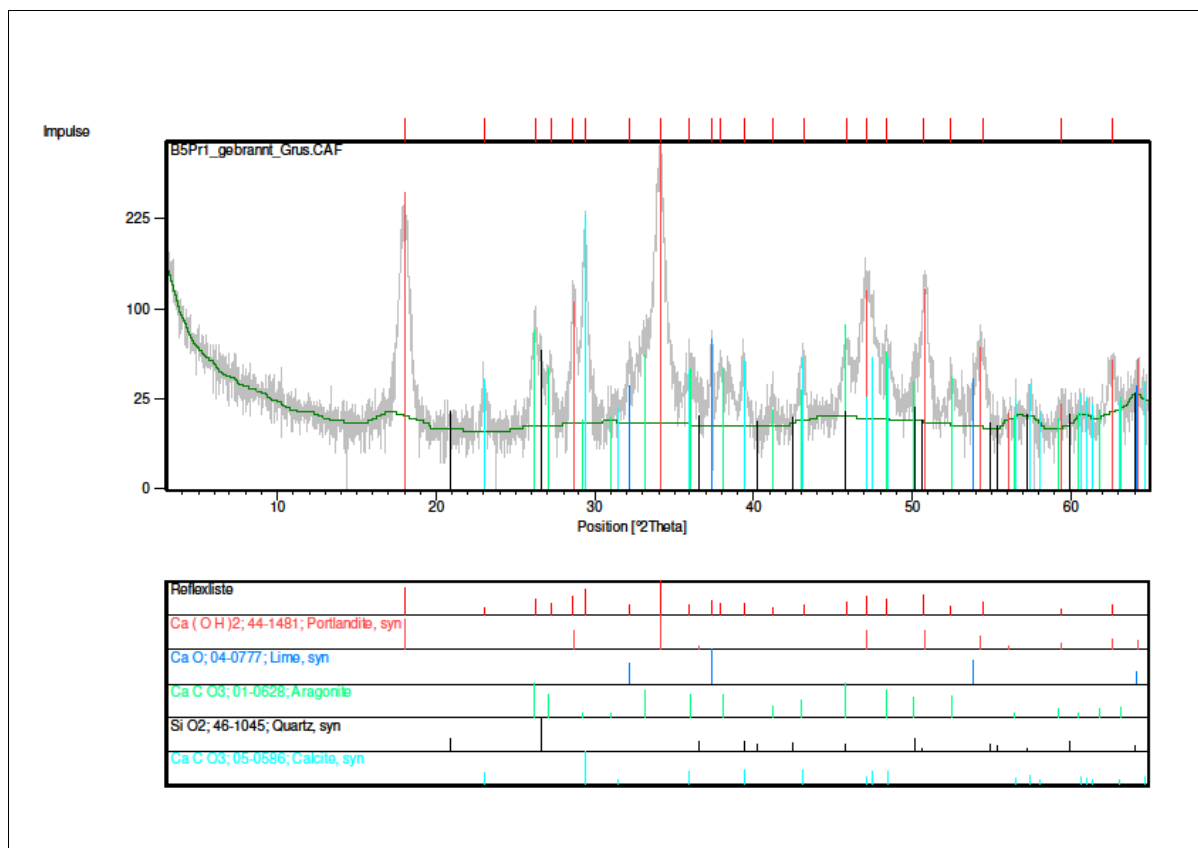
Die exotherme Bildung von Spinell ist auch auf dem DSC-Diagramm zu erkennen (Peakmaximum bei ca. 920° C). Das Gemenge von Spinell und Quarz (Abb.5.16) enthält einen hohen Anteil an Gesteinsglas (siehe Abb.5.15).



**Abbildung 5.16, 5.17, und 5.18: Probe B5 nach dem Aufheizen auf 1200 °C**

Der Glasanteil ist auf eine partielle Schmelzbildung (Abb.5.17) und anschließende rasche Abkühlung der Probe zurückzuführen. Ehemalige Calcitgänge wurden in CaO umgewandelt (Abb.5.18).

Der zerfallene Rest der Probe (Grus) (Abb.5.19) besteht aus CaO, Portlandit (aus CaO durch Luftfeuchtigkeit gebildet), Quarz, Aragonit (durch rasche Abkühlung metastabil erhalten) und Calcit (durch Phasenumwandlung aus Aragonit, und aus Portlandit durch Reaktion mit CO<sub>2</sub> gebildet).



**Abbildung 5.19: Röntgen-Pulverdiffraktogramm einer Teilprobe von B5 (Grus) nach dem Aufheizen im Dilatometer**

Die Phasenumwandlung von Tief- nach Hoch- Quarz ist, aufgrund des hohen Quarzanteils in der Probe, sowohl im Dilatogramm (Abb. 9.108, Abb.9.140) im Bereich von 570 – 625 °C als auch im DSC-Diagramm (Abb. 5.20) im Bereich von 500 – 600 °C zu erkennen.

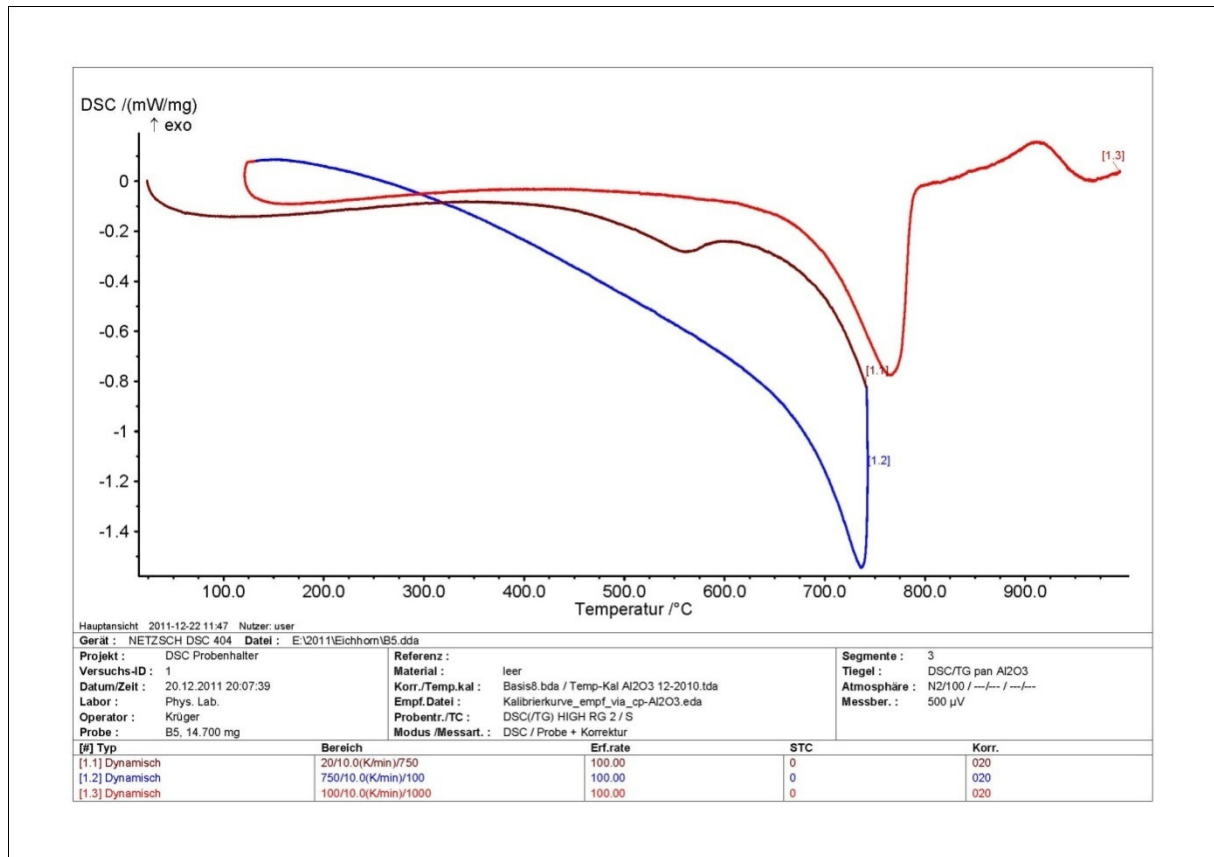


Abbildung 5.20: Dynamische-Differenz-Kalorimetrie der Probe B5

Im Dilatogramm der Probe B5 (Abb. 5.29) zeigt sich ab 750° C ein erneuter Anstieg in der Ausdehnung. Der Calcit der Probe fängt an sich zu zersetzen. Hierbei wird CO<sub>2</sub> frei, was zunächst zu einem Anstieg der thermischen Ausdehnung führt. Nach dem Entweichen des CO<sub>2</sub> setzt vorerst das Schwinden der Probe ein, welches bei 950° C durch die Spinell-Bildung gestoppt wird.

In dem DSC-Diagramm zeigt sich die thermische Zersetzung von Calcit ab ca. 675 °C (extrapolierter Onset).

Abbildung 5.17 zeigt das DSC- Diagramm des Handstückes H. Die Probe weist als Hauptbestandteil lediglich Calcit und Quarz auf. In diesem Diagramm ist die Phasenumwandlung von Tief- nach Hochquarz aufgrund des geringen Quarzgehaltes nicht zu erkennen. Die Umwandlung des Calciumcarbonats zu Calciumoxid beginnt ab 730 °C (extrapolierter Onset).

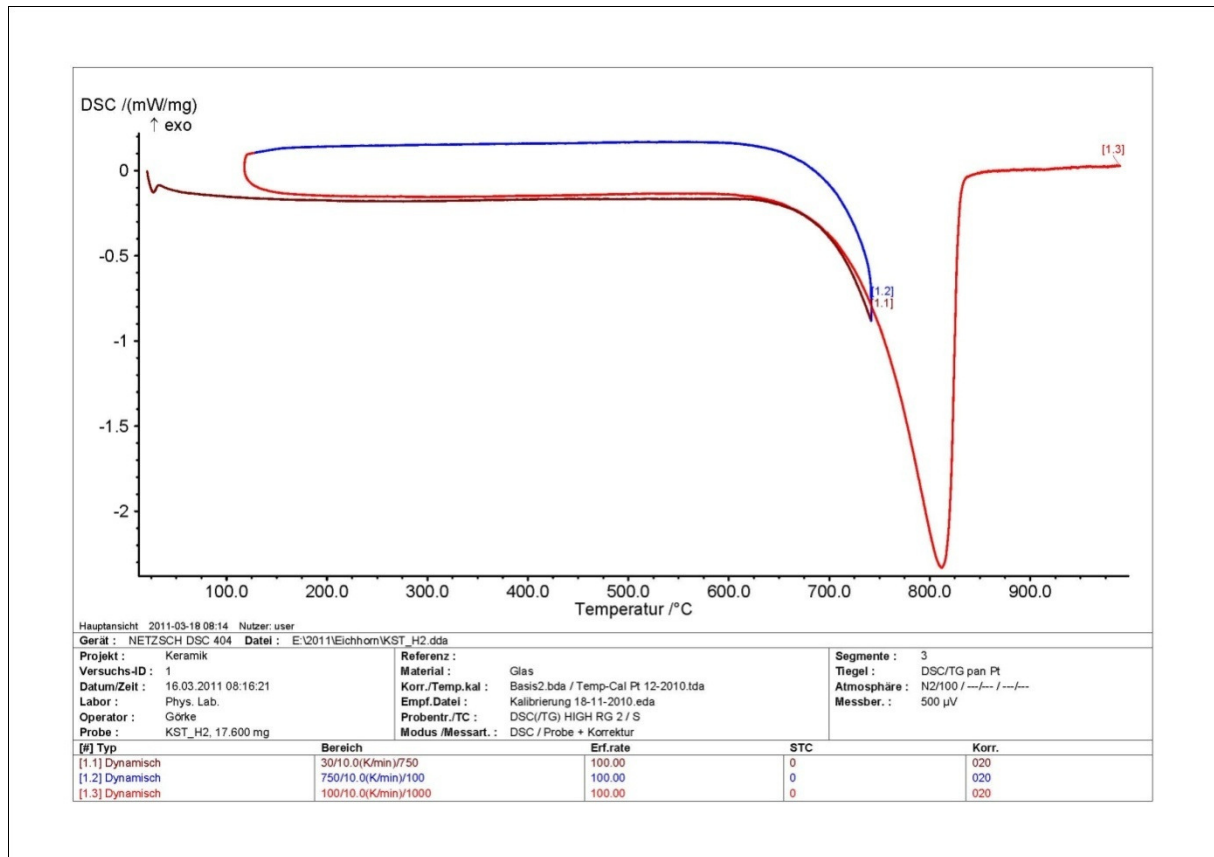
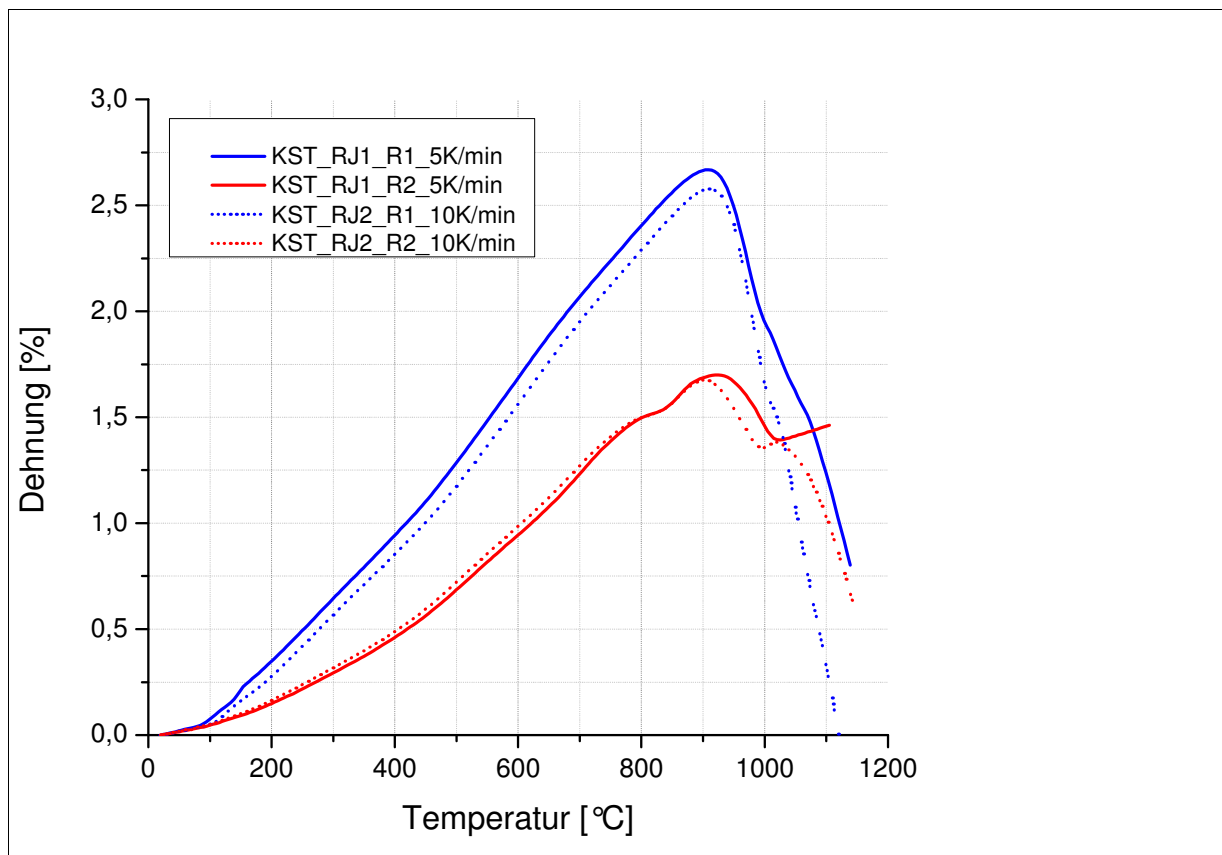


Abbildung 5.21: Dynamische-Differenz-Kalorimetrie der Probe H

## 5.6 Ergebnisse der Dilatometrie

### Vorversuche

Um für die in diesem Projekt durchzuführenden dilatometrischen Untersuchungen eine geeignete Heizrate festzulegen, wurde zunächst das Ausdehnungsverhalten einiger Kalksteine (Rückstellproben aus der Arbeit im Rahmen der Dissertation von Hogewoning, im Folgenden mit dem Buchstaben R vor dem Handstück gekennzeichnet) in Abhängigkeit von der Heizrate untersucht. Gemessen wurden hierbei vier Proben (zwei verschiedene Handstücke) mit zwei verschiedenen Aufheizraten (5 K/min und 10 K/min).



**Abbildung 5.22:** Thermische Ausdehnung der Rückstellproben RJ bei Heizraten von 5 bzw. 10 K/min

Die zwei gemessenen Rückstellproben RJ1 und RJ2 zeigen bei einer Heizrate von 5 und 10 K/min einen ähnlichen Kurvenverlauf. Daher wurde für die weiteren Dilatometerversuche eine Messrate von 10 K/min gewählt, um die Messzeit zu halbieren.

Das Ausdehnungsverhalten weiterer Rückstellproben der Dissertation [Hogewoning, 2008] (Mittelwerte der 48 Einzelmessungen) ist in Abbildung 5.23 und 5.24 dargestellt. Die Kurvenverläufe der Proben unterscheiden sich im Anstiegsverhalten, sowie der Lage der Maxima. Diese liegen im Temperaturbereich von 901 bis 944° C mit Dehnungen zwischen 1,1 bis 2,7 %.

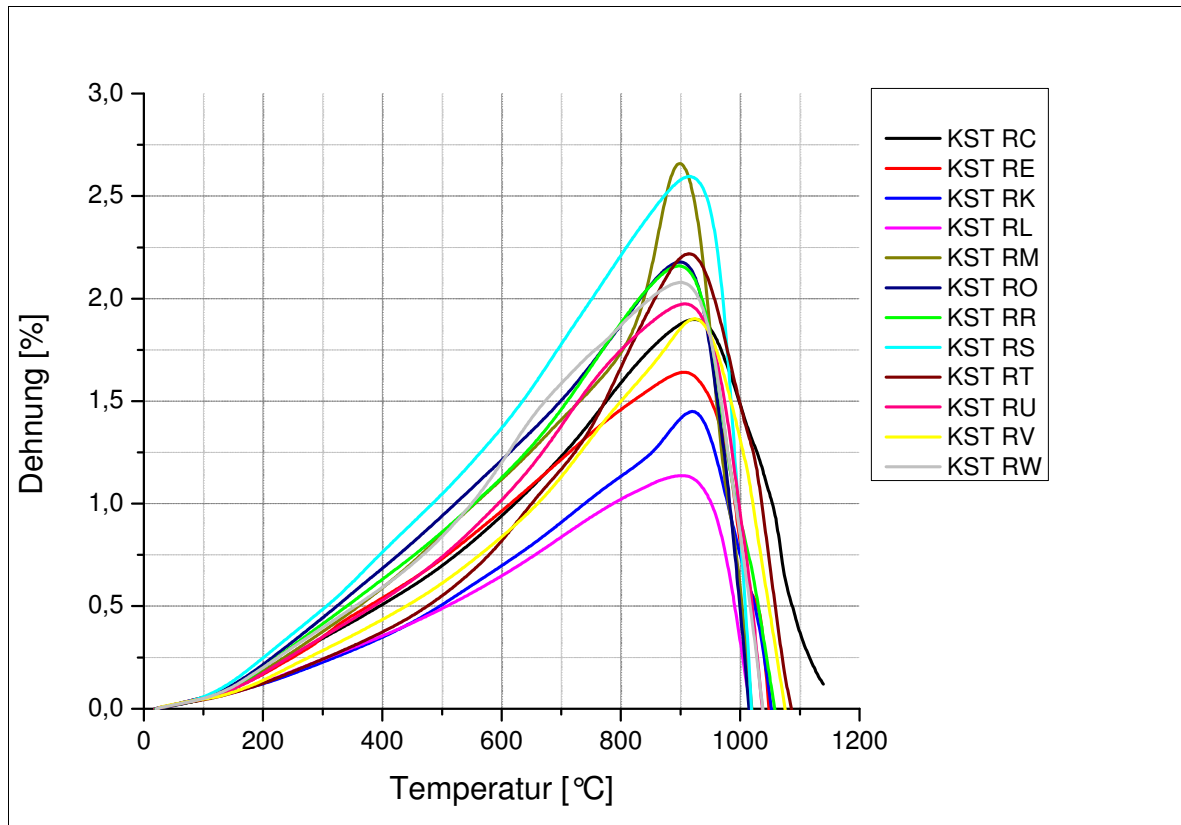


Abbildung 5.23: Thermische Ausdehnung der Rückstellproben

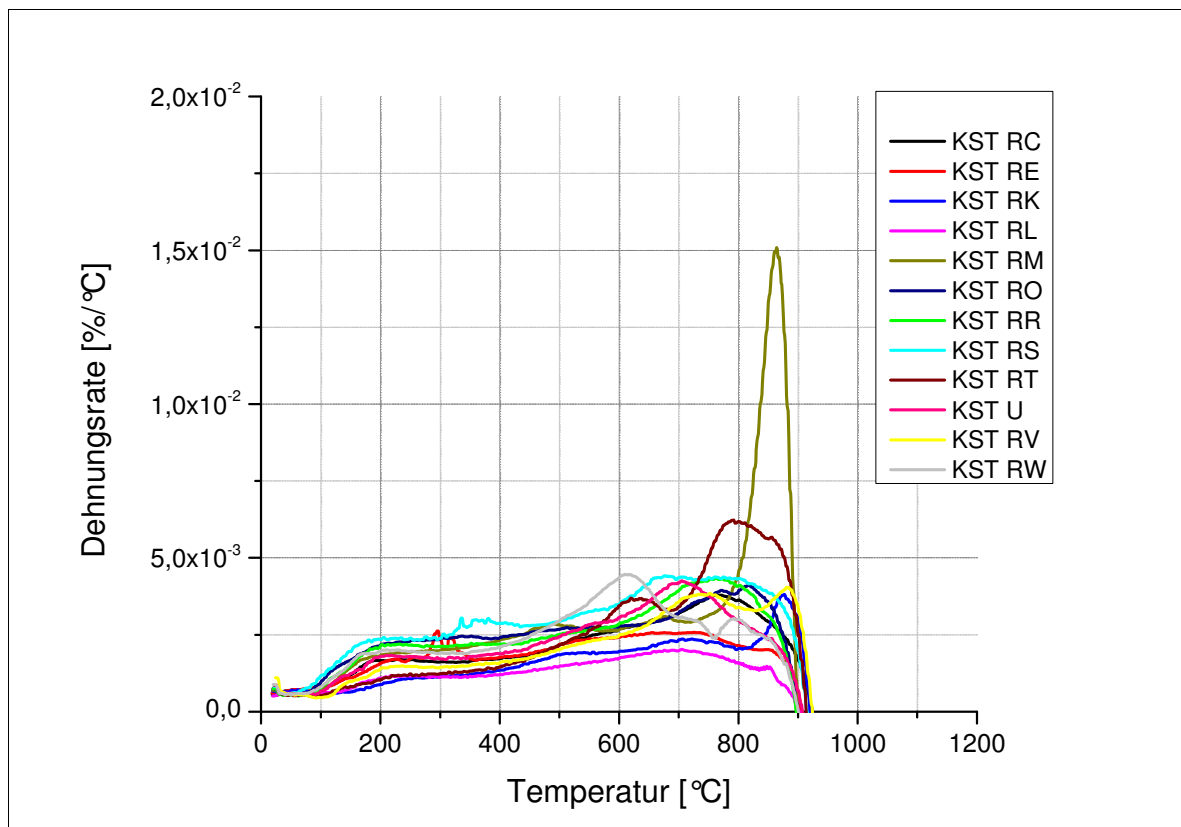
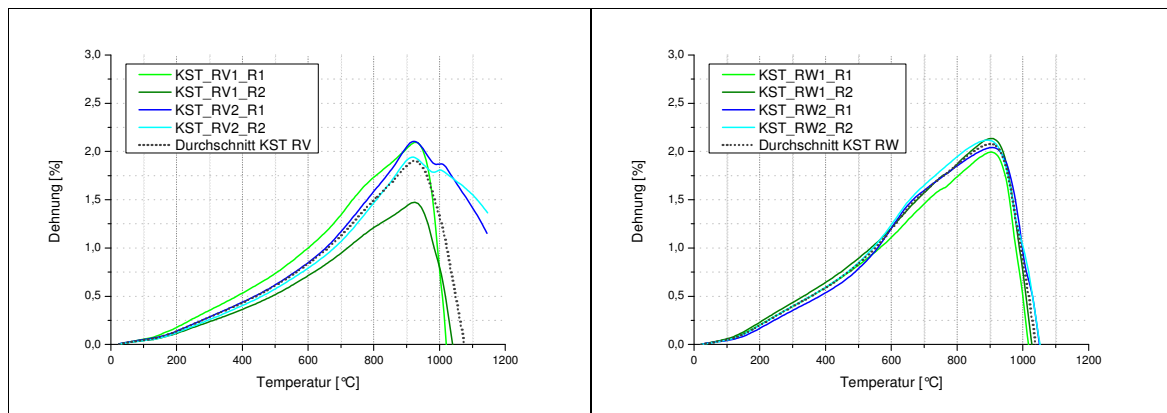


Abbildung 5.24: Thermische Ausdehnungsraten der Rückstellproben

Die folgenden zwei Graphiken veranschaulichen die Richtungsabhängigkeit des Ausdehnungsverhaltens der Handstücke der Lagerstätte RV im Vergleich zu der richtungsunabhängigen Ausdehnung der Handstücke der Lagerstätte RW.



**Abbildung 5.25 und 5.26: Thermische Ausdehnung RV und RW**

Für die Kalksteine der Rückstellproben sind die chemischen Analyseergebnisse, die Dünnschliffbewertungen, die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie die Roh- und Reindichten der Dissertation Hogewoning [HOGEWONING, 2008] zu entnehmen. Die Proben für die Analysen wurden im Anlieferungszustand der Kalksteine entnommen, d.h. die Proben lagen im Originalzustand vor, weder CO<sub>2</sub> noch H<sub>2</sub>O wurden ausgetrieben.

Anhand der Ergebnisse der Ausdehnungsversuche der Rückstellproben können keine Anhaltspunkte für Zusammenhänge zwischen Dehnung Rohdichte, Mineralphasenbestand und dem Chemismus der Proben abgeleitet werden.

Die Dünnschliffbetrachtungen zeigten, dass es sinnvoll ist, Material zur Analyse nahe zu den Dilatometerproben zu entnehmen, sowie die Dünnschliffe ortsnah zu den Dilatometerproben zu untersuchen, da aus den teilweise erheblichen Unterschieden im Verlauf der Dehnungskurven eine Richtungsabhängigkeit der Dehnung abzuleiten ist. (siehe Probe RV). Aufgrund dieser Inhomogenität der Kalksteine müssen durch die Ortsnähe zu den zu untersuchenden Probenstäbchen möglichst vergleichbare Verhältnisse geschaffen werden. Daher werden im Folgenden die neu ausgewählten und mittels Dilatometrie untersuchten Handstücke der Lagerstätten A, B, D, G, H, I, J, P und Y, chemisch, physikalisch und petrographisch ortsnah zu den Probenstäbchen untersucht.

### Dilatometermessungen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Handstücke der neu bepropten Lagerstätten dargestellt.

Abb. 5.27 und Abb. 5.28 zeigen die Mittelwerte der Dehnung der verschiedenen Lagerstätten, bzw. die Dehnungsrate in Abhängigkeit von der Temperatur.

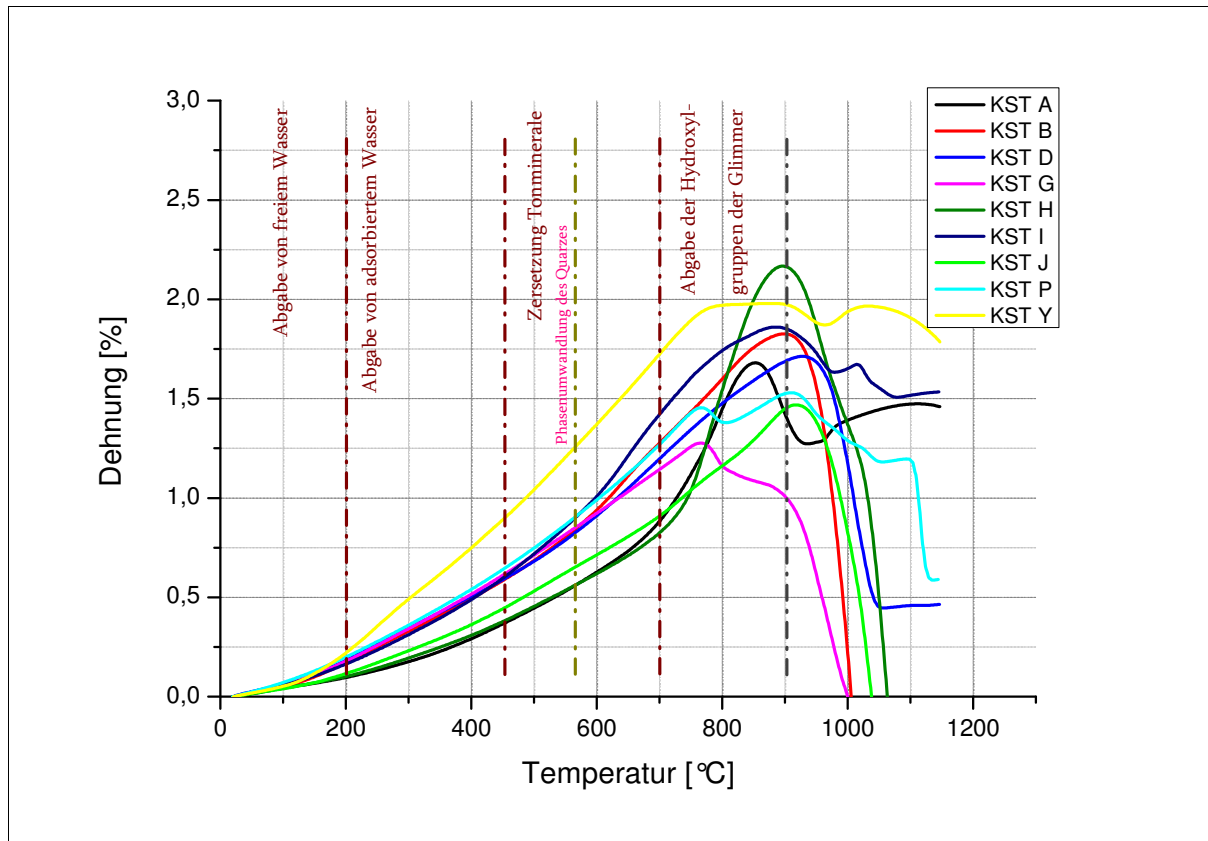


Abbildung 5.27: Thermische Ausdehnung der neu beprobten Lagerstätten

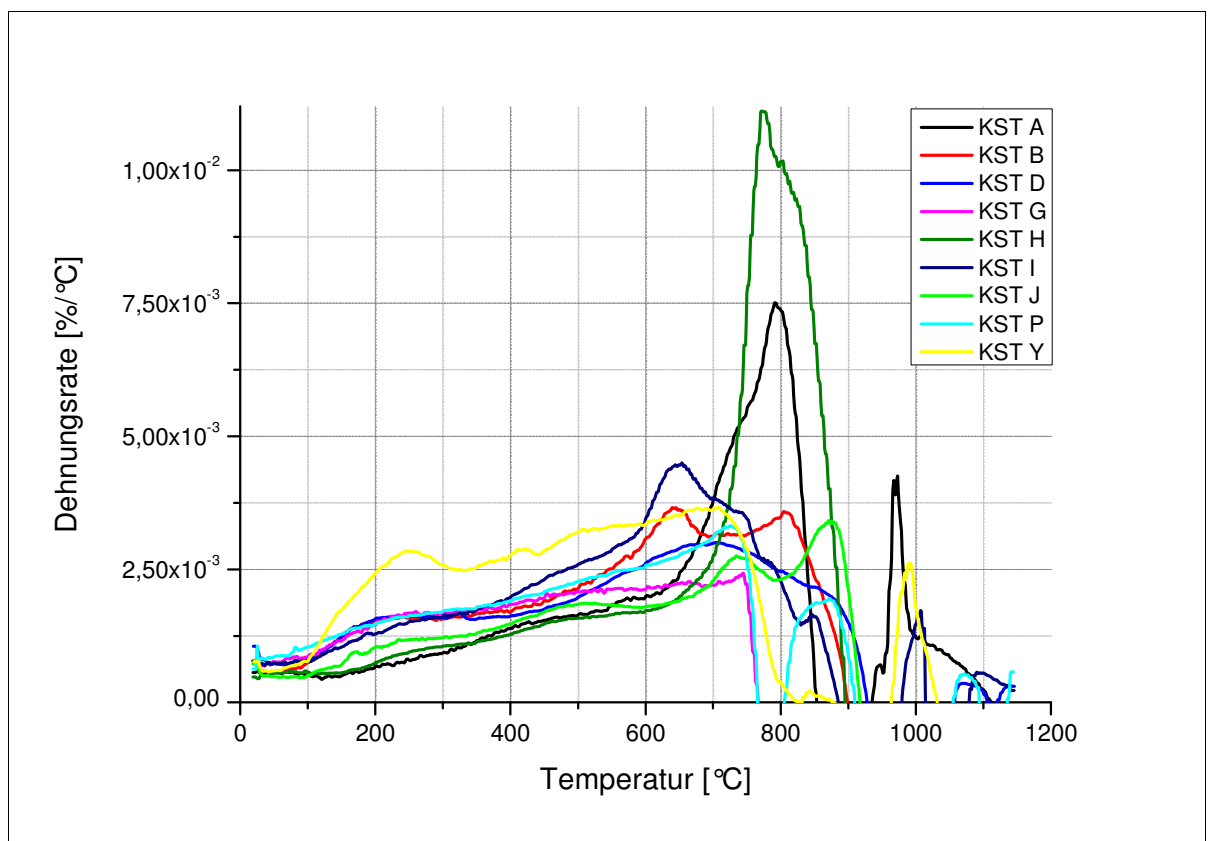


Abbildung 5.28: Thermische Dehnungsrate der neu beprobten Lagerstätten

Die maximale Ausdehnung der Kalksteine und der Kurvenverlauf der Dehnung sind unterschiedlich. Deutliche Steigungsänderungen der Dehnungskurve, d.h. Änderungen der Dehnungsraten sind gefügebedingt oder deuten auf Modifikationsänderungen einzelner mineralogischer Bestandteile oder chemische Reaktionen hin.

Nach [ZILCH, 2002] geben die Tonminerale zwischen 200 und 450 °C adsorbiertes Wasser ab (Verringerung der Dehnungsrate in diesem Bereich), zersetzen sich bei 450–600 °C und bilden eine reaktionsfähige Oxidmischung durch Zersetzung von Metakaolinit bei Temperaturen von 600-950 °C. Der Quarz erfährt bei 575 °C endotherm eine Umwandlung von der Tief- zur Hochtemperaturmodifikation, die bei einem hohen Quarzanteil mit einer Erhöhung der Dehnungsrate in diesem Temperaturbereich einhergehen sollte. Nach [PETZOLD, 1988] ist diese Umwandlung mit einer sprunghaften Vergrößerung des spezifischen Volumens um 0,8 % durch geänderte Verknüpfung der SiO<sub>4</sub>- Tetraeder verbunden. Die Mineralphasen der Glimmergruppe geben bei Temperaturen zwischen 700-900 °C ihre Hydroxidgruppen ab. Goethit verliert die Hydroxidgruppen spätestens bei 550 °C. Nach [JASMUND, 1993] findet die erste Stufe der Dehydroxylierung der Chlorite bei 550 °C mit geringer Verminderung der Basisabstände der Schichten statt und die zweite Stufe zwischen 600-850 °C.

Im Folgenden werden die verschiedenen Handstücke der unterschiedlichen Lagerstätten näher betrachtet. Die Handstücke wurden nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt.

Einige Handstücke der Lagerstätte B wurden nach ihrem äußeren Erscheinungsbild so ausgewählt, dass sie sich deutlich in ihrer chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden (z. B. B5 Metapelite), um Zusammenhänge zwischen der Dehnung und den Mineralphasen bzw. der chemischen Zusammensetzung festzustellen. Das Handstück B5 enthält z.B. Quarz in höheren Anteilen, so dass eine Änderung des thermischen Ausdehnungsverhaltens in Abhängigkeit von der Temperatur festzustellen ist. Die Graphiken 5.29 und 5.30 zeigen die Mittelwerte der Dehnungen, bzw. Dehnungsraten der Handstücke der Lagerstätte B.

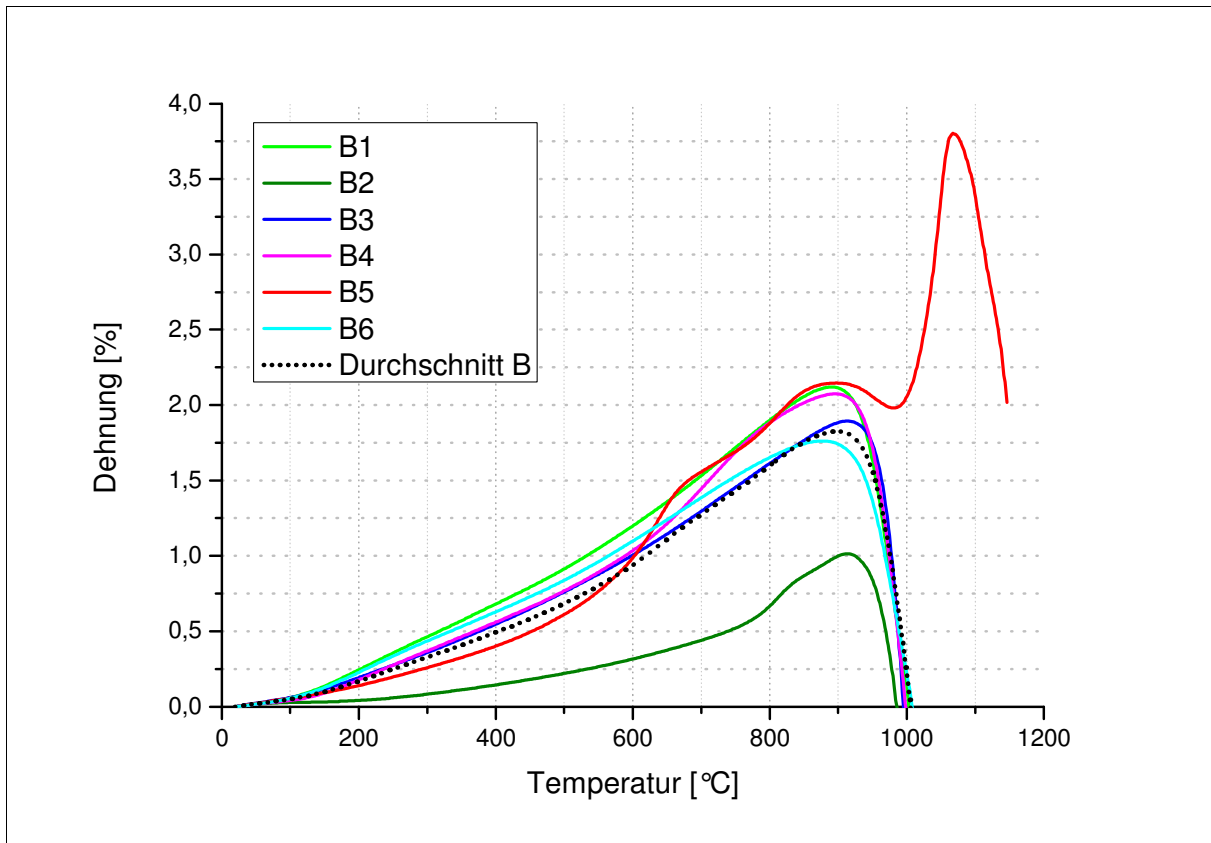


Abbildung 5.29: Thermische Ausdehnung der Handstücke der Lagerstätte B

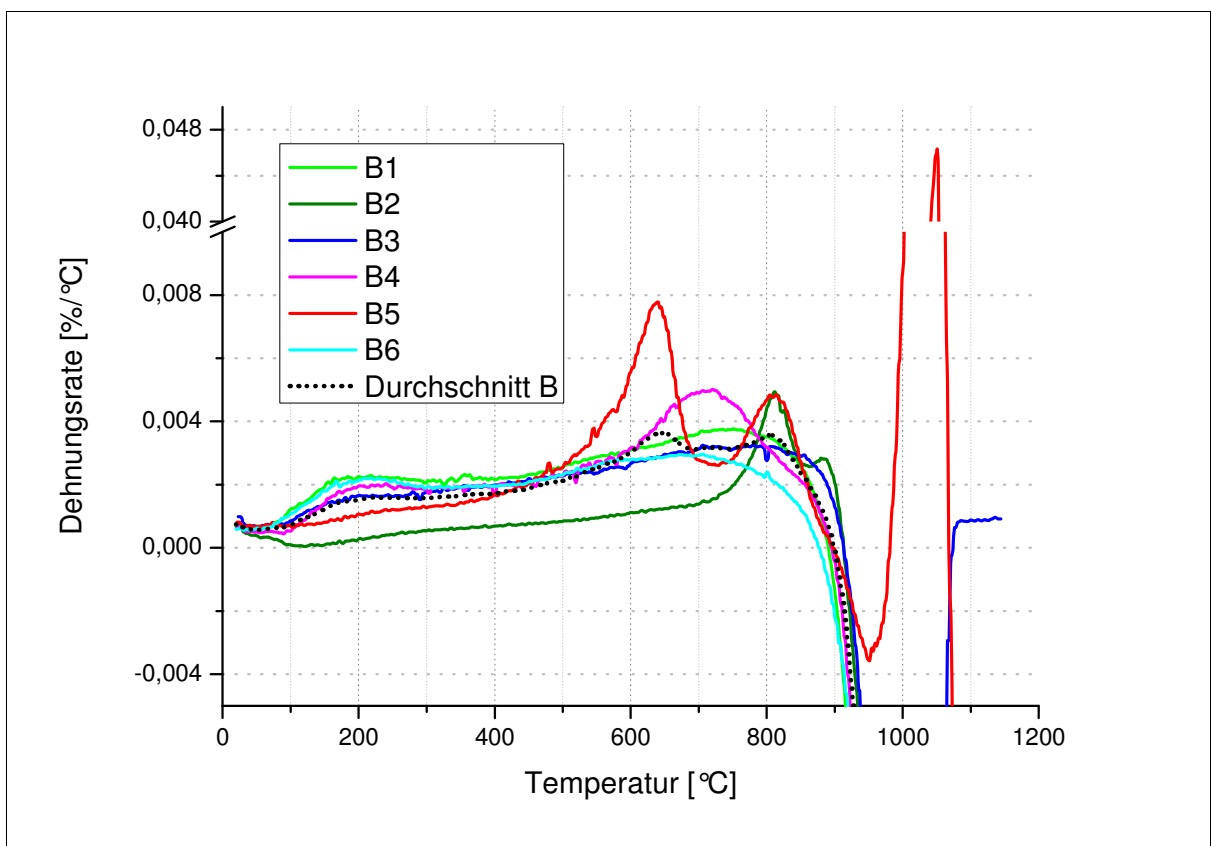


Abbildung 5.30: Thermische Dehnungsrate der Handstücke der Lagerstätte B

Die Handstücke B3, B6 und B1 weisen keine auffälligen Maxima im Dilatogramm der thermischen Ausdehnungsrate auf. Die Maxima des Dilatogramms der Dehnungsrate der Handstücke B6 und B4 sind zu tieferen Temperaturen verschoben. B2 hat eine deutlich niedrigere bis zu einer Temperatur von 720 °C konstante Dehnungsrate, mit anschließender Calcination. Diese über den breiten Temperaturbereich geringe Ausdehnung (Tab. 5.15) bzw. die geringe Ausdehnungsrate (Tab. 5.14) führt zu einer geringeren maximalen Ausdehnung (siehe Abb. 5.34).

Die Dehnungskurve des Handstückes B5 (Metapelit) zeigt im Vergleich zu den anderen Handstücken der Lagerstätte B einen deutlichen Anstieg der Dehnung im Bereich von 500 bis 620 °C. Innerhalb dieses Temperaturbereiches liegt die Modifikationsänderung des Quarz. Oberhalb einer Temperatur von 640 °C nimmt die Dehnungsrate ab. Der Anstieg der Dehnungsrate bis zu dieser Temperatur liegt an der Umwandlung des Quarz von der Tief- zur Hochtemperaturmodifikation. Das zweite Maximum zeigt das Calcitsignal und das dritte Maximum ist auf die Spinellbildung einiger Mineralphasen (Kap. 5.5) zurückzuführen.

Eine differenzierte Aussage über den Einfluss der Minerale auf die Ausdehnungsrate kann nicht getroffen werden, da die Minerale nicht quantitativ bestimmt wurden. Zudem ist der Einfluss der Ausdehnung der verschiedenen Minerale abhängig von den in dem Kalkstein vorhandenen Einzelkomponenten [FORKEL, 1955]. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass das gemessene Stäbchen eine geringfügig andere Zusammensetzung hatte, als die Analyse des Steines ortsnah zu dem untersuchten Stäbchen ausweist. Zusätzliche weitere physikalische und petrographische Parameter erschweren eine Diskussion der Zusammenhänge.

Die verschiedenen Dehnungsraten und Dehnungen für verschiedene Temperaturintervalle die anhand der Reaktionen von Tonmineralen und Glimmer gewählt wurden, sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die mittlere max. Dehnungsrate ist gelb unterlegt.

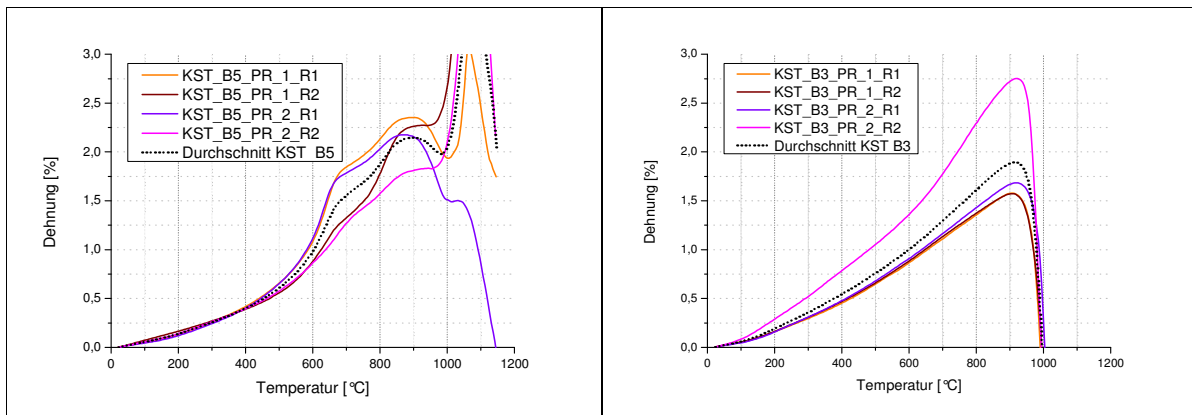
*Tabelle 5.14: Dehnungsraten der Mittelwerte der Handstücke B*

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |      |      |      |      |      |
|--------------------|--|------|------|------|------|------|
|                    | B1   | B2   | B3   | B4   | B5   | B6   |
| 20 - 200           | 1,35   | 0,23 | 1,08 | 0,99 | 0,78 | 1,26 |
| 200 - 450          | 2,19   | 0,56 | 1,89 | 1,93 | 1,42 | 2,00 |
| 450 - 600          | 2,71   | 0,90 | 2,37 | 2,50 | 3,29 | 2,47 |
| 600 - 650          | 3,20   | 1,18 | 2,81 | 3,59 | 6,95 | 2,83 |
| 650 - 700          | 3,48   | 1,31 | 3,03 | 4,62 | 4,47 | 2,92 |
| 700 - 750          | 3,71   | 1,62 | 3,18 | 4,86 | 2,70 | 2,84 |
| 750 - 800          | 3,64   | 2,93 | 3,17 | 3,90 | 3,75 | 2,49 |
| 800 - 850          | 3,13   | 4,00 | 3,04 | 2,64 | 4,22 | 1,81 |
| 850 - 900          | 1,11   | 2,63 | 2,38 | 1,15 | 1,10 | -0,1 |
| 700 - 900          | 2,88   | 2,79 | 2,95 | 3,14 | 2,93 | 1,76 |

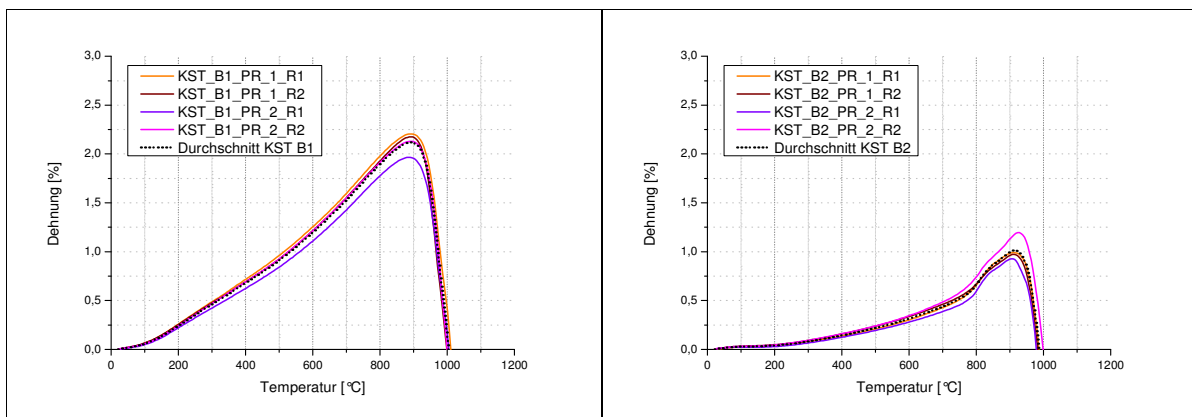
**Tabelle 5.15: Dehnungen der Mittelwerte der Handstücke B**

| Temperatur<br>[°C] | Dehnung<br>[%] |      |      |      |      |        |
|--------------------|----------------|------|------|------|------|--------|
|                    | B1             | B2   | B3   | B4   | B5   | B6     |
| 20-200             | 0,09           | 0,03 | 0,08 | 0,06 | 0,07 | 0,08   |
| 200-450            | 0,55           | 0,14 | 0,46 | 0,48 | 0,35 | 0,5    |
| 450-600            | 0,40           | 0,13 | 0,35 | 0,38 | 0,49 | 0,37   |
| 600-650            | 0,16           | 0,06 | 0,14 | 0,18 | 0,35 | 0,14   |
| 650-700            | 0,17           | 0,07 | 0,15 | 0,23 | 0,23 | 0,15   |
| 700-750            | 0,19           | 0,08 | 0,16 | 0,25 | 0,13 | 0,14   |
| 750-800            | 0,18           | 0,14 | 0,16 | 0,19 | 0,19 | 0,12   |
| 800-850            | 0,16           | 0,2  | 0,15 | 0,13 | 0,22 | 0,09   |
| 850-900            | 0,06           | 0,13 | 0,12 | 0,06 | 0,05 | <-0,01 |
| 700-900            | 0,51           | 0,26 | 0,43 | 0,51 | 0,39 | 0,39   |

Die folgenden Abbildungen zeigen im Vergleich zum annähernd isotropen thermischen Dehnungsverhalten der Handstücke B1 und B2 das anisotrope thermische Dehnungsverhalten der Handstücke B3 und B5.



**Abbildung 5.31 und 5.32: Ausdehnungsverhalten der Handstücke B5 und B3**



**Abbildung 5.33 und 5.34: Ausdehnungsverhalten der Handstücke B1 und B2**

In Abbildung 5.35 und 5.36 sind die ähnlichen Ausdehnungskurven und Kurven der Ausdehnungsraten der einzelnen Probenstäbchen der Lagerstätte A dargestellt. Der Kurvenverlauf der beprobten Steine zeigt dieselben Ausdehnungsanomalien (Änderung der Steigung bei bestimmten Temperaturen).

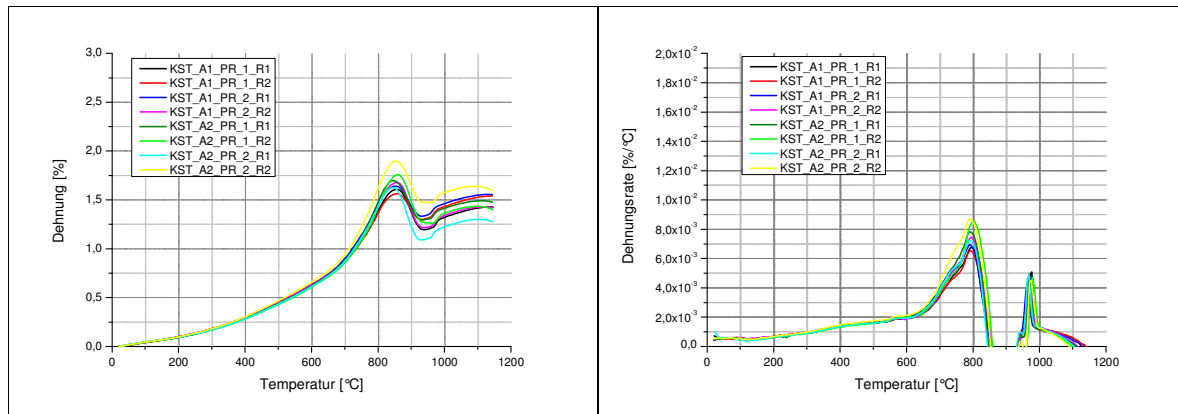


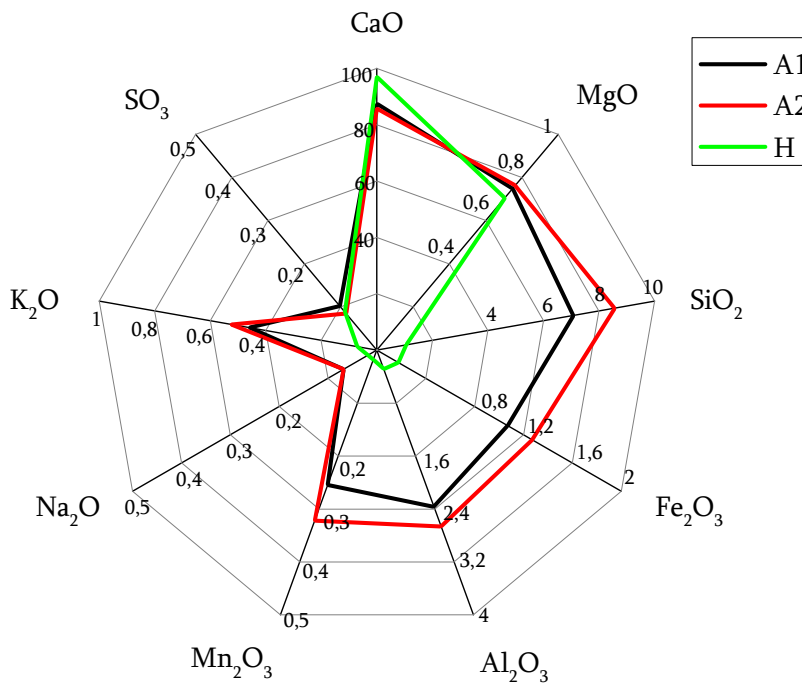
Abbildung 5.35 und 5.36: **Dehnung und Dehnungsraten der Handstücke der Lagerstätte A**

Die homogenen Kalksteine des mittleren und unteren Cenomans A1 und des oberen Cenomans A2 der Kalklagerstätte A weisen beide einen sehr geringen Kalkstandard mit einem relativ hohen Anteil an Nebenbestandteilen (Abb. 5.37) auf. Beide Kalksteine zeigen eine ähnliche Matrix und wurden nach Dunham als Wackestone klassifiziert. Für beide Kalksteine wurden die Hauptbestandteile Calcit und Quarz und als Nebenbestandteile Chlorite, Tonminerale und Glimmer röntgendiffraktometrisch bestimmt. Der Phasenumwandlung des Quarzes ist aufgrund des geringen Anteils an Quarz kaum zu erkennen. Die Kalksteine A1 und A2 zeigen die größten mittleren Dehnungsraten zwischen 750 und 800°C.

Tabelle 5.16: **Mittelwerte der Dehnungsraten und Dehnungen der Handstücke der Lagerstätte A**

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |       | Dehnung<br>[%] |      |
|--------------------|--|-------|----------------|------|
|                    | A1   | A2    | A1             | A2   |
| 20-200             | 0,55   | 0,5   | 0,05           | 0,05 |
| 200-450            | 1,09   | 1,07  | 0,27           | 0,27 |
| 450-600            | 1,73   | 1,75  | 0,26           | 0,26 |
| 600-650            | 2,09   | 2,17  | 0,10           | 0,11 |
| 650-700            | 2,92   | 3,12  | 0,14           | 0,15 |
| 700-750            | 4,52   | 4,98  | 0,23           | 0,25 |
| 750-800            | 6,13   | 7,04  | 0,3            | 0,36 |
| 800-850            | 4,20   | 4,93  | 0,21           | 0,25 |
| 850-900            | -4,35  | -5,96 | 0,21           | 0,03 |
| 700-900            | 2,63   | 2,78  | 0,51           | 0,55 |

Das Handstück der Lagerstätte H hat im Vergleich zu den Kalksteinen A1 und A2 eine deutlich größere maximale Ausdehnung. Nach Dunham ergab die Dünnschliffauswertung eine Einordnung in den Faziestyp Mudstone. Die Handstücke der Lagerstätte A wurden hingegen als Wackestone eingeordnet. Das Radardiagramm verdeutlicht, dass der Gehalt an Nebenbestandteilen der Kalksteine A mit annähernd 10 % mehr  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ca. 0,3 % mehr  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ , sowie einer ca. 8-fachen Menge an  $\text{SiO}_2$  deutlich größer ist.



**Abbildung 5.37: oxidische Zusammensetzung der Handstücke A1, A2 und H [Masse- %]**

Neben den Hauptbestandteilen Calcit und Quarz wurden die Mineralphasen Glimmer, Tonminerale und Chlorite als Nebenbestandteile in den Handstücken der Lagerstätten A und H nachgewiesen (siehe Abb. 5.6 und 5.7)

Die Ausdehnung der Probenstäbchen der Lagerstätten A und H ist im Bereich von 200 bis 720 °C annähernd gleich. Anschließend steigt die Dehnung der Probenstäbchen der Lagerstätte H deutlich an, wobei die Probenstäbchen der Probe 2 eine deutliche Differenz der Dehnung aufweisen.

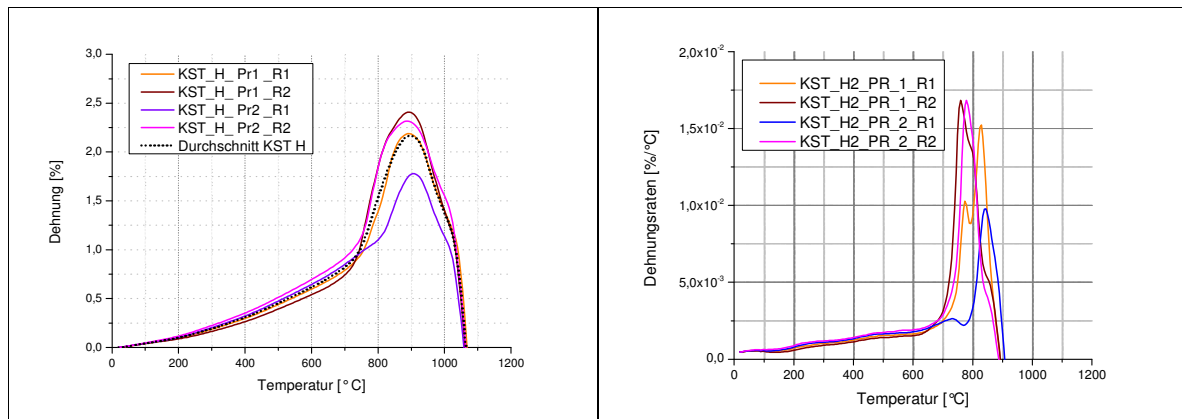


Abbildung 5.38 und 5.39: Dehnung und Dehnungsraten des Handstückes H

5.17: Mittelwerte der Dehnung und Dehnungsraten des Handstückes H

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] | Dehnung<br>[%] |
|--------------------|--|----------------|
|                    | H  | H              |
| 20-200             | 0,57   | 0,05           |
| 200-450            | 1,11   | 0,18           |
| 450-600            | 1,61   | 0,27           |
| 600-650            | 1,81   | 0,17           |
| 650-700            | 2,30   | 0,1            |
| 700-750            | 4,32   | 0,15           |
| 750-800            | 1,01   | 0,37           |
| 800-850            | 9,03   | 0,5            |
| 850-900            | 3,37   | 0,33           |
| 700-900            | 6,68   | 0,76           |

Die Dilatometerkurven der untersuchten Handstücke G1 und G2 zeigen deutliche Unterschiede in der Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur, während die Kurvenverläufe der Probenstäbchen G1 bzw. der Probenstäbchen G2 nahezu identisch sind.

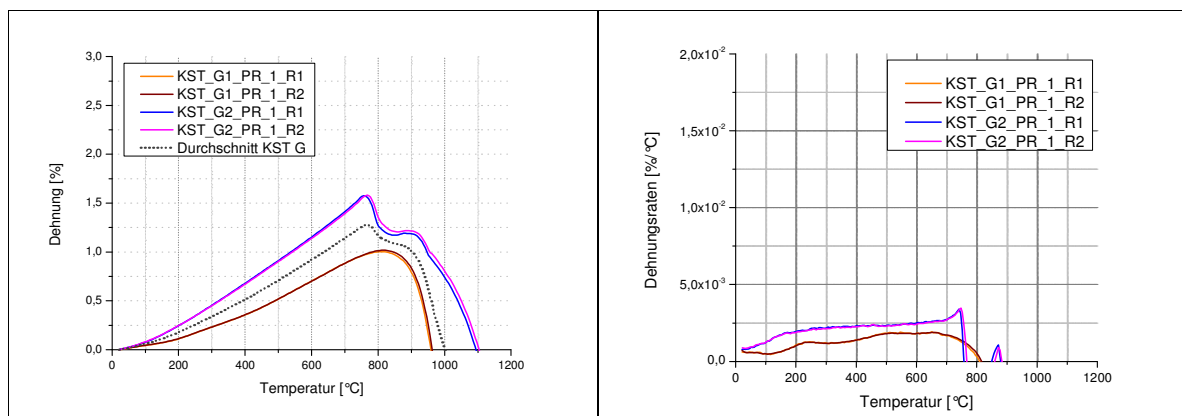


Abbildung 5.40 und 5.41: Dehnung und Dehnungsraten der Handstücke G1 und G2

Der Kurvenverlauf der Handstücke G1 und G2 zeigt deutliche Unterschiede der Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur. Die Proben unterscheiden sich unverkennbar im Chemismus (siehe Tab. 5.2), der Mineralzusammensetzung (siehe Abb. 4.8) und der Einordnung nach Dunham (siehe Tabelle 5.10) Die Porosität von G1 ist mit 9,34 um das 3,6 - fache größer als beim Kalkstein G2. Das erste lokale Maximum des Kalksteines G2 liegt aufgrund des dolomitischen Anteils bei einer Temperatur von 780 °C. Die maximale Ausdehnung des Kalksteines G1 liegt mit 1,01 % bei einer Temperatur von 811 °C. Die Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur ist bei den Probenstäbchen desselben Handstückes ähnlich und damit richtungsunabhängig.

G1 erreicht die maximale mittlere Dehnungsrate in einem Temperaturbereich von 600-650 °C, das Handstück G2 in einem Bereich von 700-750 °C.

*Tabelle 5.18: Mittelwerte der Ausdehnungsraten und Dehnungen der Handstücke G1 und G2*

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |       | Dehnung<br>[%] |       |
|--------------------|--|-------|----------------|-------|
|                    | G1   | G2    | G1             | G2    |
| 20-200             | 0,63   | 1,37  | 0,05           | 0,10  |
| 200-450            | 1,28   | 2,18  | 0,21           | 0,41  |
| 450-600            | 1,80   | 2,37  | 0,3            | 0,46  |
| 600-650            | 1,84   | 2,52  | 0,18           | 0,24  |
| 650-700            | 1,80   | 2,64  | 0,09           | 0,13  |
| 700-750            | 1,54   | 3,04  | 0,08           | 0,14  |
| 750-800            | 0,91   | -4,79 | 0,08           | 0,02  |
| 800-850            | -0,5   | -2,46 | 0              | 0,02  |
| 850-900            | -3,43  | 2,07  | -0,30          | -0,09 |
| 700-900            | -0,38  | -1,02 | 0,01           | 0,12  |

Die Kalksteine der Lagerstätte D1 und D2 haben einen hohen Kalkstandard, vergleichbare Dichten und Porositäten und unterscheiden sich geringfügig im Gehalt an SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O und SiO<sub>2</sub> (Abb. 5.42).

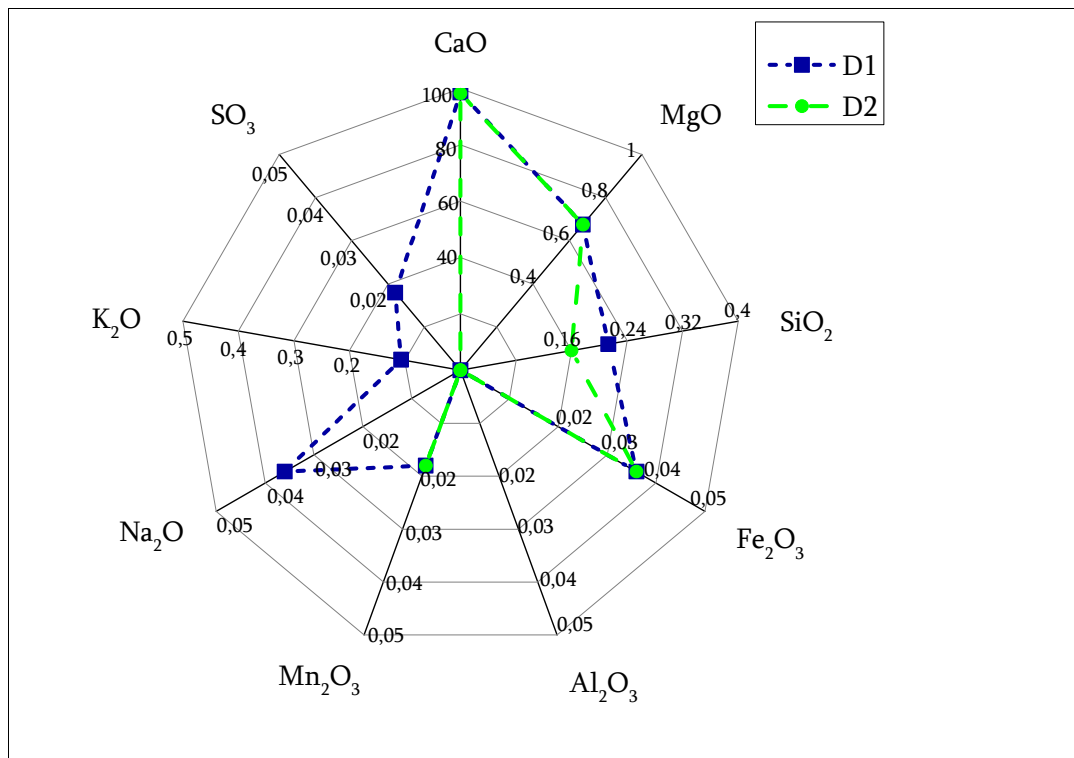


Abbildung 5.42: Vergleich des Chemismus der Handstücke D1 und D2 [Masse- %]

Nebenbestandteile der Mineralphasen konnten aufgrund der Reinheit der Kalksteine und den daraus resultierenden zu geringen Rückstand für die Diffraktometrie nicht bestimmt werden. Die Kurven zeigen eine deutliche Richtungsabhängigkeit der Dehnung. Für den Kalkstein D1 ergibt sich eine Differenz der maximalen Dehnung von 0,81 % und für den Kalkstein D2 eine Differenz von 0,62 %. Die Differenzen der anisotropen Dehnungen (siehe Dünnschliffe) sind aufgrund der ähnlichen chemischen und physikalischen Parameter auf die Petrographie zurückzuführen. Die beprobten Kalksteine dieser Lagerstätte gehören dem Faziestyp Boundstone, einer gewachsenen Struktur, an. D2 weist im Schliffbild im Gegensatz zu D1 einen großen Clust im Boundstone und eine größere Körnung auf.

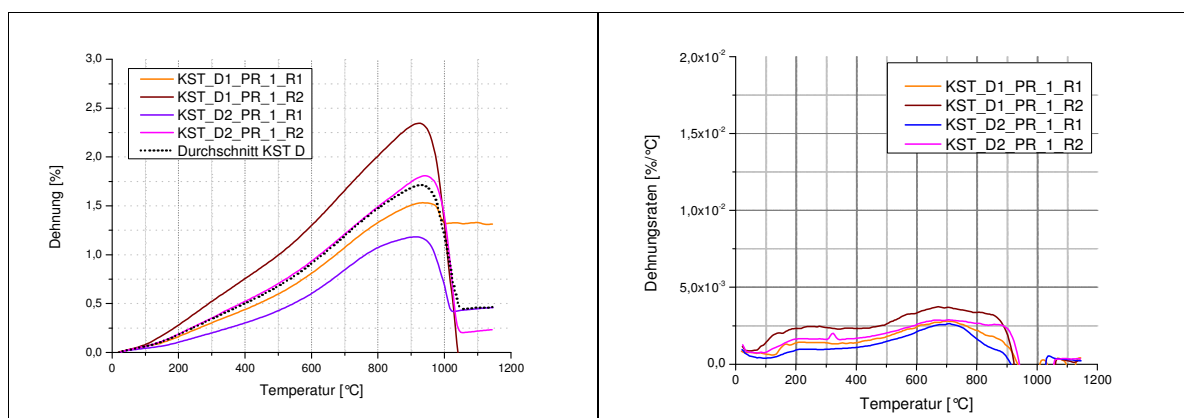


Abbildung 5.43 und 5.44: Dilatometerkurven der Handstücke D1 und D2

Die größten mittleren Dehnungsraten bei D1 liegen im Bereich von 650 - 700 °C, und bei D2 im Temperaturbereich von 650 - 750 °C. Die Mittelwerte der Ausdehnungsraten des Handstückes D1 sind in allen betrachteten Temperaturbereichen größer. Der Quarzgehalt der beiden Handstücke ist sehr gering (SiO<sub>2</sub>- Gehalt beider Proben liegt unter 0,13 %).

**Tabelle 5.19: Mittlere Dehnung und mittlere Dehnungsraten der Handstücke D1 und D2**

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |      | Dehnung<br>[%] |      |
|--------------------|--|------|----------------|------|
|                    | D1   | D2   | D1             | D2   |
| 20-200             | 1,22   | 0,82 | 0,09           | 0,06 |
| 200-450            | 1,89   | 1,36 | 0,47           | 0,34 |
| 450-600            | 2,41   | 1,89 | 0,36           | 0,28 |
| 600-650            | 3,03   | 2,51 | 0,15           | 0,13 |
| 650-700            | 3,22   | 2,70 | 0,16           | 0,13 |
| 700-750            | 3,17   | 2,70 | 0,16           | 0,13 |
| 750-800            | 2,91   | 2,38 | 0,14           | 0,12 |
| 800-850            | 2,64   | 1,94 | 0,13           | 0,1  |
| 850-900            | 2,18   | 1,67 | 0,11           | 0,09 |
| 700-900            | 0,27   | 0,21 | 0,42           | 0,33 |

Die Lagerstätte J wurde beprobt, da die Vorversuche das anisotrope Dehnungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur zeigten. Außerdem haben die Handstücke J1, J2, J3 und J5 einen hohen Kalkstandard von  $> 10^4$ , die Handstücke J4 und J6 einen mittleren, so dass die Anzahl der verschiedenen Parameter, die das Dehnungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur deutlich beeinflussen, um den Einfluss der chemischen Parameter reduziert wird.

Für die Proben der Lagerstätte J ergeben sich die in der Abb. 5.45 und Abb. 5.35 dargestellten Abhängigkeiten der Dehnung bzw. Dehnungsrate von der Temperatur.

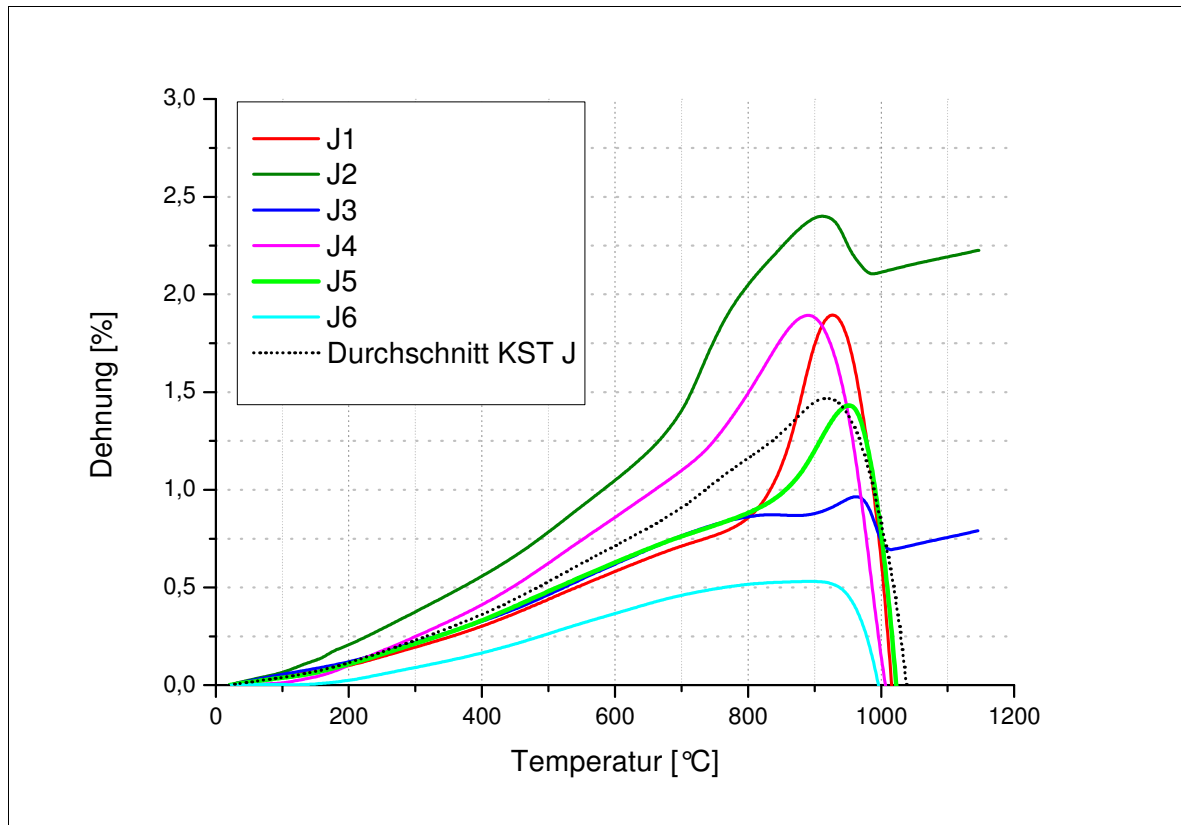


Abbildung 5.45: Abhängigkeit der Mittelwerte der Dehnung der Handstücke J von der Temperatur

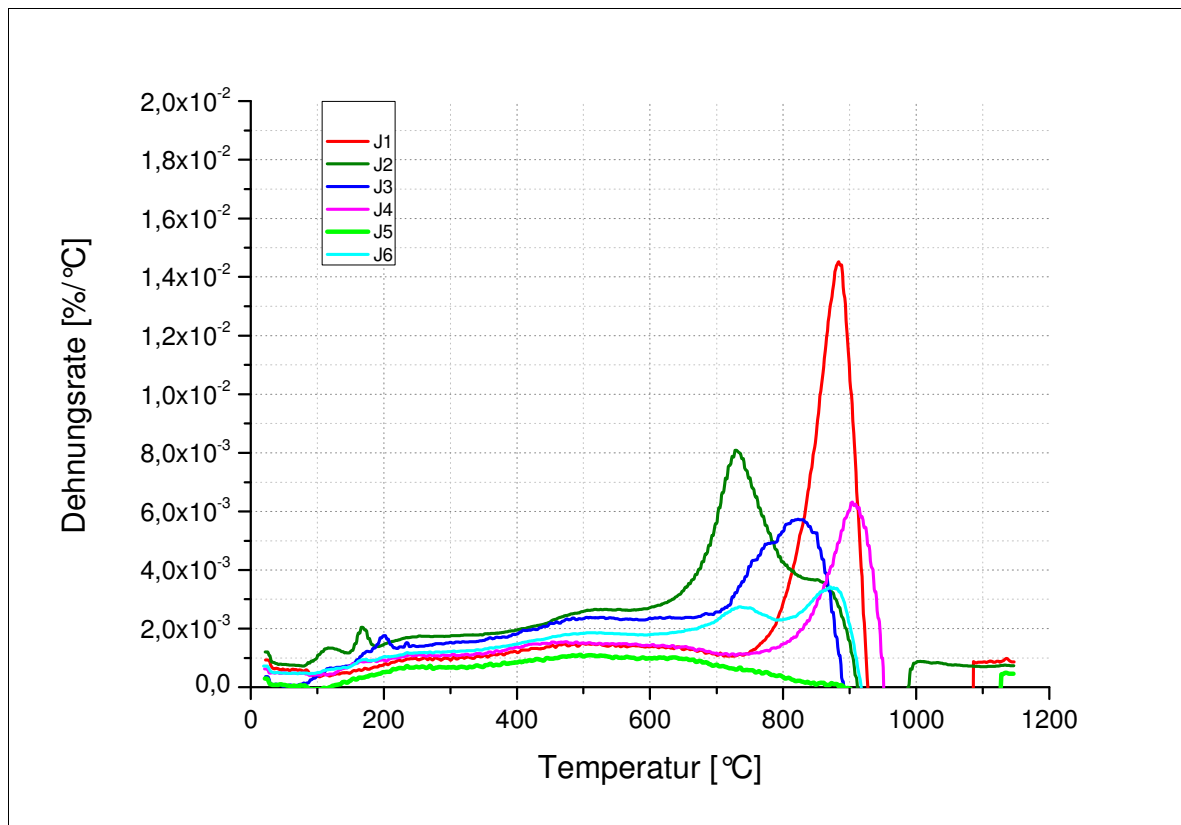


Abbildung 5.46: Abhängigkeit der Dehnungsrate der Mittelwerte der Handstücke J von der Temperatur

Die Maxima der Dilatometerkurven der Probenstäbchen der Lagerstätte J liegen bei Temperaturen von 700 bis 900 °C.

*Tabelle 5.20: Mittlere Dehnungsraten der Probenstäbchen J*

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |      |      |      |      |      |
|--------------------|--|------|------|------|------|------|
|                    | J1   | J2   | J3   | J4   | J5   | J6   |
| 20-200             | 0,57   | 1,16 | 0,67 | 0,58 | 0,60 | 0,15 |
| 200-450            | 1,07   | 1,82 | 1,08 | 1,63 | 1,19 | 0,75 |
| 450-600            | 1,43   | 2,58 | 1,53 | 2,32 | 1,49 | 1,04 |
| 600-650            | 1,36   | 2,94 | 1,50 | 2,36 | 1,40 | 1,0  |
| 650-700            | 1,23   | 4,23 | 1,41 | 2,44 | 1,27 | 0,87 |
| 700-750            | 1,10   | 7,33 | 1,15 | 3,17 | 1,13 | 0,65 |
| 750-800            | 1,81   | 5,50 | 0,78 | 4,78 | 1,27 | 0,47 |
| 800-850            | 5,38   | 3,84 | 1,68 | 0,16 | 1,99 | 0,21 |
| 850-900            | 1,24   | 2,94 | 0,16 | 2,17 | 4,42 | 0,08 |
| 700-900            | 5,19   | 4,91 | 0,57 | 3,89 | 2,20 | 0,35 |

*Tabelle 5.21: Mittlere Dehnung der Probenstäbchen J*

| Temperatur<br>[°C] | Dehnung<br>[%] |      |       |      |      |      |
|--------------------|----------------|------|-------|------|------|------|
|                    | J1             | J2   | J3    | J4   | J5   | J6   |
| 20-200             | 0,05           | 0,09 | 0,06  | 0,03 | 0,05 | 0,01 |
| 200-450            | 0,17           | 0,33 | 0,19  | 0,26 | 0,2  | 0,1  |
| 450-600            | 0,25           | 0,43 | 0,26  | 0,39 | 0,27 | 0,18 |
| 600-650            | 0,14           | 0,27 | 0,15  | 0,23 | 0,15 | 0,1  |
| 650-700            | 0,07           | 0,17 | 0,07  | 0,12 | 0,07 | 0,05 |
| 700-750            | 0,06           | 0,29 | 0,06  | 0,13 | 0,06 | 0,04 |
| 750-800            | 0,07           | 0,34 | 0,05  | 0,2  | 0,06 | 0,03 |
| 800-850            | 0,16           | 0,22 | 0,03  | 0,26 | 0,08 | 0,02 |
| 850-900            | 0,45           | 0,18 | <0,01 | 0,22 | 0,15 | 0,01 |
| 700-900            | 0,30           | 0,70 | 0,11  | 0,47 | 0,18 | 0,07 |

Die Handstücke 1 und 2 der Lagerstätte J weisen einen ähnlichen Chemismus auf (Abb.5.47).

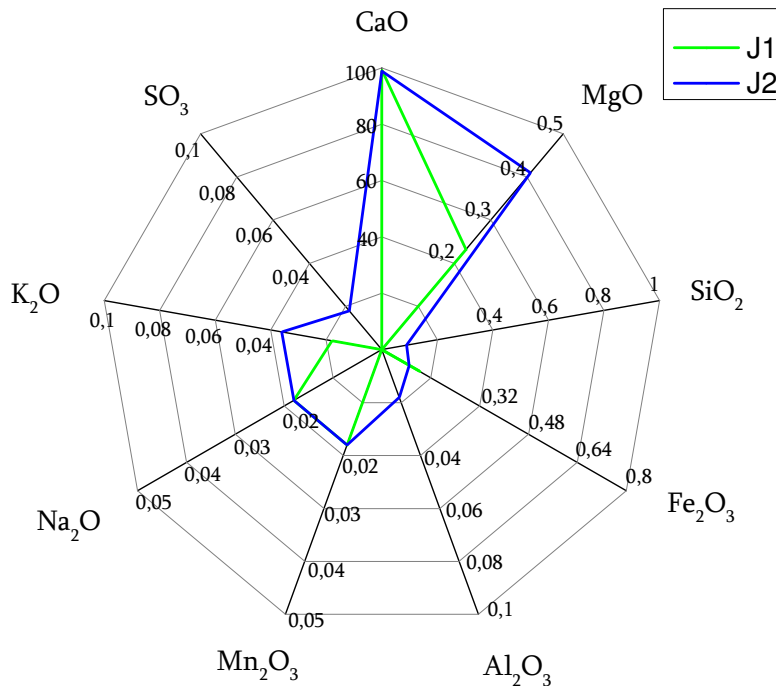


Abbildung 5.47: Vergleich des Chemismus der Probe J1 und J2 [Masse- %]

Sie zeigen sehr unterschiedliche Gefügemerkmale. J1 wurde nach Dunham als Floatstone bzw. Mudstone-Wackestone und Wackestone klassiert. Auch J2 zeigt verschiedene Faziestypen innerhalb eines Handstückes vom Mudstone über Wackestone bis zum peloidalen Grainstone.

Die Kurvenverläufe der Dilatometrie der Probenstäbchen des Handstückes J1 sind im Gegensatz zu den Verläufen des Handstückes J2 sehr ähnlich. Die Differenz der Verläufe von J2 ist im Temperaturbereich von 200 - 700 °C groß und nimmt anschließend ab. Bis zum Maximum nähern sich die Kurven an.

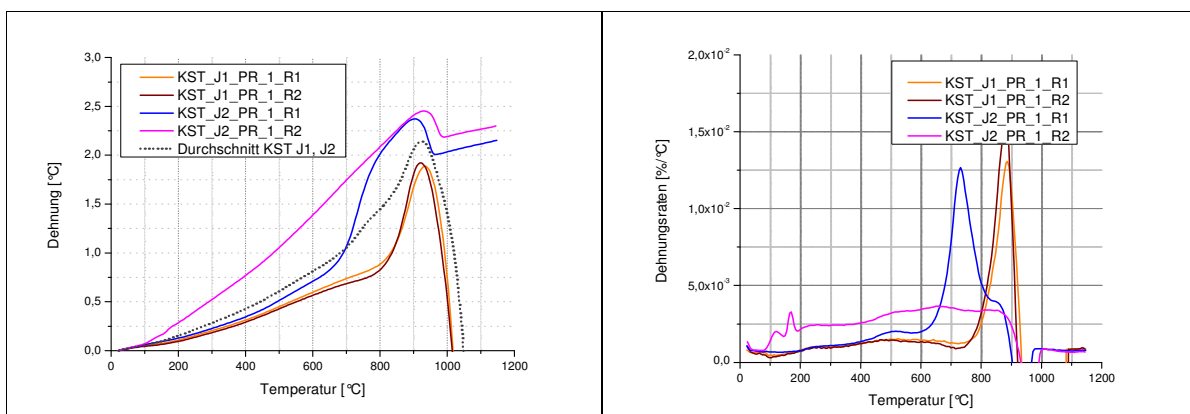


Abbildung 5.48 und 5.49: Dehnung und Dehnungsraten der Handstücke J1 und J2

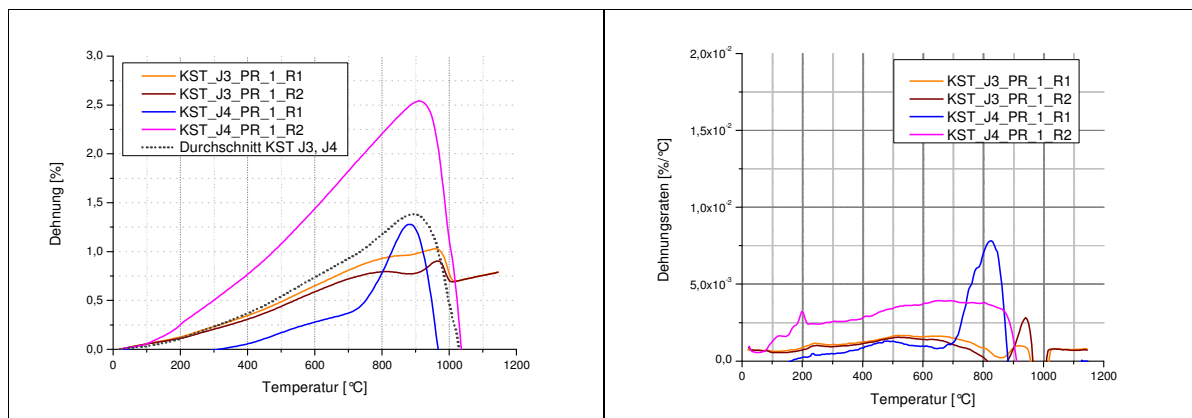
**Tabelle 5.22: mittlere Dehnung der Probenstäbchen J1 und J2**

| Temperatur [°C] | Dehnung [%] |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | 20-200      | 200-450 | 450-600 | 600-650 | 650-700 | 700-750 | 750-800 | 700-900 |
| J1              | 0,05        | 0,17    | 0,25    | 0,14    | 0,07    | 0,06    | 0,07    | 0,3     |
| J2              | 0,09        | 0,33    | 0,43    | 0,27    | 0,17    | 0,29    | 0,34    | 0,7     |

**Tabelle 5.23: Mittlere Dehnungsraten der Handstücke J1 und J2**

| Temperatur [°C] | Dehnungsraten [(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | 20-200  | 200-450 | 450-600 | 600-650 | 650-700 | 700-750 | 750-800 | 700-900 |
| J1              | 0,57  | 1,07    | 1,43    | 1,36    | 1,23    | 1,10    | 1,81    | 5,19    |
| J2              | 1,16  | 1,82    | 2,58    | 2,94    | 4,23    | 7,33    | 5,50    | 4,91    |

Den größten Unterschied der Kurvenverläufe der Probenstäbchen eines Handstückes weisen J4R1 und J4R2. (Abb.5.50) im Dehnungsverhalten auf. Hieraus lässt sich eine Richtungsabhängigkeit ableiten. Als Faziestyp wurde nach Dunham ein Boundstone klassiert. Das Radardiagramm (Abb. 5.52) zeigt einen Unterschied im Chemismus bezüglich der oxidischen Zusammensetzung von SiO<sub>2</sub>, FeO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O und SO<sub>3</sub>. Das Handstück J3 wurde als Grainstone und das Handstück J4 als Boundstone klassiert.



**Abbildung 5.50 und 5.51: Dehnung und Dehnungsraten der Handstücke J3 und J4**

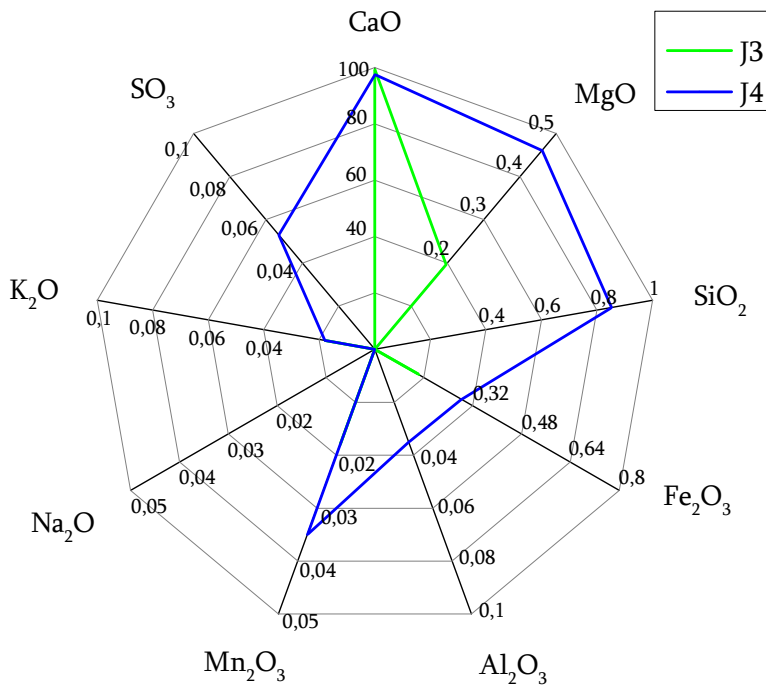


Abbildung 5.52: Chemismus der Handstücke J3 und J4 [Masse- %]

Abbildung 5.24. Mittelwerte der Dehnungsraten der Handstücke J3 und J4

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                    | 200-450  | 450-600 | 600-650 | 650-700 | 700-750 | 750-800 | 800-850 | 850-900 | 700-900 |
| J3                 | 1,08   | 1,53    | 1,50    | 1,41    | 1,15    | 0,78    | 0,17    | 0,16    | 0,57    |
| J4                 | 1,63   | 2,32    | 2,36    | 2,44    | 3,17    | 4,78    | 0,16    | 2,17    | 3,89    |

Das Handstück J4 hat die höchste Dehnungsrate im Temperaturbereich von 750 - 800 °C. Die höchste Dehnungsrate von J3 ist zu niedrigeren Temperaturen verschoben (Temperaturbereich von 450 – 600 °C).

Der Verlauf der Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur der Handstücke J5 und J6 ist in Abbildung 5.53 und Abbildung 5.54 und der Unterschied der oxidischen Zusammensetzung in Abbildung 5.55 dargestellt.

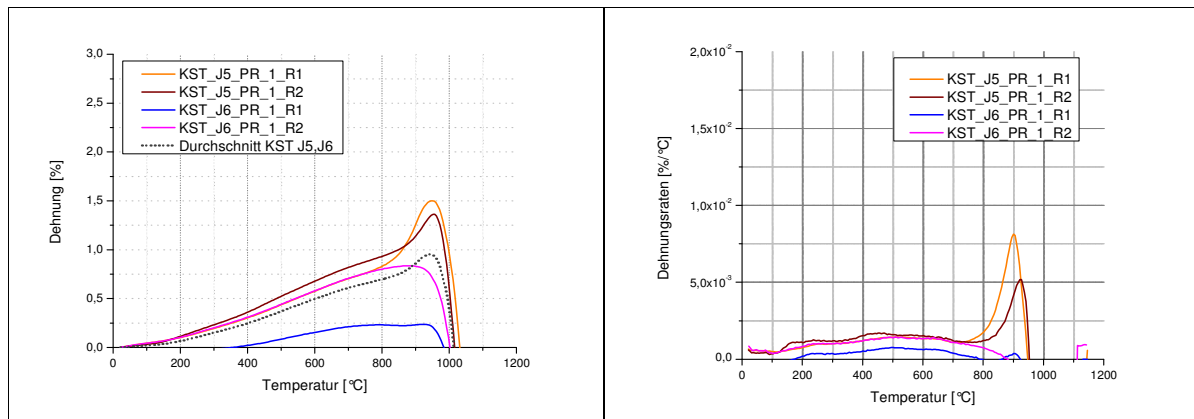


Abbildung 5.53 und 5.54: Abhängigkeit der Dehnung der Handstücke J5 und J6 von der Temperatur

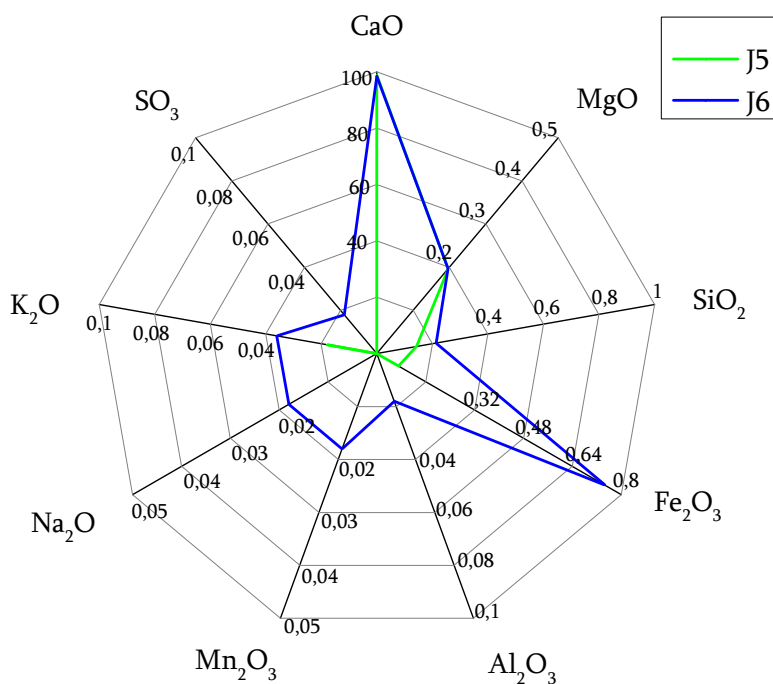


Abbildung 5.55: Unterschiede der oxidischen Zusammensetzung der Proben J5 und J6 [Masse- %]

Die beiden Handstücke unterscheiden sich besonders im Eisengehalt voneinander. J6 zeigt im Unterschied zu J5 eine Richtungsabhängigkeit der Dehnung.

Für die dolomitischen Handstücke I1, I2, P1, und P2 wurden folgende Dilatometerkurven aufgenommen:

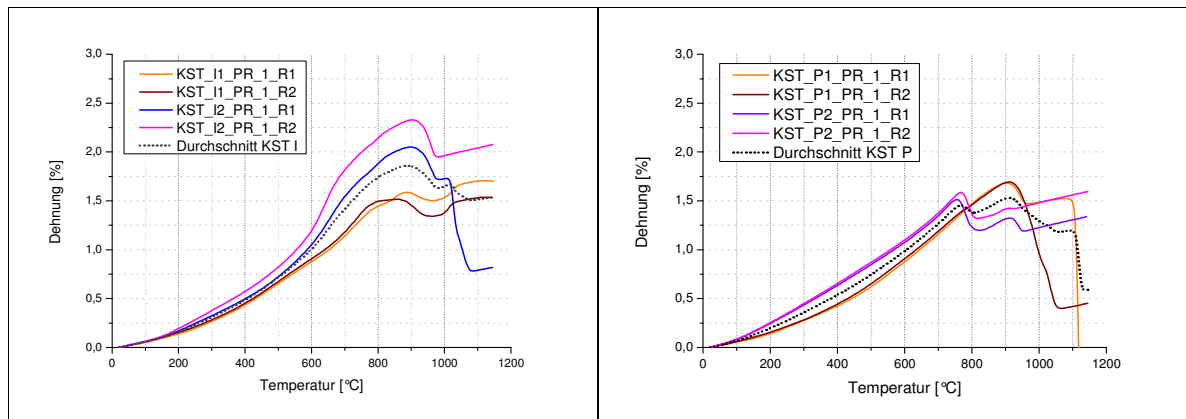


Abbildung 5.56 und 5.57: Abhängigkeit der Dehnung der dolomitischen Kalksteine von der Temperatur

Die Verläufe der Dilatometerkurven der Handstücke I1 und I2 unterscheiden sich ab 570° C deutlich. Die Dehnung der Probenstäbchen des Handstückes I1 sind bei dieser Temperatur um 0,4 % geringer. Die Lage der Maxima ist in Abhängigkeit vom relativ hohen MgO- Gehalt von P2 und I1 (Abb. 5.58) zu tieferen Temperaturen im Vergleich mit I2 und P1 verschoben.

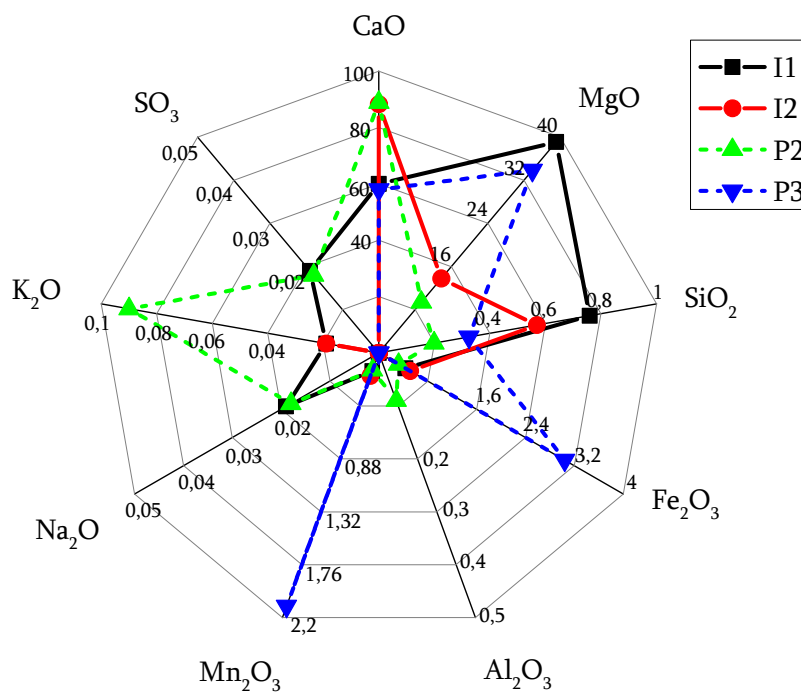


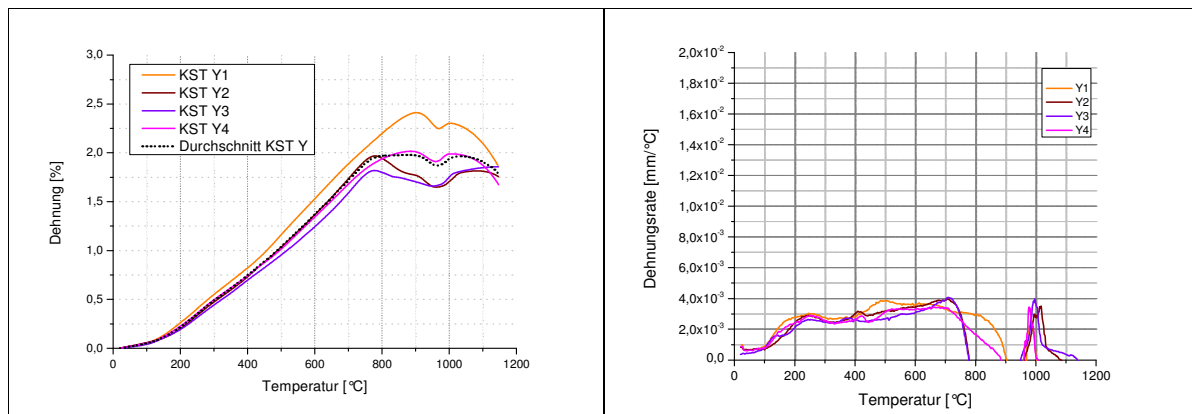
Abbildung 5.58: Radardiagramm der oxidischen Zusammensetzung der dolomitischen Kalksteine

Abgesehen vom Handstück I2 haben die dolomitischen Kalksteine die größten Ausdehnungsraten im Temperaturbereich von 700-750 °C. I2 weist im Temperaturbereich von 600-650 °C die höchste Ausdehnungsrate auf.

**Tabelle 5.25: Mittlere Dehnungsraten der Handstücke der Lagerstätten I und P**

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |      |      |       |
|--------------------|--|------|------|-------|
|                    | I1   | I2   | P2   | P3    |
| 20-200             | 0,82   | 1,01 | 0,83 | 1,38  |
| 200-450            | 1,65   | 1,85 | 1,52 | 2,01  |
| 450-600            | 2,30   | 3,22 | 2,44 | 2,25  |
| 600-650            | 2,36   | 5,85 | 2,74 | 2,57  |
| 650-700            | 3,00   | 5,30 | 2,93 | 2,92  |
| 700-750            | 3,70   | 3,61 | 3,02 | 3,33  |
| 750-800            | 2,48   | 3,03 | 2,76 | -4,75 |
| 800-850            | 1,07   | 2,35 | 2,56 | -4,75 |
| 850-900            | -0,18  | 1,14 | 1,78 | 1,62  |
| 700-900            | 1,77   | 2,53 | 2,53 | 0,04  |

Die Kalksteine der Lagerstätte Y wurden ausgewählt, da diese Proben eine große Varianz in Bezug auf die Porosität aufweisen. Die folgende Abbildung zeigt die Mittelwerte der Dehnung der verschiedenen Handstücke der Lagerstätte.



**Abbildung 5.59 und 5.60: Dehnung der Handstücke der Lagerstätte Y in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Tabelle 5.26: Mittlere Dehnungsraten der Handstücke der Lagerstätte Y**

| Temperatur<br>[°C] | Dehnungsraten<br>[(mm/m)/°C] [ $\cdot 10^{-2}$ ] |       |       |      |
|--------------------|--|-------|-------|------|
|                    | Y1   | Y2    | Y3    | Y4   |
| 20-200             | 1,47   | 1,12  | 1,08  | 1,27 |
| 200-450            | 2,87   | 2,73  | 2,52  | 2,60 |
| 450-600            | 3,69   | 3,23  | 2,80  | 3,11 |
| 600-650            | 3,64   | 3,56  | 3,25  | 3,34 |
| 650-700            | 3,51   | 3,83  | 3,68  | 3,40 |
| 700-750            | 3,15   | 3,65  | 3,72  | 3,04 |
| 750-800            | 3,03   | 0,42  | 0,44  | 2,10 |
| 800-850            | 2,72   | -2,37 | -1,02 | 1,22 |
| 850-900            | 1,52   | -1,09 | -0,89 | 0,22 |
| 700-900            | 2,61   | 0,17  | 0,05  | 1,66 |

## 5.7 Prüfung von Korrelationen und Abhängigkeiten

### Abhängigkeit der Dehnung von der chemischen Zusammensetzung

Die chemischen Analyseergebnisse der neu bepropten Kalksteine wurden mit den ermittelten Ausdehnungen der verschiedenen Temperaturbereiche korreliert.

Die nachfolgende Graphik zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der maximalen Ausdehnung der Handstücke und dem Siliciumoxidgehalt. Der Korrelationskoeffizient der linearen Regression beträgt 0,57 und lässt nicht auf einen Zusammenhang zwischen dem Oxidgehalt und der Ausdehnung schließen. Auch für die weiteren Oxide (MgO, CaO, CaO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>) konnten keine Korrelationen zwischen Oxidgehalt und thermischer Ausdehnung am Maximum und in ausgewählten Temperaturbereichen (siehe z.B. Tab. 6.24) ermittelt werden.

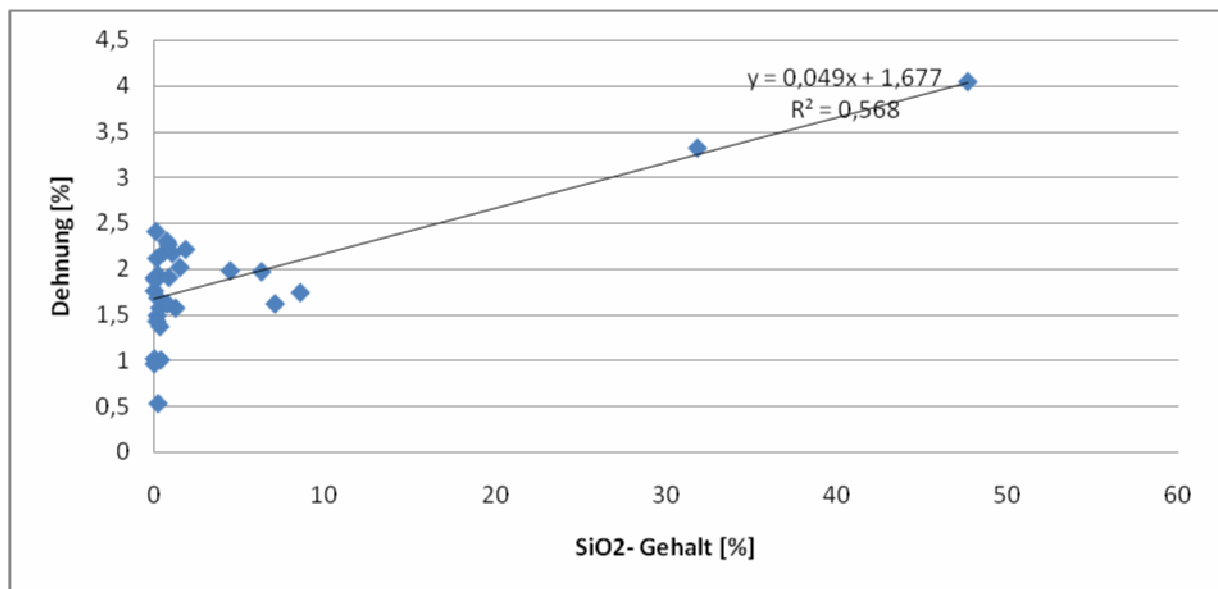


Abbildung 5.61: Abhängigkeit der Dehnung vom SiO<sub>2</sub>-Gehalt

Ein Zusammenhang des Kalkstandards, des Tonerdemoduls, des Silikatmoduls und des hydraulischen Moduls mit der mittleren Dehnung wurde nicht festgestellt. Die Korrelationskoeffizienten erreichen nicht das nötige erforderliche Bestimmtheitsmaß, um eine Aussage hinsichtlich des Zusammenhangs der Chemie und der Ausdehnung treffen zu können. Zudem müsste die Probenzahl gezielt ausgewählter Proben erhöht werden, um einen möglichst großen Bereich verschiedenen oxidischer Gehalte (siehe Abb.5.61 SiO<sub>2</sub>-Gehalt), bzw. Standards oder Module abzudecken.

Die Korrelation der mittleren Ausdehnung der gesamten Handstücke mit dem Siliciumgehalt im Temperaturbereich der Phasenumwandlung des Quarzes (600-650 °C) führte zu keinem Ergebnis. Die Dehnung durch die Umwandlung von Tief- in Hochquarz ist nicht nur vom Quarzgehalt,

sondern auch von der Korngröße des Quarzes abhängig [Telle, 2007]. Eine Korrelation nur durch Betrachtung der chemischen Analyseergebnisse führt aufgrund der sehr verschiedenen Gefüge und einer zu geringen Probenanzahl zu keinem erkennbaren Zusammenhang.

### **Abhängigkeit der Dehnung von den Mineralphasen**

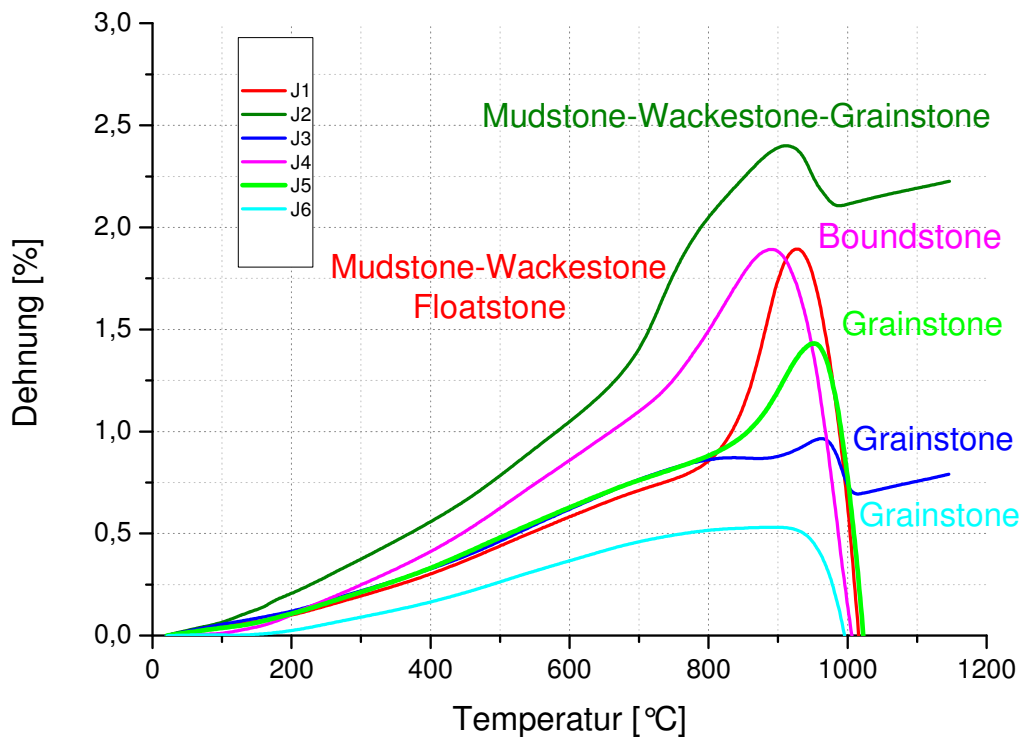
Zwischen den Mineralphasenbeständen und den Dilatometerkurven der gesamten Handstücke konnte aufgrund der Vielfalt der Mineralbestandteile und des Zusammenwirkens verschiedener Parameter (Porosität, Gefüge und der Auswirkung der verschiedenen Mineralphasen und der oxidischen Verbindungen untereinander) auf das Ausdehnungsverhalten keine Korrelation gefunden werden. Die Korrelation der Mineralphasenbestände mit der Dehnung bei maximaler Temperatur und verschiedenen Temperaturbereichen der untersuchten Kalksteine ergab keinen Zusammenhang. Um Abhängigkeiten zwischen der Ausdehnung und den Mineralphasenbeständen feststellen zu können, ist außer der Voraussetzung einer vergleichbaren Textur, Matrix, oxidischen Zusammensetzung der Kalksteine, eine Quantifizierung der Mineralphasen notwendig. Der Einfluss der Minerale untereinander ist hierbei zu berücksichtigen.

An einzelnen Proben lassen sich Zusammenhänge erkennen, wie z.B. am Handstück B5. Aufgrund des hohen Quarzanteils in der Probe ist die Phasenumwandlung von Tief- nach Hoch- Quarz, sowohl in dem Dilatogramm (Abb. 5.29 und 5.30) im Bereich von 570° - 625°C als auch in dem DSC-Diagramm (Abb. 5.20) im Bereich von 500° - 600° C zu erkennen.

Die starke Volumenzunahme im Temperaturbereich von 1000 – 1100° C (siehe Abb. 5.23) der Probe B5 ist auf die Bildung von Spinell auf Kosten von Hämatit, Chlorit und Muskovit zurückzuführen (siehe Kap.5.5).

### **Abhängigkeit der Dehnung von den petrographischen Daten**

Die folgenden Abbildungen der Dilatometermessungen der Handstücke der Lagerstätte J zeigen die Dehnungen und die dazugehörigen Faziestypen.



**Abbildung 5.62: Vergleich der Faziestypen mit der Dehnung der Handstücke der Lagerstätte J**

Die Faziestypen der Lagerstätte J mit mikritischer Matrix (Mudstone, Wackestone, Floatstone) weisen gegenüber den nichtmikritischen Faziestypen (Grainstone) eine höhere maximale Dehnung von 2,4 % (J2) und 1,9 % (J1) auf. J2 enthält Faziestypen mit und ohne mikritischer Matrix und wird hier als Faziestyp mit mikritischer Matrix gewertet. Bei einer Temperatur von 600 °C liegt die Dehnung der Faziestypen Grainstone zwischen 0,38 – 0,6 %. Die Faziestypen mit mikritischer Matrix zeigen Dehnungen von 1,1 (J2) bzw. 0,6 % (J1). Der Boundstone besitzt eine vergleichsweise hohe Festigkeit, hat unterschiedliche Gehalte an Mikrit, Komponenten und Zement und weist eine maximale Dehnung von 1,9 % und 0,9 % bei 600 °C auf. Anscheinend sind Faziestypen mit hoher Raumauffüllung mit einer höheren thermischen Ausdehnung verbunden als locker gepackte Strukturen. Der Kalkstandard der Handstücke J4 und J6 ist geringer als der Kalkstandard der Handstücke J1, J2, J3 und J5.

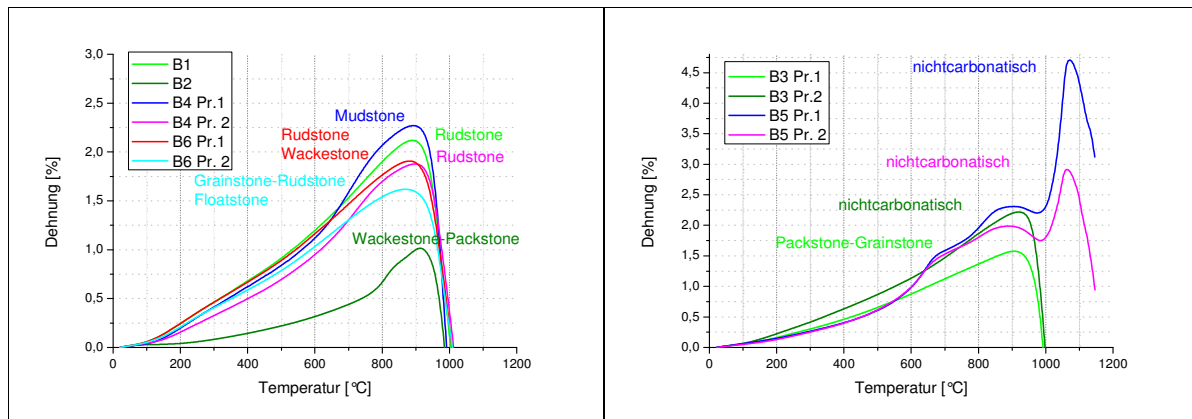
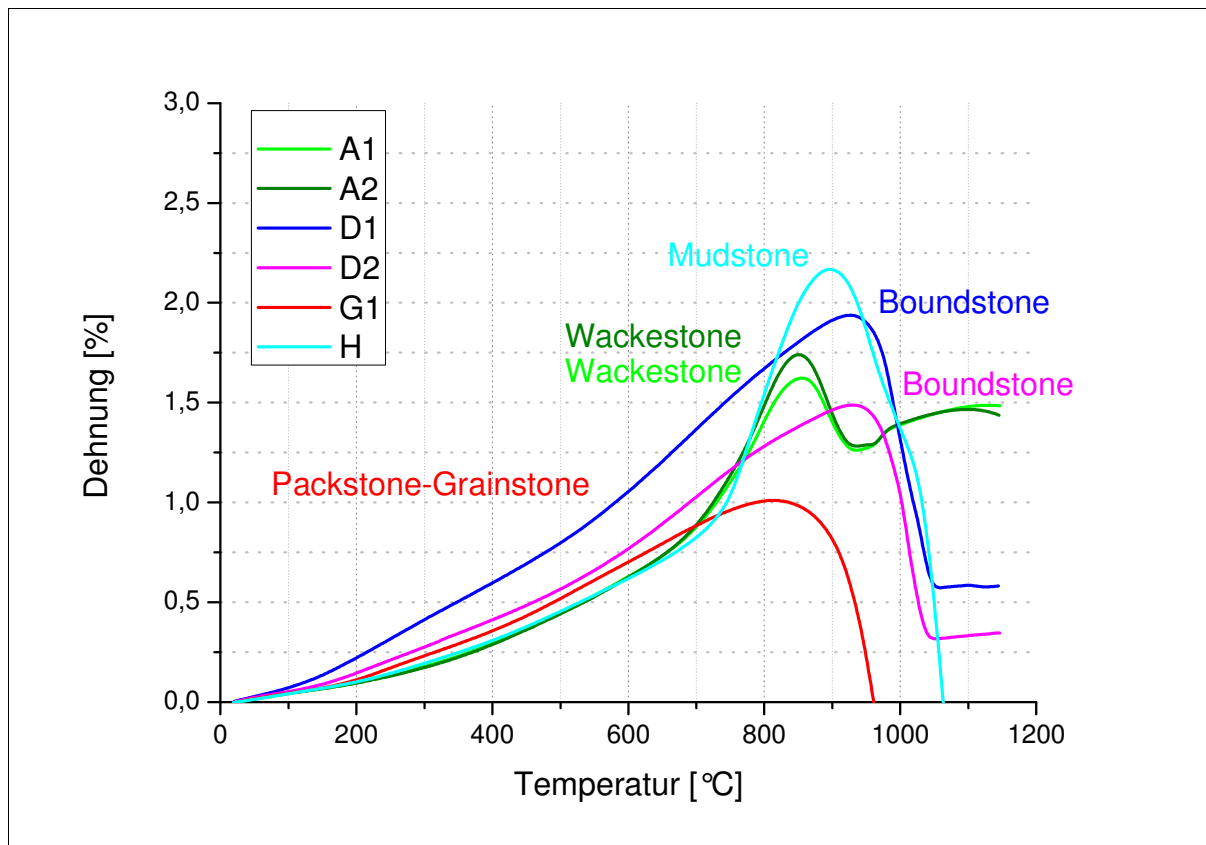


Abbildung 5.63 und 5.64: **Vergleich der Faziestypen und der Dehnung der Kalksteine der Lagerstätte B**

Bei dem Vergleich der Faziestypen der Lagerstätte B ist zu beachten, dass aufgrund des hohen Anteils an Nebenbestandteilen im Vergleich zur Lagerstätte J, mit geringem Gehalt an Nebenbestandteilen, ein zusätzlicher Einfluss auf das Dehnungsverhalten gegeben ist. Hier weist der Mudstone die höchste maximale Dehnung auf. Die nichtmikritischen, komponentengestützten Rudstones dehnen sich maximal von 1,7 (B4Pr.1) – 2,2 % (B1) aus. Die Handstücke B6 Pr.1 und B6 Pr.2, die verschiedenen Faziestypen mit nichtmikritischer und mikritischer Matrix aufweisen, dehnen sich maximal um 0,9 bzw. 0,6 % mehr aus, als das Handstück B2 mit dem Faziestyp Wackestone-Packstone mit mikritischer Matrix. Abgesehen von den Probenstäbchen des Handstückes B6 und der Probe B2 deutet sich auch hier an, dass Faziestypen mit mikritischer Matrix (z.B. Mudstone) eine größere maximale Dehnung erreichen, als Faziestypen ohne mikritische Matrix (Grainstone, Rudstone). Anscheinend dehnt das mit der beginnenden Entsäuerung entweichende CO<sub>2</sub> die mikritische Struktur stärker, als eine ohne Mikrit komponentengestützte Struktur. Von dieser Aussage abweichend verhält sich die Dehnung des Handstückes B4 Probe 2. Dies kann an der Vielzahl der beeinflussenden Faktoren liegen, sowie auch daran, dass die Probenstäbchen selbst nicht untersucht werden kann.

Im Bereich von 600 °C liegen, außer bei dem Handstück B2 mit 0,25 %, die Dehnungen der Faziestypen im Bereich von 0,8 – 1,2 %.



**Abbildung 5.65: Vergleich der Faziestypen mit der Dehnung der Handstücke der Lagerstätte A,D,G und H**

Abb. 5.65 stellt die verschiedenen Faziestypen der Handstücke A, D, G und H in Zusammenhang mit der Ausdehnung dar. Auch hier lässt sich feststellen, dass die mikritischen, matrixgestützten Gefüge (Mudstone, Wackestone) größere maximale Dehnungen aufweisen, als komponentengestützte Gefüge mit und ohne Mikrit (Packstone, Wackestone). Im Bereich von 600 °C weisen die Faziestypen außer dem Boundstone Dehnungen von 0,6 – 0,7 % auf. Eine größere Dehnung in diesem Bereich hat der Boundstone.

Der Vergleich der Faziestypen der Lagerstätte Y mit der maximalen Dehnung und der Dehnung bei 600 °C spiegelt die vorherigen Ergebnisse nicht wieder. Die maximalen Dehnungen des Mudstone, Grainstone und Grainstone-Floatstone liegen im selben Bereich. Das hier nicht dieselben Zusammenhänge wie bei den anderen Lagerstätten gefunden werden, kann an den hier vergleichsmäßig vielen offenen und geschlossenen Poren und dem hohen Gehalt an Nebenbestandteilen liegen.

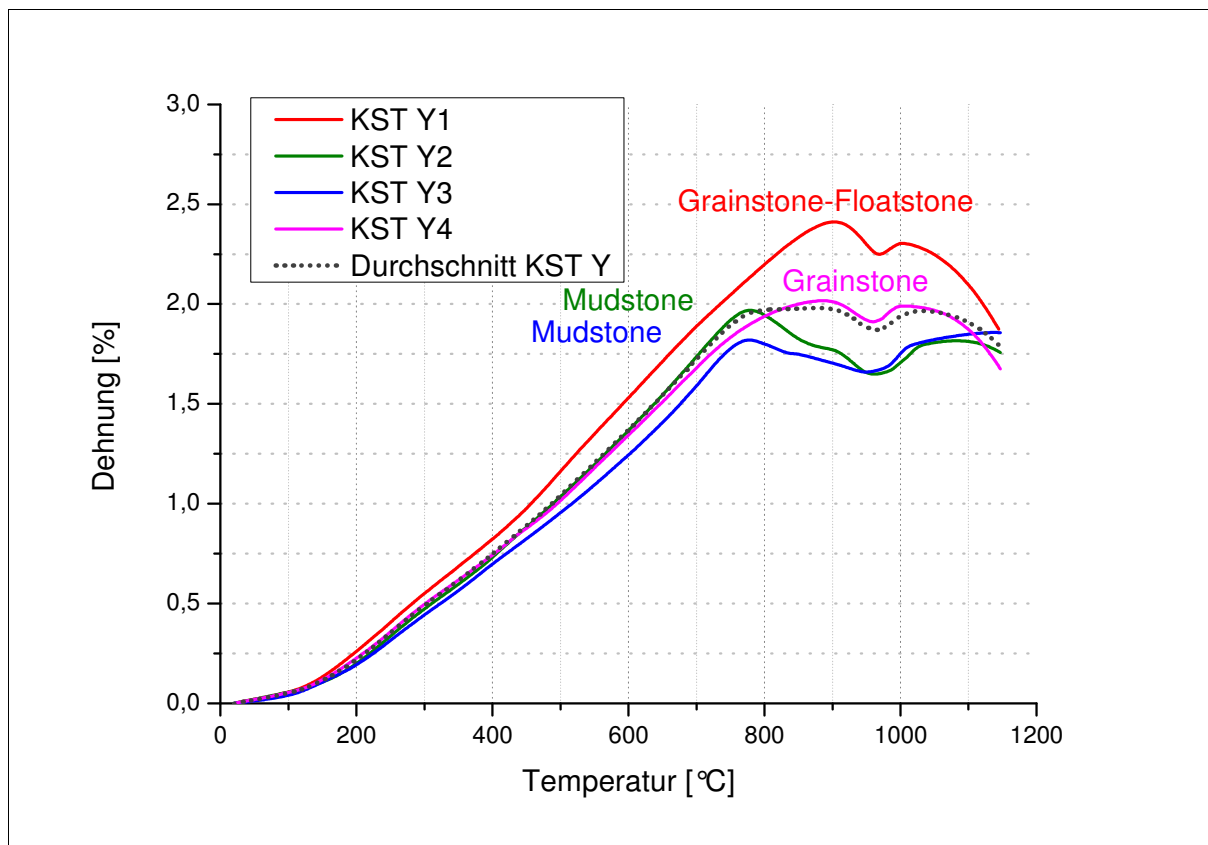


Abbildung 5.66: Vergleich der Faziestypen mit der Dehnung der Handstücke der Lagerstätte Y

Die Richtungsabhängigkeit der Dehnung der verschiedenen Handstücke wird einerseits verursacht durch die Inhomogenität des Probenstäbchens selbst (mehrere Faziestypen innerhalb der Probenstäbchen eines Handstückes, siehe Handstücke der Lagerstätte D), andererseits durch den Faziestyp (ein Faziestyp mit Schichtung, siehe Handstück J4).

Die größte Richtungsabhängigkeit der Probenstäbchen zeigen die Handstücke J4, J2 und die Proben der Lagerstätte D. Diese Handstücke wurden als Faziestyp Boundstone eingeordnet.

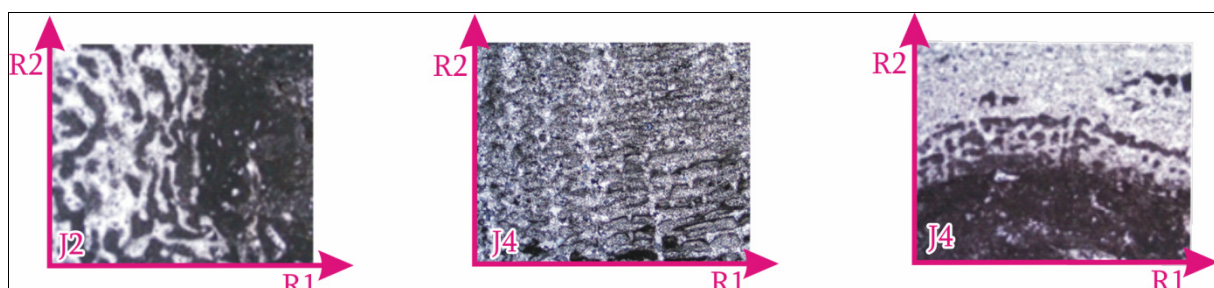


Abbildung 5.67: Anisotropie der Handstücke J2 und J4

Das erste Bild zeigt rekristallisierte Stromatoporen auf dem Faziestyp Wackestone. Die Schichtung verläuft parallel R2. Senkrecht zu den Stromatoporen ist die Ausdehnung größer. In den

Abbildungen zwei und drei liegen die Stromatoporen parallel R1. Die Dilatometerkurve des Handstückes J4 hat senkrecht zur Richtung der Stromatoporen (in Richtung R2) die größte Dehnung.

### Abhängigkeit der Dehnung von der Dichte und von der Porosität

Die Korrelation zwischen der Dehnung bzw. den Dehnungskoeffizienten sämtlicher aufgeführter Temperaturbereiche und der Dichte führt zu keinem Zusammenhang.

Die folgende Graphik zeigt die Abhängigkeit der Dehnung von der Porosität innerhalb der Lagerstätte J. Je größer die Porosität des Handstückes, desto kleiner ist die Dehnung. Um eine Art der Abhängigkeit und die Abhängigkeit selbst mit einem größeren Bestimmtheitsmaß angeben zu können, ist eine erhöhte Probenanzahl erforderlich.

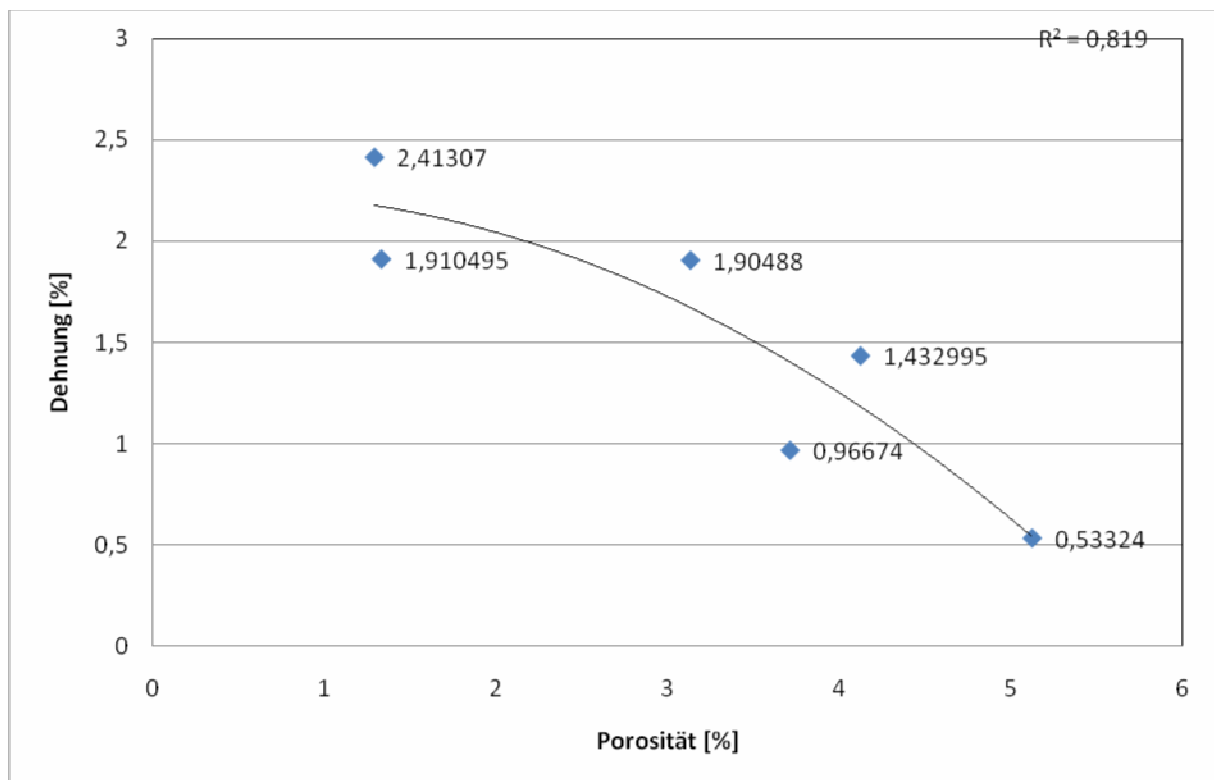


Abbildung 5.68: Abhängigkeit der Dehnung von der Porosität der Handstücke der Lagerstätte J

Diese Abhängigkeit zeigt sich auch bei den Handstücken der Lagerstätte B, die sich im Chemismus deutlich unterscheiden und viele Nebenbestandteile aufweisen.

## 5.8 Klassifizierung und Bildung von Gruppen

Eine Klassifizierung und Bildung von Gruppen anhand von chemischen, physikalischen und mineralogischen Ergebnissen und damit eine Modellbildung ist aufgrund der Vielzahl von Parametern, die einen Einfluss auf die Dehnung haben, nicht möglich. Eine Tendenz aufgrund der petrographischen Untersuchungen bezüglich der maximalen Dehnung ist zu erkennen (siehe Abb.

5.62- Abb. 5.65), sollte aber anhand weiterer Messungen bestätigt werden. Die Probenzahl sollte erhöht und ausgewählte Kalksteine untersucht werden. Die zu untersuchenden Kalksteine sollten sich nicht gleichzeitig chemisch, physikalisch und petrographisch unterscheiden.

## **6 Praxisanbindung/Auswertung von Erfahrungsberichten**

Die Kalkwerke sollten aus verschiedenen Bereichen der Lagerstätte Kalksteine entnehmen und dilatometrisch messen lassen, da bisher keine allgemeingültigen Aussagen in dem Temperaturbereich der Vorwärmzone und Entsäuerungszone über die Ausdehnung verschiedener Kalksteine getroffen werden können.

Aufgrund der Ergebnisse der Dilatometermessungen sollte die Zugabe und Auswahl der Kalksteine dementsprechend geregelt werden, dass z.B. Kalksteine aus unterschiedlichen Sohlen derart vermischt werden, dass die Ofenaufgabe vergleichbar ist. Um eine gleichmäßige Schüttgutbewegung zu erreichen, sollte die Auslegung des Ofens, bzw. die Ausmauerung in Zusammenhang mit den Ergebnissen der Dilatometermessungen über den gesamten Temperaturbereich gestaltet werden.

Zudem liefern die absolut zu beobachtenden Dehnungswerte Hinweise für die Ausführung der Feuerfestausmauerung bis zur Brennzone, indem eine Konizität vorgesehen werden kann, welche die zu erwartende thermische und gefügebedingte Ausdehnung kompensiert. Erfahrungsgemäß ist eine konische Ausmauerung nicht in allen Fällen erforderlich, sondern nur in solchen, in denen eine Kalksteinschüttung schon vor Erreichen der Brennzone zum Anbacken untereinander neigt. Die Ursachen für dieses Verhalten wurden bisher noch nicht erforscht.

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Das Forschungsvorhaben zielte darauf ab, den Einfluss unterschiedlicher Kalksteine bzw. unterschiedlicher Kalksteinparameter auf die thermische Ausdehnung und damit auf das Bewegungsverhalten im Schachtofen näher zu betrachten. Hierzu wurden 21 Kalksteine verschiedener Vorkommen beprobt. Die Kalksteine sollten in Hinblick auf Parameter, die das Dehnungsverhalten beeinflussen, untersucht, und anschließend die Parameter mit dem Ausdehnungsverhalten des Kalksteines korreliert werden.

Die Kalksteine wurden chemisch, physikalisch und petrographisch untersucht. Mit einem klassischen Dilatometer wurden die Dehnungsmessungen durchgeführt. Die Entwicklung einer Alternativmethode mittels Laserdilatometrie war aufgrund unvorhergesehener apparativer Hemmnisse und eines absehbaren, unverhältnismäßig hohen Zeitaufwandes nicht durchführbar. Laserdilatometer sind für andere Einsatzfälle am Markt erhältlich, waren aber im Rahmen dieses Projektes aufgrund der hohen Anpassungskosten nicht zu beschaffen. Die Vorversuche zeigten, dass eine Ortsnähe der Proben für die Untersuchungen zum Probenstäbchen erforderlich ist, aufgrund der Inhomogenität der Proben und des anscheinend erheblichen Einflusses des Gefüges auf das Dehnungsverhalten. Bei entsprechender Sorgfalt konnten aber auch mit der traditionellen Dilatometrie zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Es zeigte sich, dass die Vielfalt an Parametern, wie chemische Zusammensetzung, Mineralphasenbestand, sowie andere Gefügemerkmale, die Untersuchung der chemischen, physikalischen und petrographischen Einflüsse auf das Dehnungsverhalten erschweren.

Zwischen der oxidischen Zusammensetzung und der Dehnung über sämtliche Temperaturbereiche konnte in Bezug auf die Größe der Dehnung- bzw. Dehnungsraten keine Korrelation gefunden werden. Mittels der Dilatometrie zeigte sich nur der Einfluss des Magnesiumgehaltes auf die Lage der Maxima. Aufgrund des zeitlich früheren Ablaufs der Entsäuerung bei dolomitischen Gesteinen (zeigt sich auch bei G2) sind die Dehnungs-Maxima dieser Kalksteine zu tieferen Temperaturen verschoben.

Ein signifikanter Einfluss bestimmter Minerale auf die Dehnung konnte in diesem Rahmen nicht nachgewiesen werden, da die Gehalte an den Mineralenphasen zu gering und die Anzahl der Mineralphasen zu groß ist. Lediglich der Einfluss von Quarz auf das Dehnungsverhalten konnte anhand der Handstücke aus der Lagerstätte B deutlich gemacht werden.

Bei Betrachtung der physikalischen Parameter liefert die Porosität der Kalksteine innerhalb der Lagerstätte J systematische Hinweise. Je größer die Porosität ist, umso geringer wäre demnach die maximale Dehnung. Dies konnte aber in den Lagerstätten Y und B aufgrund der Vielfalt an Nebenbestandteilen, Mineralphasen und bei Lagerstätte Y zusätzlich aufgrund einer hohen Zahl geschlossener Poren nicht durchgängig verallgemeinert werden.

Die Betrachtung der Dünnschliffe nach Dunham deutet Zusammenhänge im Bereich der maximalen Dehnung an. Faziestypen nach Dunham mit mikritischer Matrix zeigen eine größere maximale Dehnung als Faziestypen mit nichtmikritischer Matrix. Eine Ausweitung auf verschiedene Kalksteine ist ohne zusätzliche Versuche aber nicht ohne weiteres möglich, da z.B. die Kalksteine Y abweichendes Verhalten zeigen.

Die Dilatometermessungen ergaben, dass das Gefüge einen entscheidenden Einfluss auf die Dehnung hat. Die größte Richtungsabhängigkeit der Probenstäbchen eines Handstückes zeigen die Handstücke J4, J2 und D. Anhand des Faziestyps Boundstone des Handstückes J4 zeigte sich, dass es in senkrechter Richtung zu geschichteten Stromatoporen eine größere Dehnung gibt, als parallel zu den Stromatoporen. Ein deutlich anisotropes Gefüge bewirkt also auch deutlich anisotrope Dehnung, mit ggf. Maximalwerten senkrecht zur Schichtungsebene.

Aufgrund der Inhomogenität vieler Proben und der Menge der relevanten Parameter kann noch keine allgemeingültige Aussage getroffen, und damit kein lagerstättenunabhängiges Modell entwickelt werden.

Die Kalkwerke sollten aus verschiedenen Sohlen Handstücke dilatometrisch messen lassen, und aufgrund der Ergebnisse die Ofenaufgabe vergleichbar machen und die Auslegung des Ofens, bzw. die Ausmauerung in Zusammenhang mit den Ergebnissen von Dilatometermessungen gestalten lassen, um eine gleichmäßige Schüttgutbewegung zu erreichen.

Außerdem liefern die absolut zu beobachtenden Dehnungswerte Anhaltspunkte für die Ausführung der Feuerfestausmauerung bis zur Brennzone, indem eine Konizität vorgesehen werden kann, die die zu erwartende thermische und gefügebedingte Ausdehnung kompensiert. Erfahrungsgemäß ist eine konische Ausmauerung aber nicht in allen Fällen erforderlich, sondern nur in solchen, in denen die Kalksteinschüttung schon vor Erreichen der Brennzone zum Anbacken untereinander neigt. Die Ursachen für letzteres Verhalten sind bisher nicht erforscht und waren auch nicht Bestandteil der Aufgabenstellung dieses Vorhabens.

Im Rahmen dieser Arbeit war es apparatetechnisch nicht möglich, die Dehnung unter verschiedenen praxisnahen Gaszusammensetzungen, wie oxidierender bzw. reduzierender Atmosphäre zu messen. Der Einfluss der Verbrennungsatmosphäre auf die Dehnung sollte zusätzlich untersucht werden.

Bei der Betrachtung der Probleme der sog. "Bärenbildung" sollte mit einbezogen werden, das im Ofen aufgrund von exothermen Reaktionen wie z. B. der Umwandlung von Pyrit über Magnetkies zu Hämatit [Schlüter, 2008] örtliche Temperaturspitzen auftreten können, die eventuell zu Spinell- oder Mullitbildung (siehe Untersuchungen Handstück B5) und damit zu starker Dehnung führen. Örtliche Temperaturspitzen könnten auch zum Aufschmelzen mit Aschepartikeln führen, welche im weiteren Ofengang wieder erstarren und dadurch die Steine verkleben.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das gesetzte Ziel der Ermittlung der Kalksteinparameter, die das Ausdehnungsverhalten beeinflussen, erreicht. Die Einflussfaktoren konnten aufgrund der Komplexität nicht quantitativ ermittelt und daher kein lagerstättenunabhängiges Modell entwickelt werden. Mit herausgearbeiteten Abhängigkeiten wurden lagerstätteninterne Aussagen getroffen. Die Ofenbauer ebenso wie die Betreiber von Kalköfen erhalten mit der neu entwickelten Methodik erstmals die Möglichkeit, das spezifische Ausdehnungsverhalten ihrer jeweiligen Kalkstein-Varietäten quantitativ zu bestimmen. Die vorgelegten Untersuchungsergebnisse bilden den dazu notwendigen Bewertungshintergrund.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde teilweise erreicht.

## 8 Literaturverzeichnis

- [BOYNTON, 1980] Boynton; Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 578 S  
John Wiley & Sons, 1980
- [BRUCE, 1997] Bruce W.D. Yardley; Einführung in die Petrologie metamorpher  
Gesteine; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart (1997), S. 66
- [D'ANS, 1998] D'ans J., Lax, E.; Taschenbuch für Chemiker und Physiker.- 3 Bände,  
Springer Verlag, 1998
- [DÜCKER, 2004] Dücker, Frank; Konzeption und Realisierung eines eingebetteten  
Systems zur Handdetektion mittels optischer Sensoren in einem  
sicherheitsbezogenen Umfeld; Diplomarbeit Fachhochschule Bonn-  
Rhein- Sieg, Fachbereich Informatik; 2004
- [DUNHAM, 1962] Dunham, R.J. ; Classification of carbonate rocks according to  
depositional texture; Amer. Ass. Petrol. Geol. Memoir **1**: 108-121,  
Tulsa 1962
- [EMBRY, 1972] Embry, A.F., Klovan, E.J.: Absolute water depth limits of late  
Devonian paleoecological zones; Geol. Rdsch., **61**: 672-686, Stuttgart  
1972
- [FORKEL, 1955] Forkel, Werner; Qualitative und quantitative Untersuchungen an  
Dilatometerkurven von Tonen, Heidelberger Beiträge zur Mineralogie  
und Petrographie, Bd.5, S.1-22, 1955
- [HOGEWONING, 2008] Hogewoning, S; Zur Relation von Kalksteineigenschaften und  
Branntkalkreaktivität, Dissertation Clausthal 2008
- [GOTTHARDT, 1996] Gotthardt R. & Kasig, W.; Karbonatgesteine in Deutschland  
Rohstoff, Nutzung, Umwelt: 420 S., Düsseldorf, Beton-Verlag  
1996
- [HOGEWONING, 2005] S, Marbun, B., Wolter, A.; Forschungsbericht Nr.1/05, Vorhersage und  
Beeinflussung der Reaktivität von Branntkalk, 2005
- [JASMUND, 1993] K. Jasmund / G. Lagaly (Hrsg.); „Tonminerale und Tone - Struktur,  
Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt“.  
Steinkopff Verlag Darmstadt; 1993
- [LEHMANN, 1957] Lehmann,H., Gatzke, H.; Entwicklung einer Methode zur Bestimmung  
von Kenngrößen für das Brennen von Rohstoffen und Massen der  
Steine- und Erden- Industrie, TIZ Zbl. (81), H. 17/18, S.291-302

- [LEHMANN, 1958] Lehmann, H., Wuhrer, J., Lahl, W.; Das Brennverhalten von Kalksteinen aus verschiedenen geologischen Formationen, TIZ Zbl. (82), H. 20, S. 434-440
- [LINSEIS] [www.linseis.de](http://www.linseis.de); 30.01.2011
- [LUO, 2011] Luo, Yun-jun, Qin, Ben-dong, Liu, Yang; Research on expanding properties of limestone under high temperature, Advanced Materials Research, Vol. S.250-253, 2011, pp 1547-1551
- [MARKGRAF, 1985] Markgraf, S.A., Reeder, R.J.; High-temperature structure refinements of calcite and magnesite, American Mineralogist (70), S.590-600
- [MICRO-EPSILON] <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--optoCONTROL--de.pdf> ; 30.01.2012]
- [MURRAY, 1954] Murray, J.A., Fischer, H.C., Rolnick, L.S.; Shrinkage of high-calcium limestone during burning, Journal of The American Ceramic Society (37), No.7, S. 323-328
- [MURRAY, 1957] Murray A. James I.; Shrinkage, activity as functions of lime burning conditions, Pit and Quarry, 49 (11), 122-27, 152 (1957)
- [POHL, 1956] Pohl; Einige physikalische und chemische Untersuchungen über das Brennen und Löschen von Kalk; Zement -Kalk-Gips International (9), S. 275-284, 1956
- [SCHIELE, 1972] Schiele E., Berens, L.W.; Kalk-Herstellung-Eigenschaften-Verwendung: 601 S., Verlag Stahleisen 1972
- [SCHLÜTER, 2008] Schlüter, Annette; Untersuchungen zum Verschmutzungsverhalten rheinischer Braunkohlen in Kohledampferzeugern, Dissertation 2008
- [STARCK, 2005] Stark, J., Wicht, B.; Zement und Kalk, 376 S., Birkhäuser Verlag 2005
- [TUCKER, 1981] Tucker; Sedimentary Petrology: An introduction M.E. Tucker, geoscience texts volume 3, 1981
- [TELLE, 2007] Telle, Rainer; Salmang, Scholze Keramik, Springer 2007
- [WIEDEN, 1962] Wieden P., Weininger, M.; Untersuchungen von Kalksteinen in Hinblick auf ihr Brennverhalten, Zement- Kalk- Gips (8), S. 377-385,
- [WOLTER, 2008] Wolter A.; Vorlesung: Technologie der Bindemittel.-nicht veröffentlicht
- [WALTER, 1995] Walter R.; Geologie von Mitteleuropa: 566 S., Stuttgart (Schweizerbart), 1995

[ZILCH, 2002]

Zilch, K.; Diederichs, C.J. ; Katzenbach, R.; Handbuch für Bauingenieure, Springer-Verlag 2002

## 9 Anhang

### 9.1 Chemische Zusammensetzung der Kalksteinproben

*Tabelle 9.1: Chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte B*

|                                | B1    | B2    | B3<br>Pr.1 | B3<br>Pr.2 | B4<br>PR.1 | B4<br>Pr.2 | B5<br>Pr.1 | B5<br>Pr.2 | B6    |
|--------------------------------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| Glühverlust                    | 43,53 | 43,74 | 38,9       | 41,5       | 43,47      | 43,88      | 12,8       | 24,34      | 43,9  |
| CO <sub>2</sub>                | 43,87 | 43,65 | 38,6       | 40,9       | 43,23      | 43,65      | 9,84       | 21,63      | 43,9  |
| CaO                            | 55,3  | 55,1  | 47,8       | 51,6       | 54,4       | 54,1       | 11,9       | 26,7       | 55,2  |
| MgO                            | 0,36  | 0,45  | 0,61       | 0,46       | 0,49       | 0,49       | 3,01       | 2,63       | 0,28  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,08  | <0,01 | 0,76       | 1,07       | 0,46       | 0,04       | 41,6       | 24,1       | <0,01 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,17  | 0,09  | 10,7       | 3,92       | 0,31       | 0,09       | 7,15       | 5,41       | 0,09  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,04  | 0,03  | 0,53       | 0,70       | 0,24       | 0,04       | 17,2       | 11,5       | 0,01  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,02  | <0,01 | 0,01       | 0,02       | 0,01       | 0,01       | 0,3        | 0,11       | 0,02  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,05  | 0,01  | 0,03       | 0,08       | 0,08       | 0,03       | 4,83       | 3,15       | 0,05  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02  | 0,05  | 0,31       | 0,20       | 0,02       | 0,01       | 0,05       | 0,10       | 0,02  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,01  | <0,01 | 0,05       | 0,03       | 0,05       | 0,03       | 0,12       | 0,12       | 0,01  |
| BaO                            | <0,01 | <0,01 | <0,01      | <0,01      | <0,01      | <0,01      | 0,23       | 0,22       | <0,01 |
| SrO                            | 0,02  | 0,02  | 0,02       | 0,01       | 0,02       | 0,02       | 0,01       | 0,02       | 0,02  |

*Tabelle 9.2: Chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätten A, D, G und H*

|                                | A1   | A2   | D1    | D2    | G1    | G2    | H    |
|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Glühverlust                    | 41,2 | 41,0 | 43,68 | 43,68 | 43,83 | 45,25 | 43,3 |
| CO <sub>2</sub>                | 40,6 | 40,2 | 43,87 | 43,78 | 43,79 | 45,09 | 43,4 |
| CaO                            | 51,4 | 50,6 | 55,5  | 55,3  | 55,4  | 42,4  | 55,0 |
| MgO                            | 0,44 | 0,45 | 0,38  | 0,38  | 0,18  | 10,9  | 0,40 |
| SiO <sub>2</sub>               | 4,16 | 5,05 | 0,12  | 0,09  | 0,21  | 0,17  | 0,60 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,63 | 0,75 | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,98  | 0,10 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,39 | 1,57 | <0,01 | <0,01 | 0,02  | 0,05  | 0,16 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,04 | 0,04 | 0,02  | <0,01 | 0,01  | 0,05  | 0,01 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,27 | 0,31 | 0,06  | <0,01 | 0,04  | 0,06  | 0,04 |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,15 | 0,19 | 0,01  | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,01 |

|                 |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SO <sub>3</sub> | 0,06  | 0,05  | 0,01  | <0,01 | <0,01 | 0,12  | 0,05  |
| BaO             | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| SrO             | 0,12  | 0,12  | 0,02  | 0,02  | <0,01 | 0,01  | 0,02  |

Tabelle 9.3: Chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte J

|                                | J1    | J2    | J3    | J4    | J5    | J6    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Glühverlust                    | 43,92 | 43,85 | 43,88 | 43,64 | 43,85 | 43,74 |
| CO <sub>2</sub>                | 43,91 | 43,81 | 43,70 | 43,54 | 44    | 43,53 |
| CaO                            | 55,6  | 55,5  | 55,8  | 54,9  | 55,5  | 55,4  |
| MgO                            | 0,13  | 0,23  | 0,11  | 0,26  | 0,11  | 0,11  |
| SiO <sub>2</sub>               | <0,01 | 0,05  | <0,01 | 0,48  | 0,08  | 0,12  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,07  | 0,05  | 0,08  | 0,16  | 0,04  | 0,42  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <0,01 | 0,01  | <0,01 | 0,02  | <0,01 | 0,01  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,01  | 0,01  | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 0,01  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,01  | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02  | <0,01 | 0,01  |
| SO <sub>3</sub>                | <0,01 | 0,01  | <0,01 | 0,03  | <0,01 | 0,01  |
| BaO                            | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| SrO                            | <0,01 | 0,01  | <0,01 | 0,02  | 0,01  | 0,01  |

Tabelle 9.4: Chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte I, P und Y

|                                | I1    | I2    | P2    | P2    | Y1    | Y2    | Y3    | Y4    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Glühverlust                    | 47,3  | 44,9  | 44,42 | 46,11 | 43,9  | 43,3  | 41,48 | 41,78 |
| CO <sub>2</sub>                | 47,3  | 45,2  | 44,52 | 46,12 | 43,6  | 43,4  | 40,96 | 41,43 |
| CaO                            | 31,6  | 46,5  | 49,4  | 32,2  | 54,2  | 53,9  | 51,0  | 52,1  |
| MgO                            | 20,6  | 7,26  | 5,21  | 18,8  | 0,56  | 0,46  | 0,63  | 0,62  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,40  | 0,30  | 0,11  | 0,18  | 0,41  | 0,85  | 3,68  | 2,59  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,23  | 0,27  | 0,18  | 1,69  | 0,25  | 0,25  | 0,40  | 0,43  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <0,01 | <0,01 | 0,05  | <0,01 | 0,15  | 0,33  | 1,20  | 0,94  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,01  | <0,01 | 0,01  | <0,01 | 0,05  | 0,06  | 0,05  | 0,06  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,01  | 0,01  | 0,05  | <0,01 | 0,09  | 0,13  | 0,32  | 0,29  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,08  | 0,10  | 0,08  | 1,17  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,01  | <0,01 | 0,01  | <0,01 | 0,04  | 0,18  | 0,23  | 0,36  |
| BaO                            | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 0,04  | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| SrO                            | <0,01 | 0,01  | 0,02  | <0,01 | 0,15  | 0,09  | 0,12  | 0,13  |

## Glühverlustfreie Zusammensetzung

**Tabelle 9.5: Glühverlustfreie chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte B**

|                                | B1    | B2    | B3<br>(Pr.1) | B3<br>(Pr.2) | B4<br>PR.1 | B4<br>Pr.2 | B5<br>(Pr.1) | B5<br>Pr.2 | B6   |
|--------------------------------|-------|-------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------|
| CaO                            | 97,93 | 97,94 | 78,23        | 88,21        | 96,23      | 96,4       | 13,65        | 35,29      | 98,4 |
| MgO                            | 0,64  | 0,8   | 1,0          | 0,79         | 0,87       | 0,87       | 3,45         | 3,48       | 0,5  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,14  | 0     | 1,24         | 1,83         | 0,81       | 0,07       | 47,71        | 31,85      | 0    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3   | 0,16  | 17,51        | 6,7          | 0,55       | 0,16       | 8,2          | 7,15       | 0,16 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,78  | 0,05  | 0,87         | 1,2          | 0,43       | 0,07       | 19,73        | 15,2       | 0,02 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,07  | 0     | 0,02         | 0,03         | 0,02       | 0,02       | 0,34         | 0,15       | 0,04 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,55  | 0,02  | 0,05         | 0,14         | 0,14       | 0,05       | 5,54         | 4,16       | 0,09 |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,34  | 0,09  | 0,51         | 0,34         | 0,04       | 0,02       | 0,06         | 0,13       | 0,04 |
| SO <sub>3</sub>                | 0,09  | 0     | 0,08         | 0,05         | 0,09       | 0,05       | 0,14         | 0,16       | 0,02 |
| BaO                            | 0     | 0     | 0            | 0            | 0          | 0          | 0,26         | 0,29       | 0    |
| SrO                            | 0,21  | 0,04  | 0,03         | 0,02         | 0,04       | 0,04       | 0,01         | 0,03       | 0,04 |

**Tabelle 9.6: Glühverlustfreie chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte A, D, G und H**

|                                | A1    | A2    | D1    | D2    | G1    | G2    | H    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| CaO                            | 87,42 | 85,76 | 98,54 | 98,19 | 98,63 | 77,44 | 97,0 |
| MgO                            | 0,75  | 0,76  | 0,68  | 0,68  | 0,32  | 19,91 | 0,71 |
| SiO <sub>2</sub>               | 7,08  | 8,56  | 0,21  | 0,16  | 0,37  | 0,31  | 1,06 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,07  | 1,27  | 0,04  | 0,04  | 0,07  | 1,79  | 0,18 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,36  | 2,66  | 0     | 0     | 0,04  | 0,09  | 0,28 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,07  | 0,07  | 0,04  | 0     | 0,02  | 0,09  | 0,02 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,46  | 0,53  | 0,11  | 0     | 0,07  | 0,11  | 0,07 |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,26  | 0,32  | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,06  | 0,02 |
| SO <sub>3</sub>                | 0,1   | 0,09  | 0,02  | 0     | 0     | 0,22  | 0,09 |
| BaO                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    |
| SrO                            | 0,2   | 0,2   | 0,04  | 0,04  | 0     | 0,02  | 0,04 |

Tabelle 9.7: Glühverlustfreie chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagerstätte J

|                                | J1    | J2    | J3    | J4    | J5    | J6    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaO                            | 99,14 | 98,84 | 99,43 | 97,41 | 98,84 | 98,47 |
| MgO                            | 0,23  | 0,41  | 0,2   | 0,46  | 0,2   | 0,2   |
| SiO <sub>2</sub>               | 0     | 0,09  | 0     | 0,85  | 0,14  | 0,21  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,13  | 0,09  | 0,14  | 0,28  | 0,07  | 0,75  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0     | 0,02  | 0     | 0,04  | 0     | 0,02  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,02  | 0,02  | 0     | 0     | 0     | 0,02  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,02  | 0,04  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,04  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0     | 0,02  |
| SO <sub>3</sub>                | 0     | 0,02  | 0     | 0,05  | 0     | 0,02  |
| BaO                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| SrO                            | 0     | 0,02  | 0     | 0,04  | 0,02  | 0,02  |

9.8: Glühverlustfreie chemische Zusammensetzung der Handstücke der Lagertätten I, P und Y

|                                | I1    | I2    | P2    | P2    | Y1    | Y2    | Y3    | Y4    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaO                            | 59,96 | 88,24 | 88,88 | 57,94 | 96,61 | 87,15 | 89,49 | 95,06 |
| MgO                            | 39,09 | 13,78 | 9,37  | 33,83 | 1,0   | 1,08  | 1,07  | 0,81  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,76  | 0,57  | 0,2   | 0,32  | 0,73  | 6,29  | 4,45  | 1,5   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,44  | 0,51  | 0,32  | 3,04  | 0,45  | 0,68  | 0,74  | 0,44  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0     | 0     | 0,09  | 0     | 0,27  | 2,05  | 1,62  | 0,58  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,02  | 0     | 0,02  | 0     | 0,09  | 0,09  | 0,1   | 0,11  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,02  | 0,02  | 0,1   | 0     | 0,16  | 0,55  | 0,5   | 0,23  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,15  | 0,19  | 0,14  | 2,11  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,02  | 0     | 0,02  | 0     | 0,07  | 0,4   | 0,62  | 0,32  |
| BaO                            | 0     | 0     | 0     | 0,07  | 0     | 0     | 0     | 0     |
| SrO                            | 0     | 0,02  | 0,04  | 0     | 0,27  | 0,21  | 0,22  | 0,16  |

## 9.2 Röntgendiffraktogramme

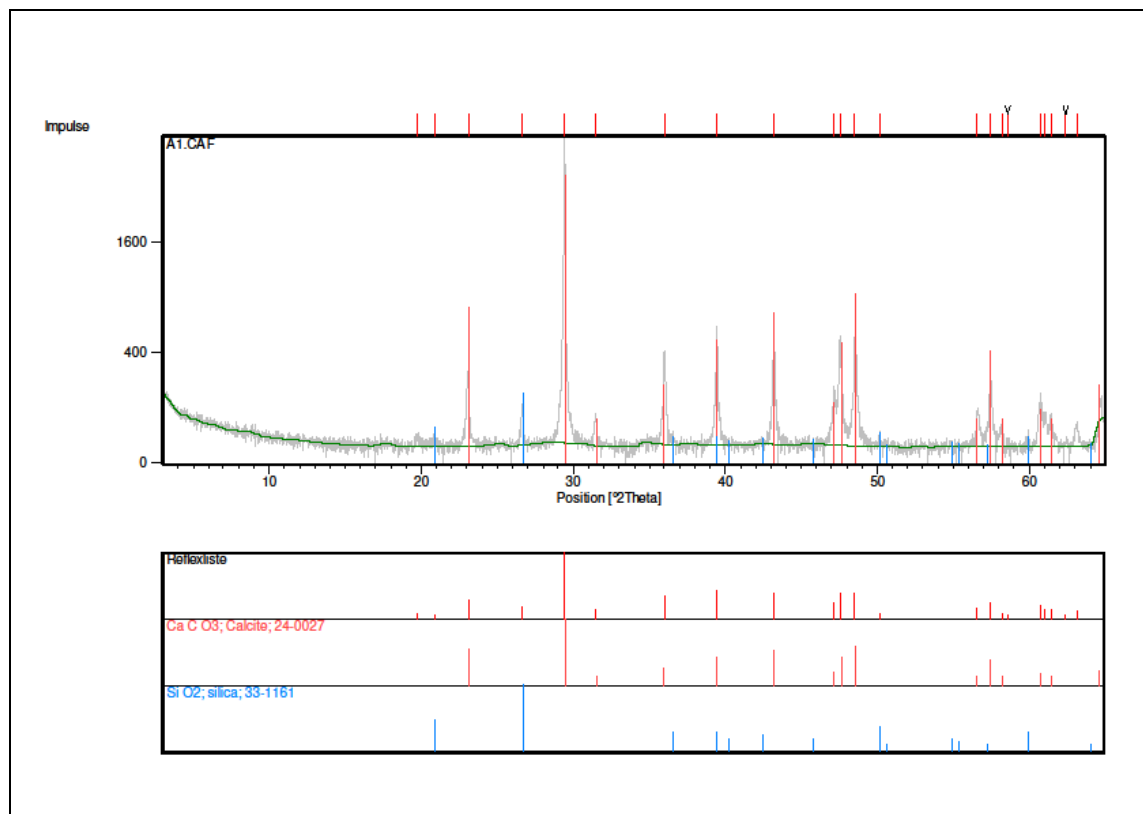


Abbildung 9.1: Röntgendiffraktogramm des Handstückes A1

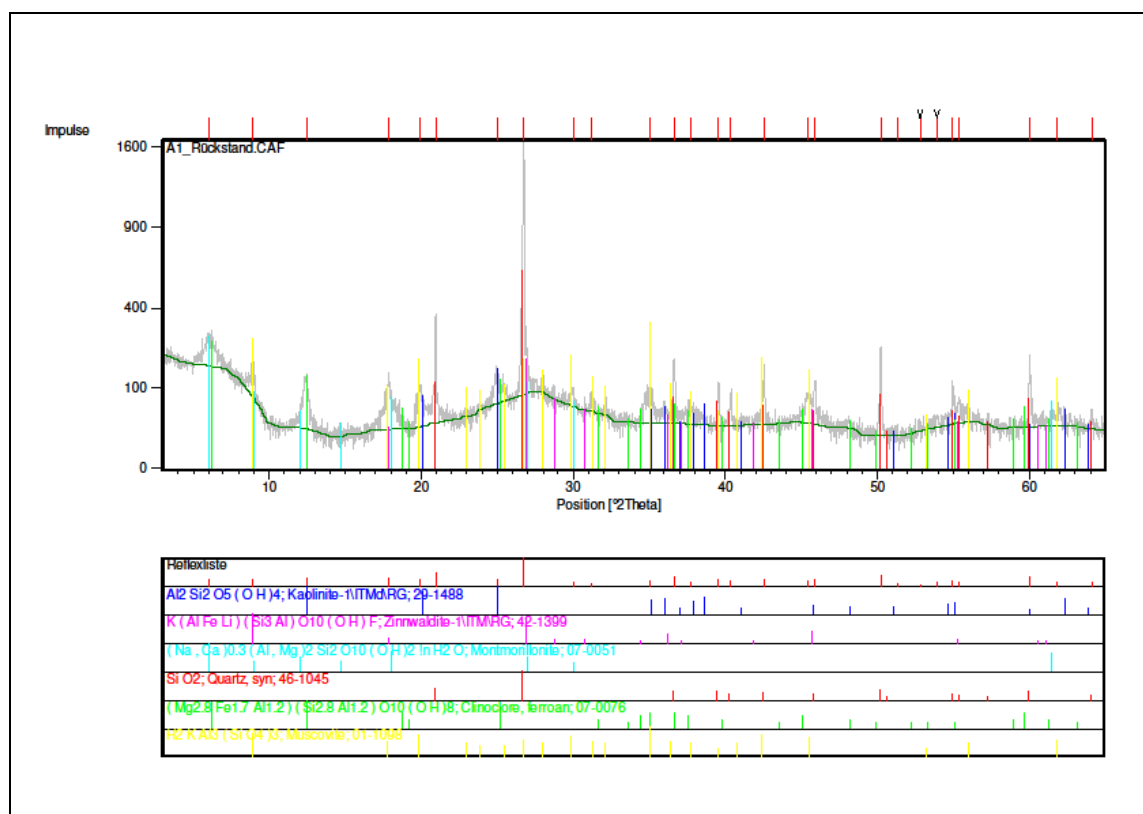


Abbildung 9.2: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handsstückes A1

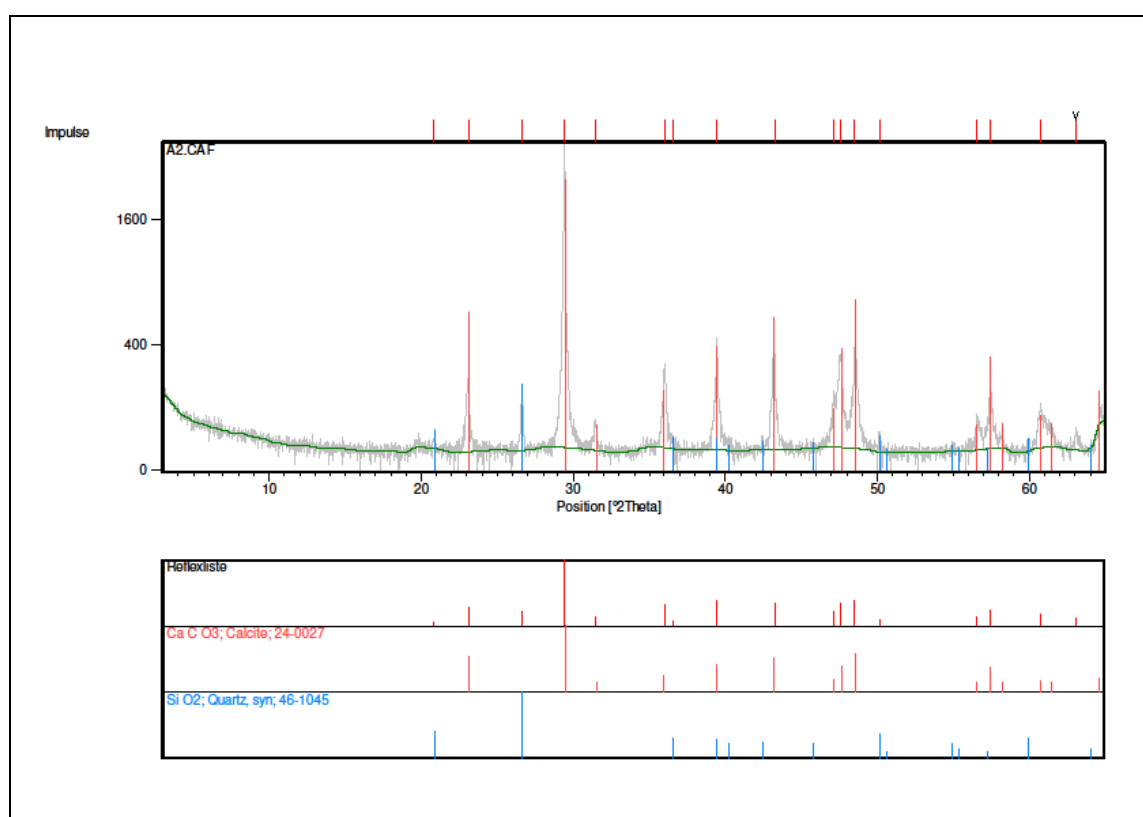


Abbildung 9.3: Röntgendiffraktogramm des Handsstückes A2

Abbil

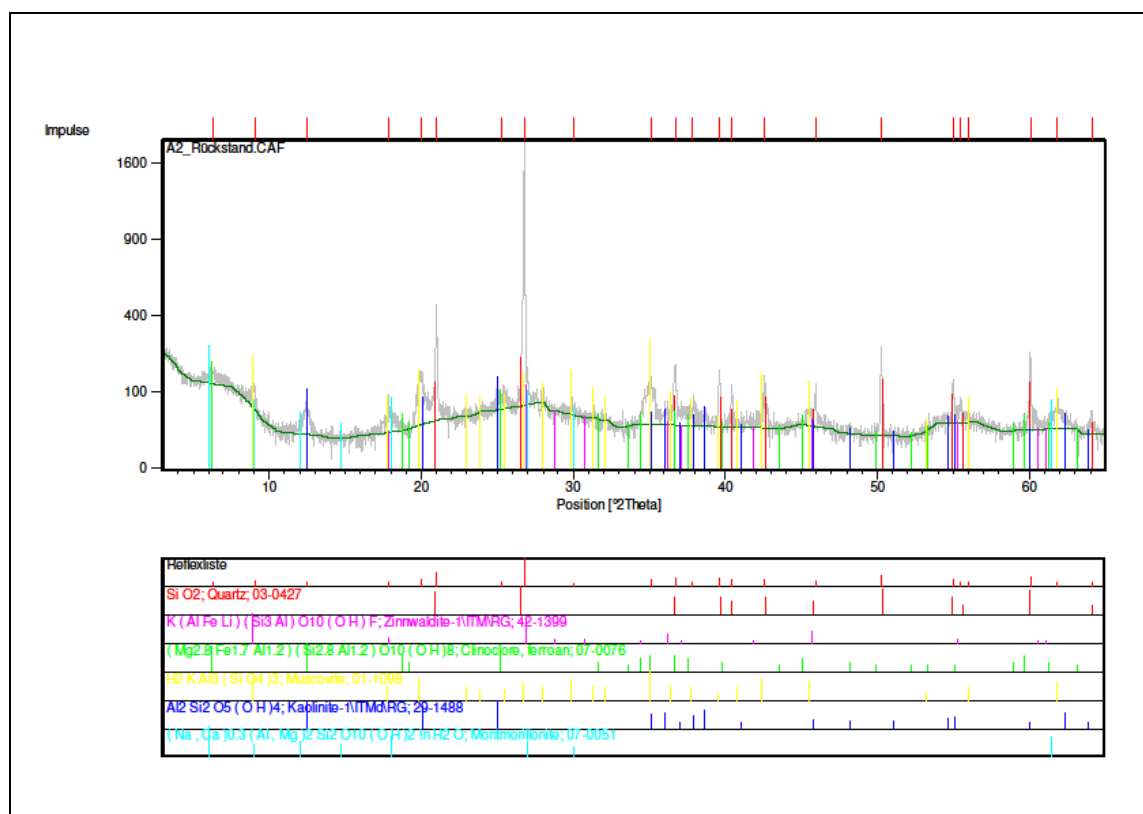


Abbildung 9.4: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes A2

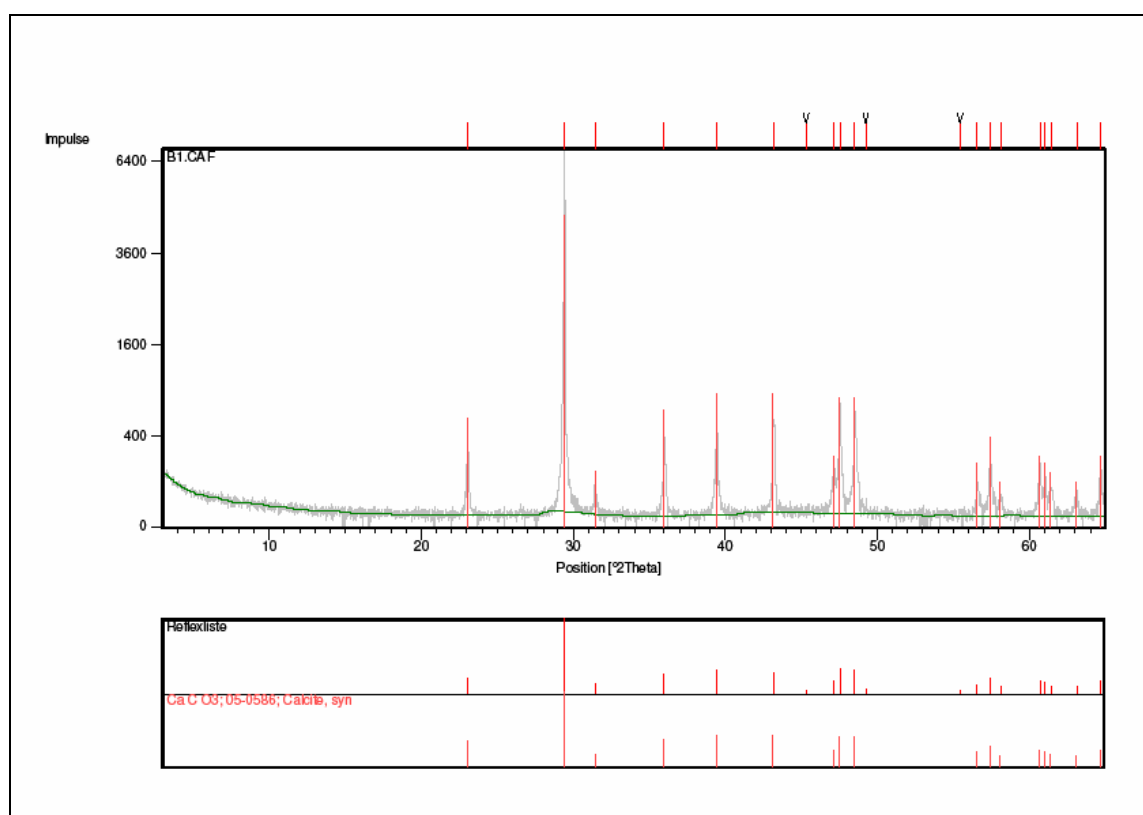


Abbildung 9.5: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B1

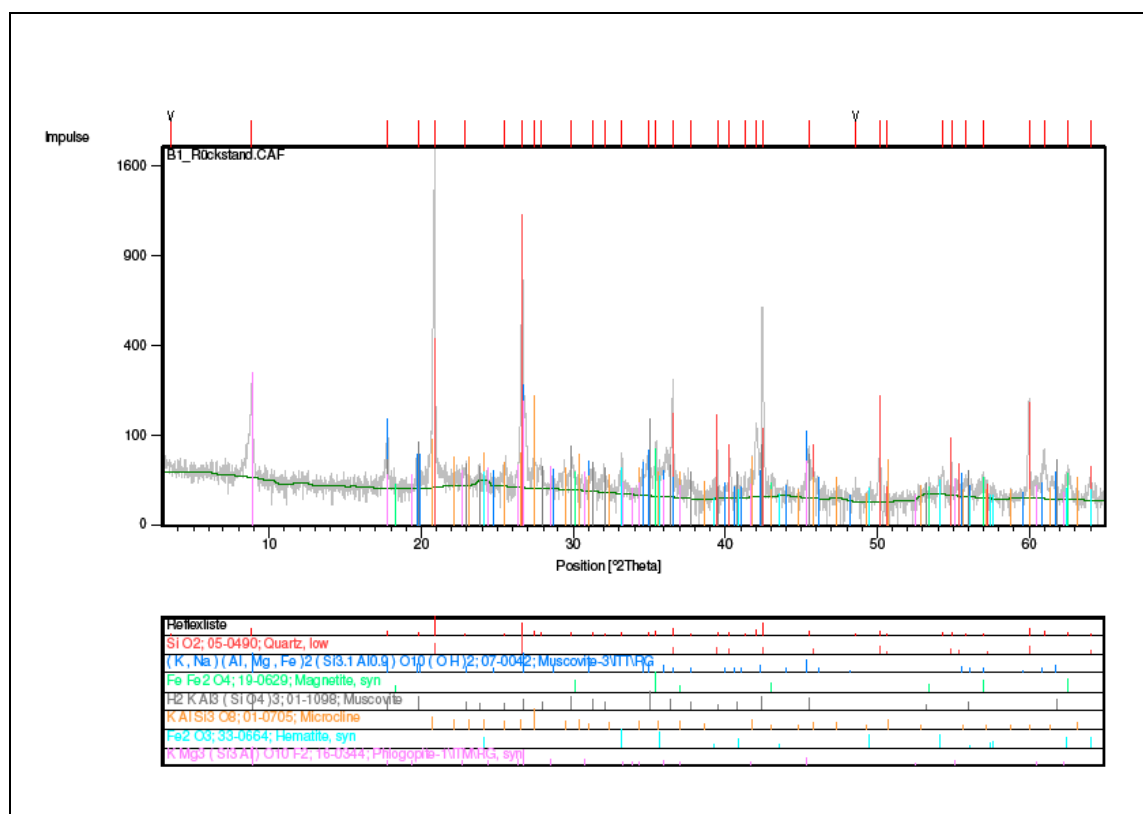


Abbildung 9.6: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B1

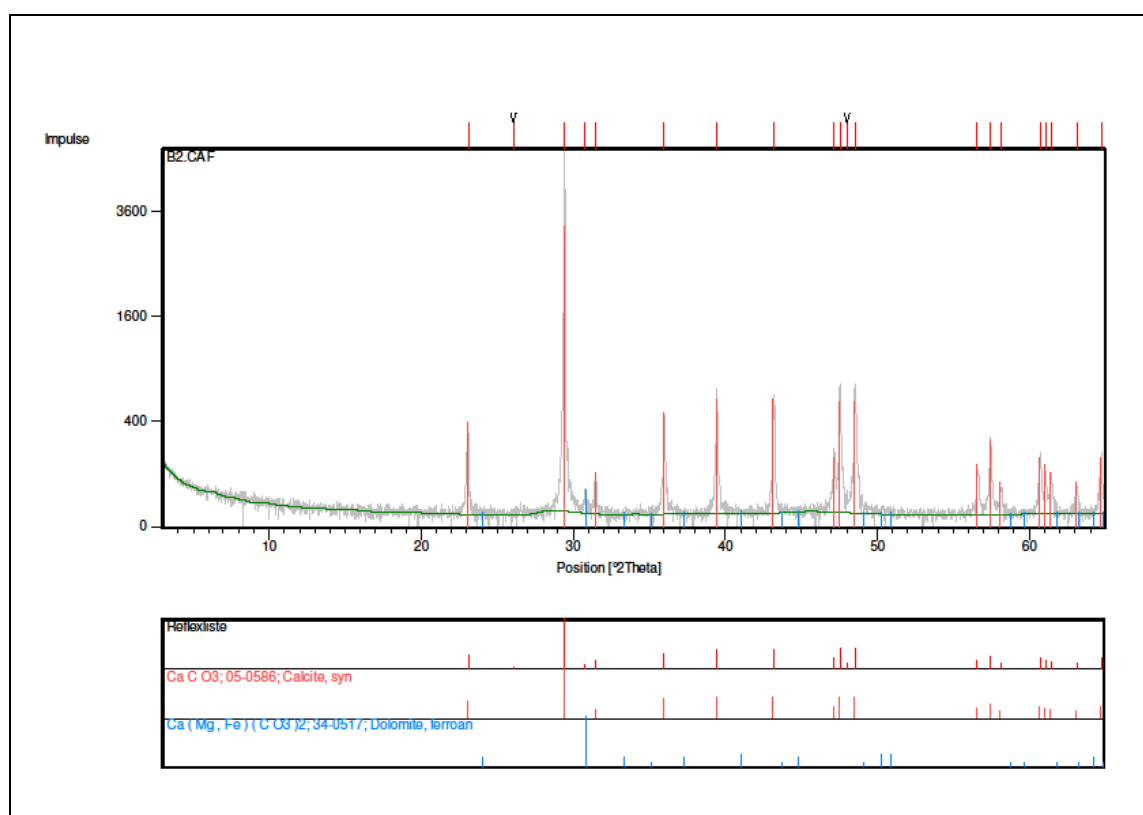


Abbildung 9.7: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B2

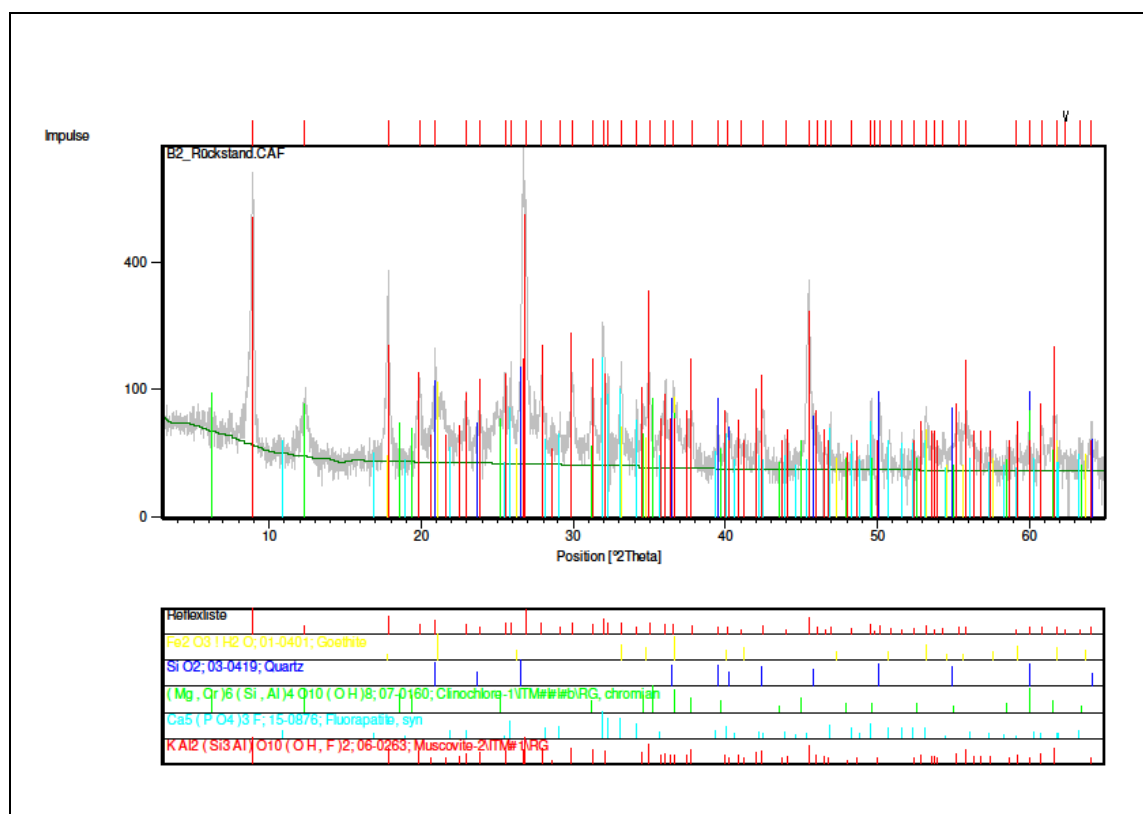


Abbildung 9.8: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B2

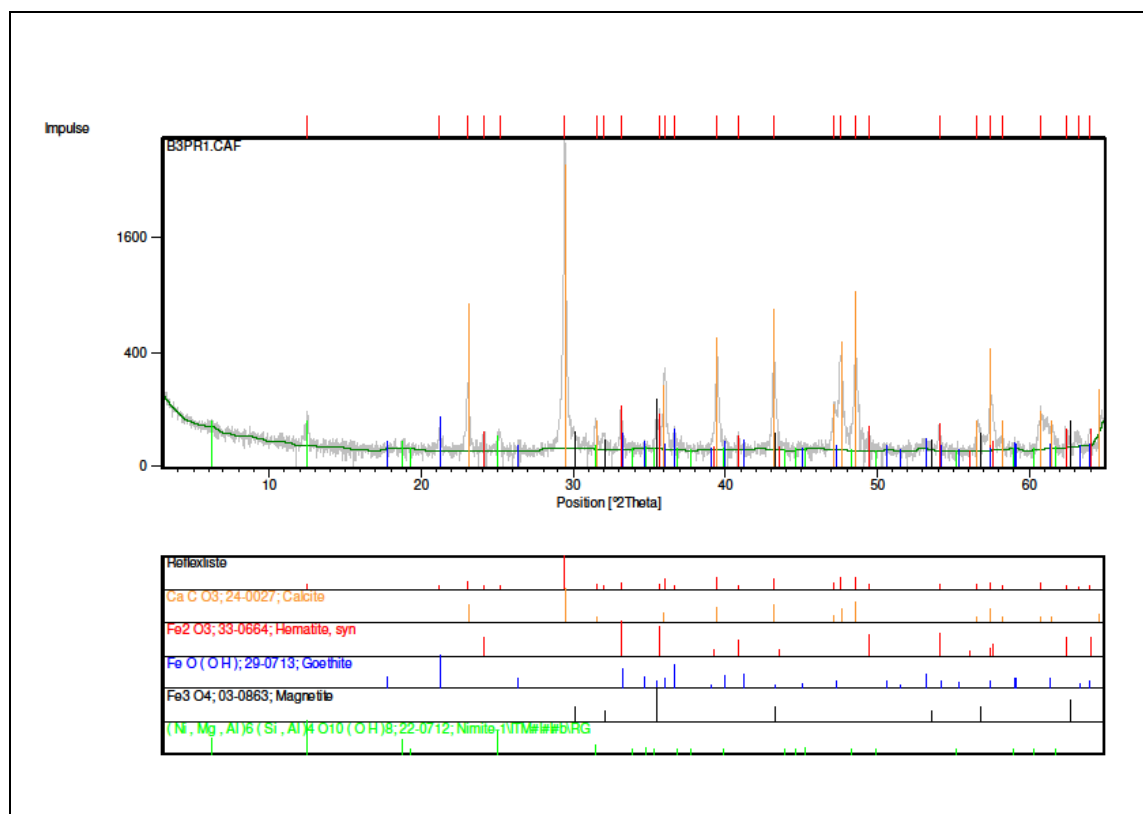


Abbildung 9.9: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B3 Probe 1

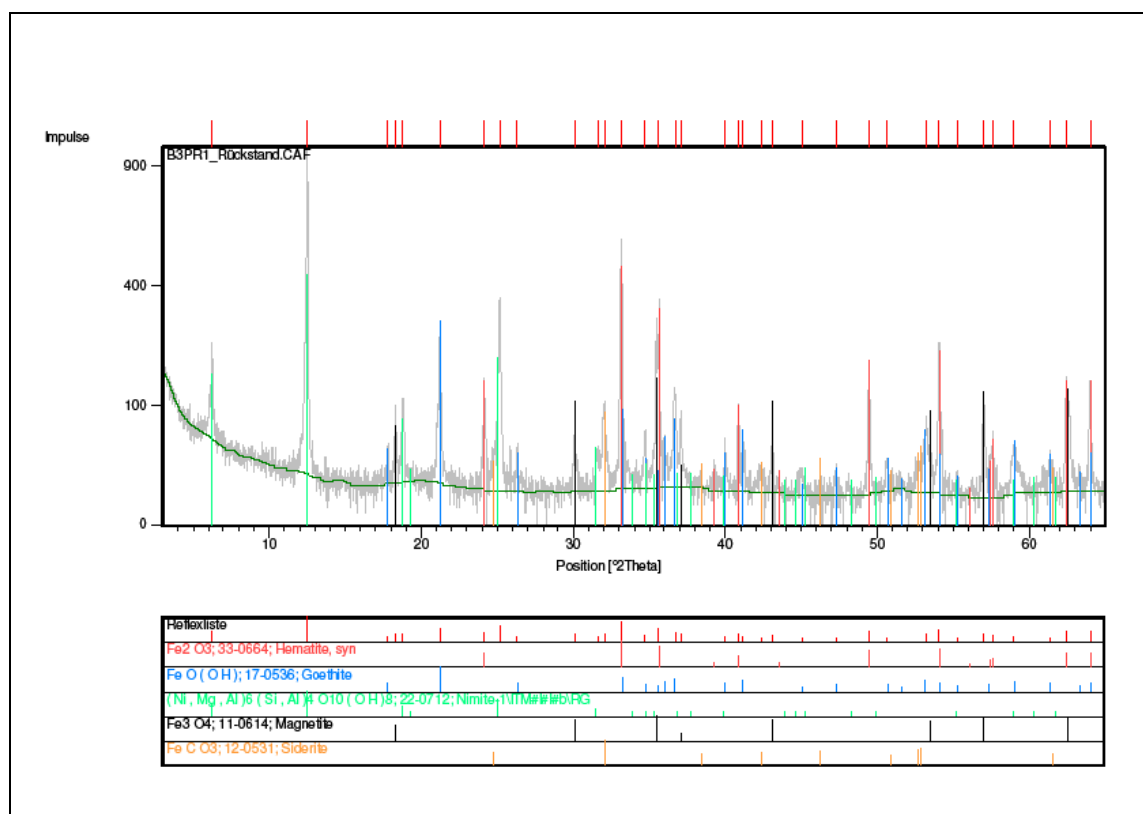


Abbildung 9.10: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B3 Probe 1

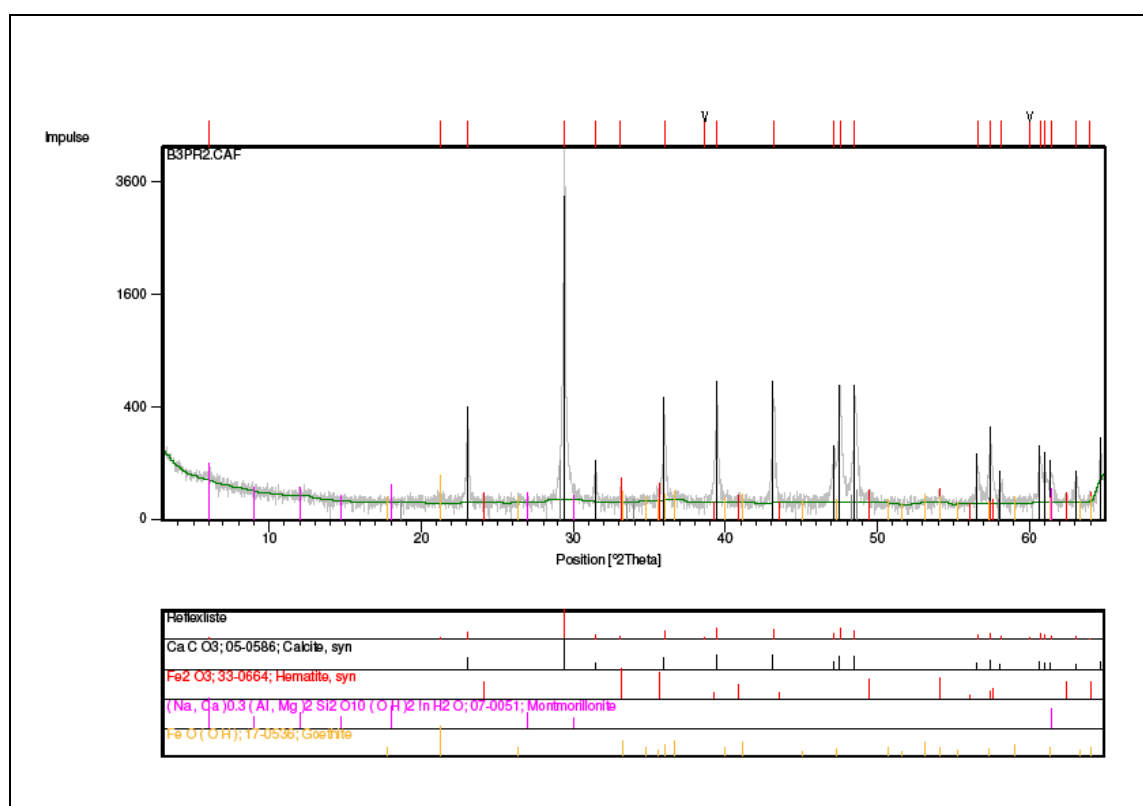


Abbildung 9.11: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B3 Probe 2

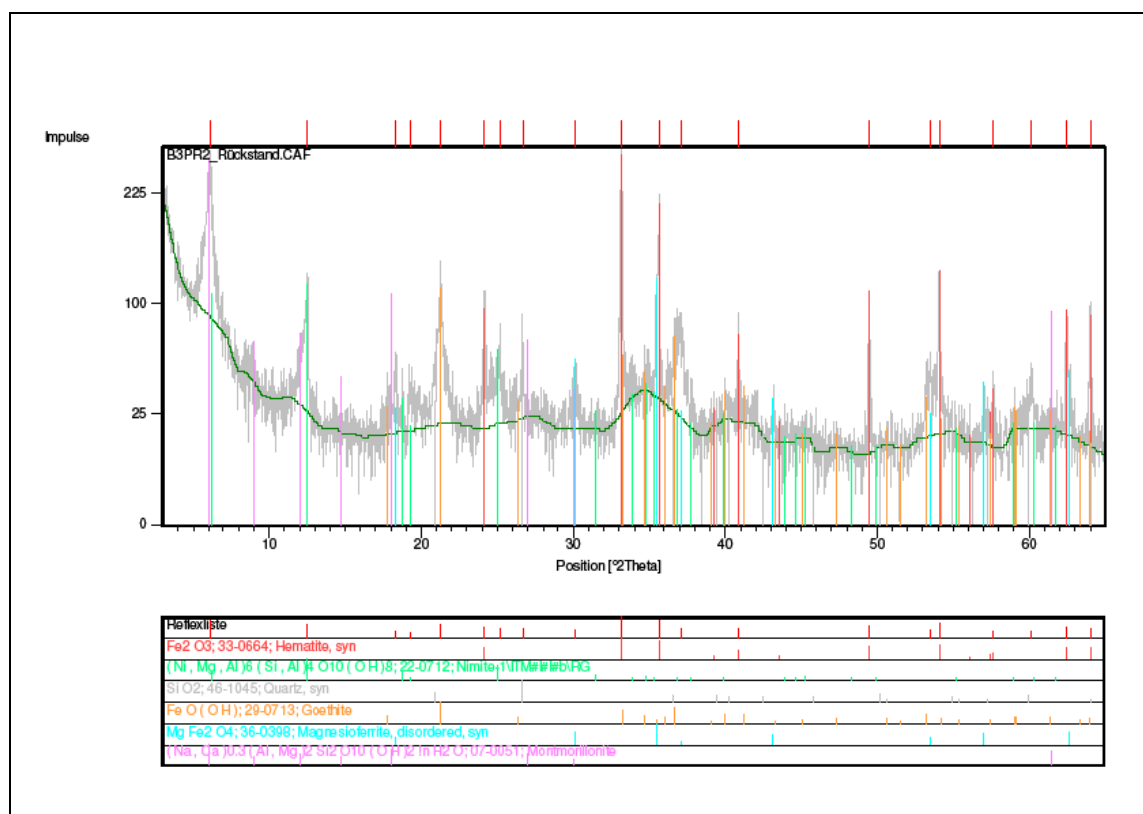


Abbildung 9.12: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B3 Probe 2

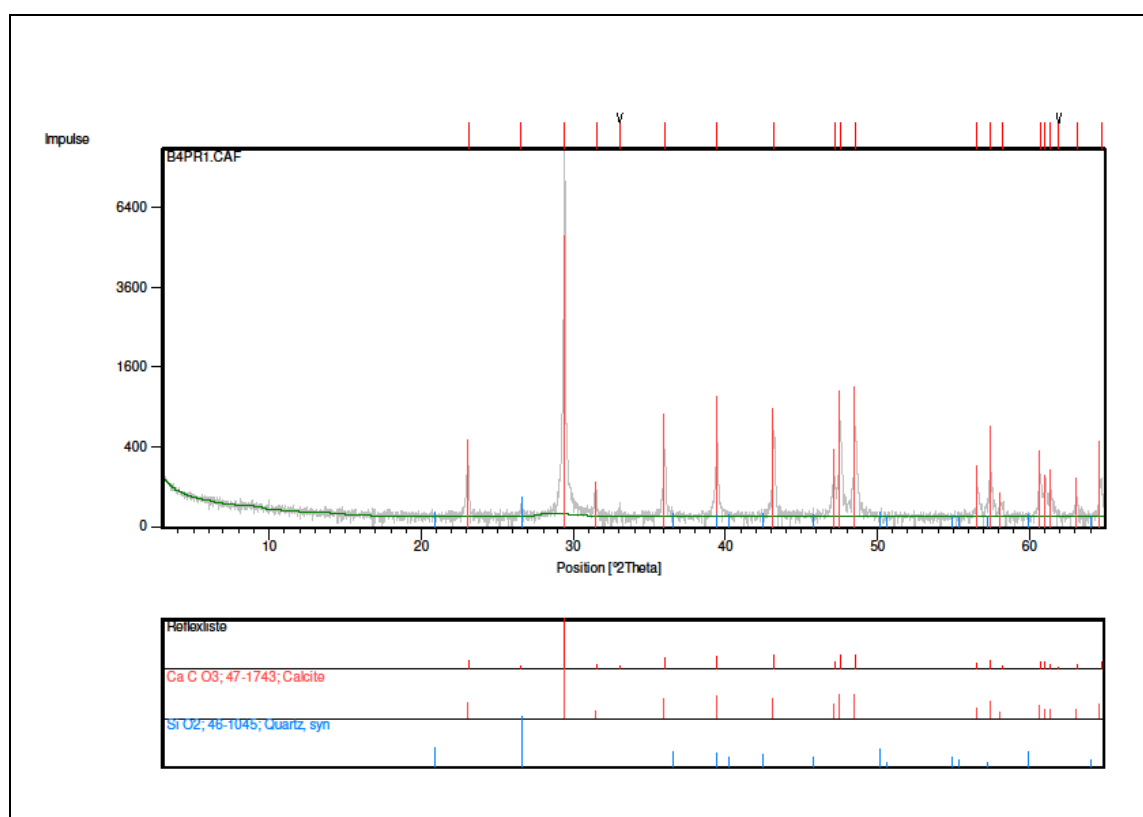


Abbildung 9.13: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B4 Probe 1

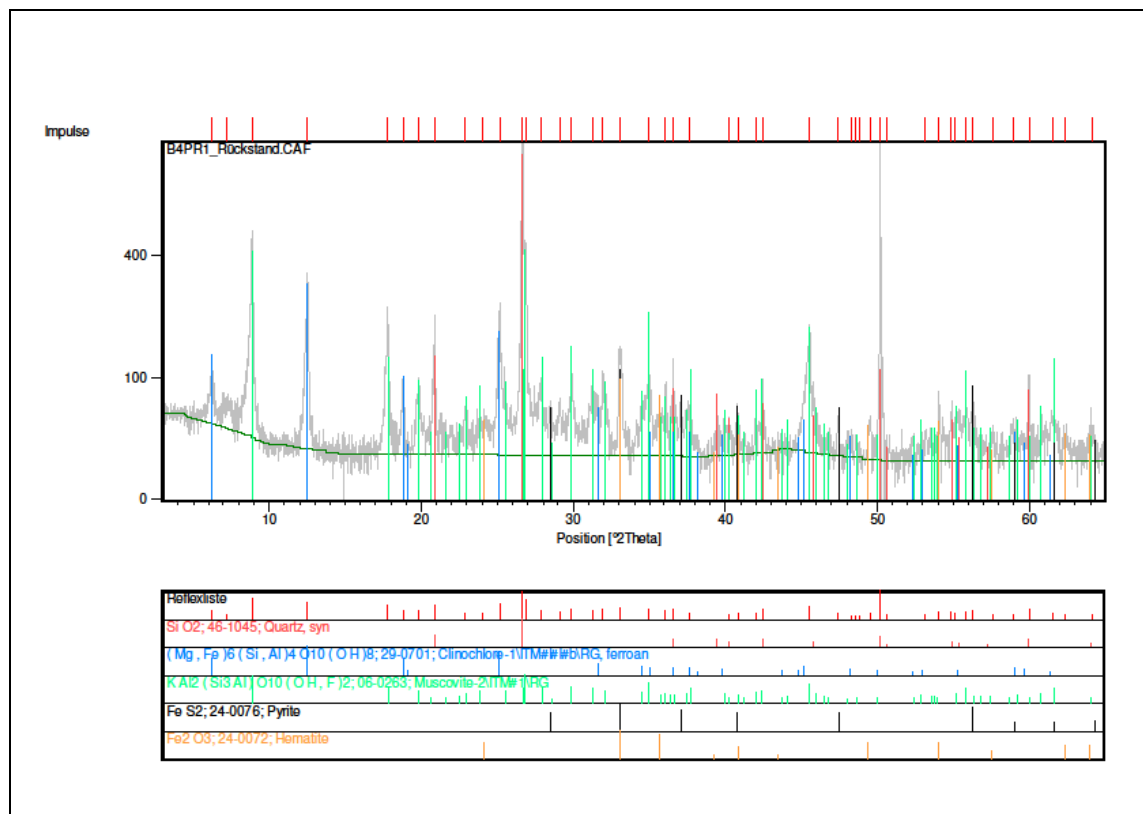


Abbildung 9.14: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B4 Probe 1

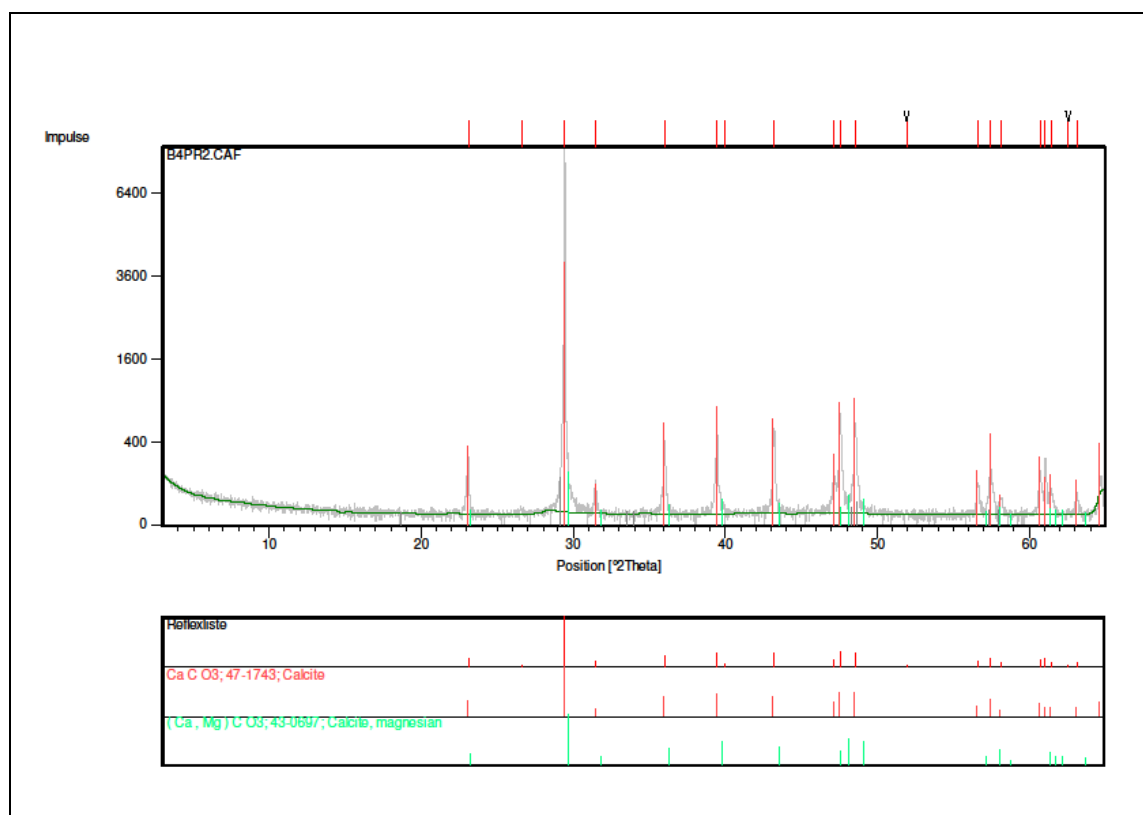


Abbildung 9.15: Röntgendiffraktogramm des KST B4 Probe 2

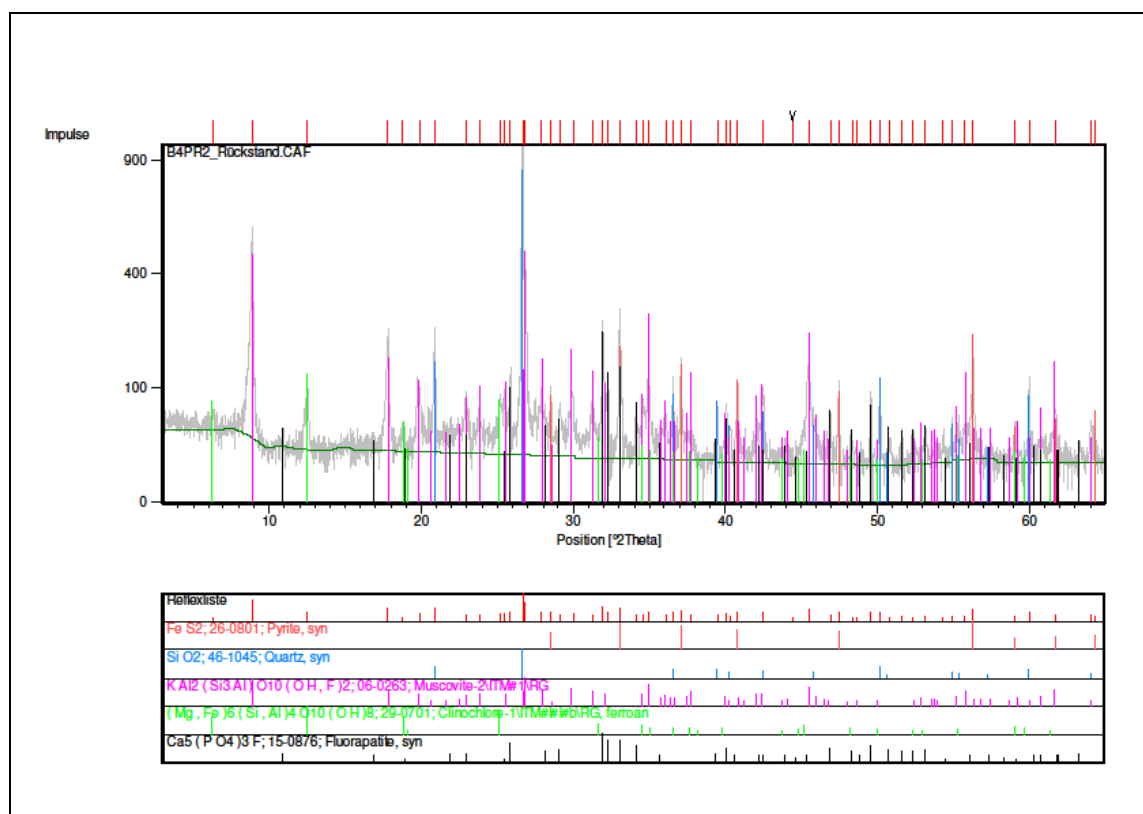


Abbildung 9.16: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B4 Probe 2

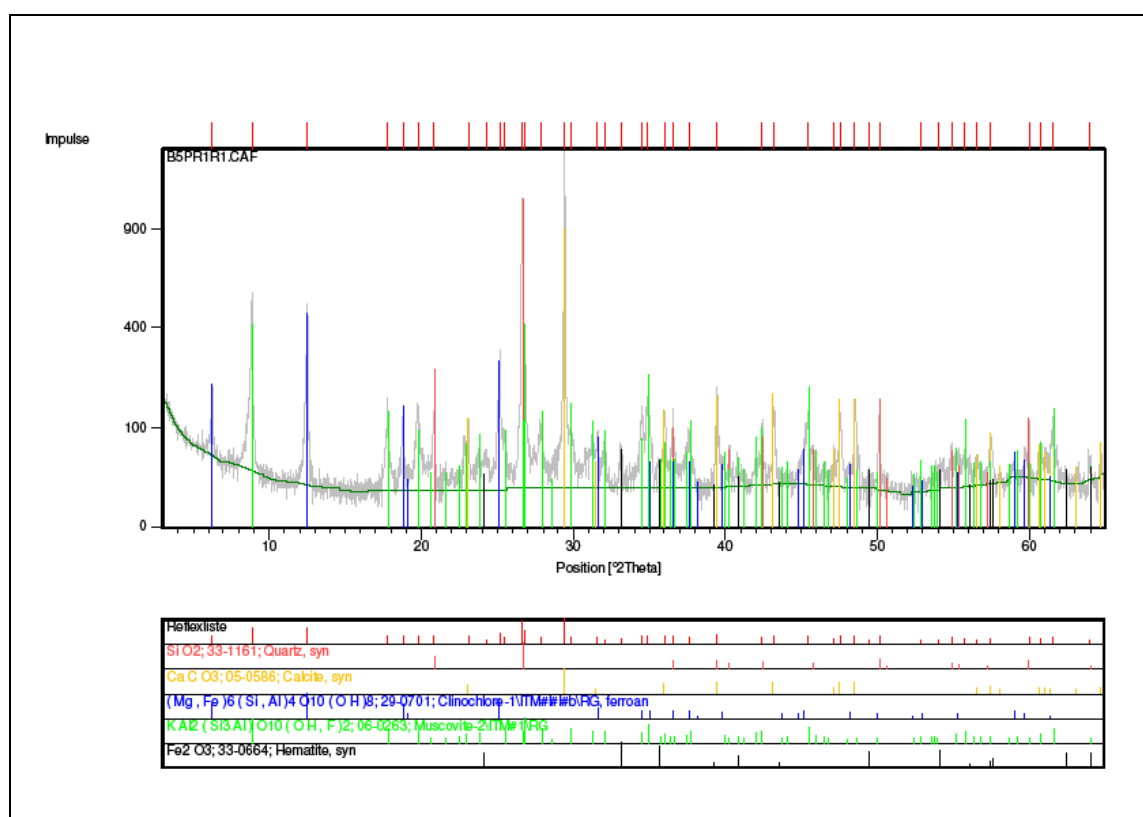


Abbildung 9.17: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B5 Probe 1

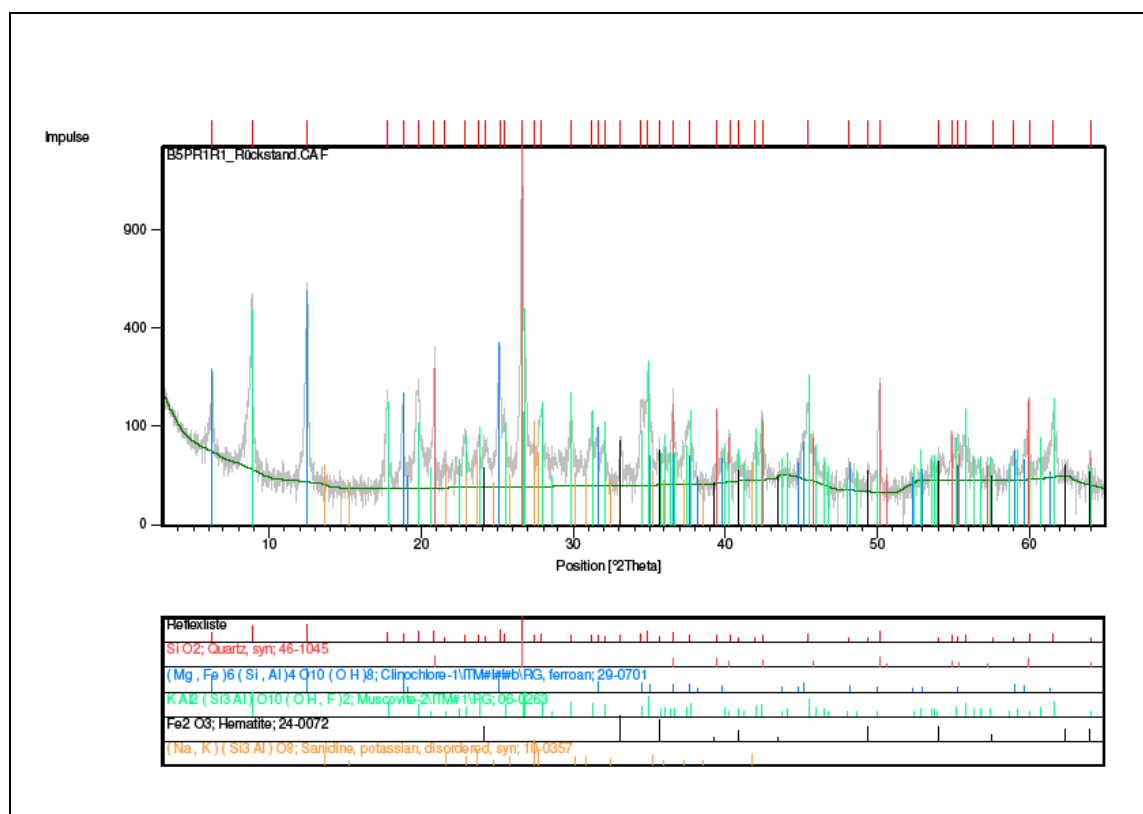


Abbildung 9.18: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B5 Probe 1

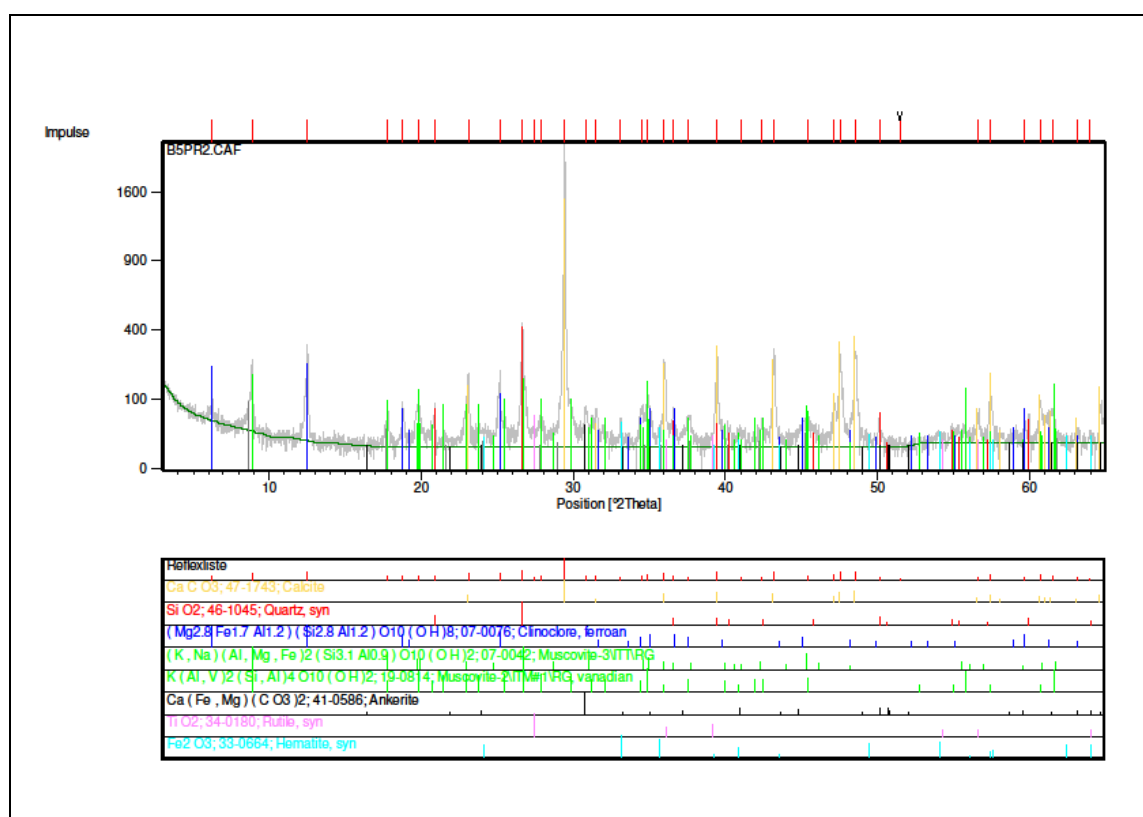


Abbildung 9.19: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B5 Probe 2

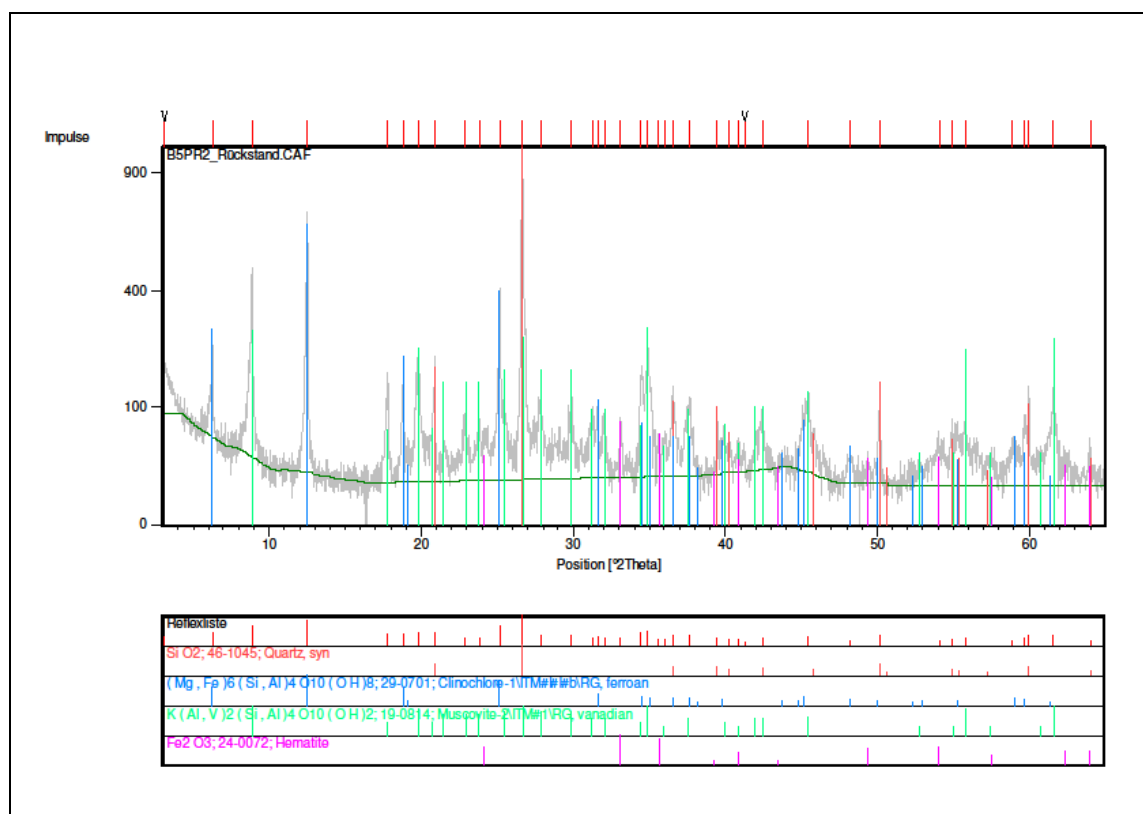


Abbildung 9.20: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B5 Probe 2

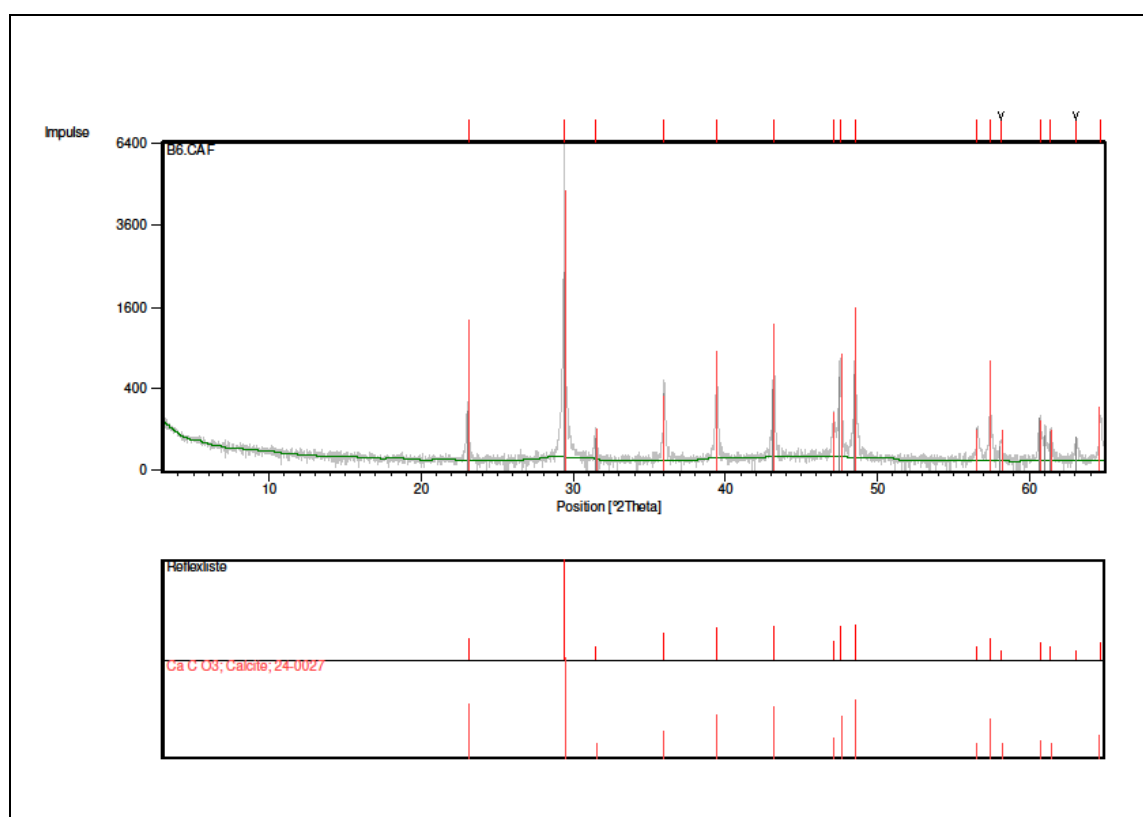


Abbildung 9.21: Röntgendiffraktogramm des Handstückes B6

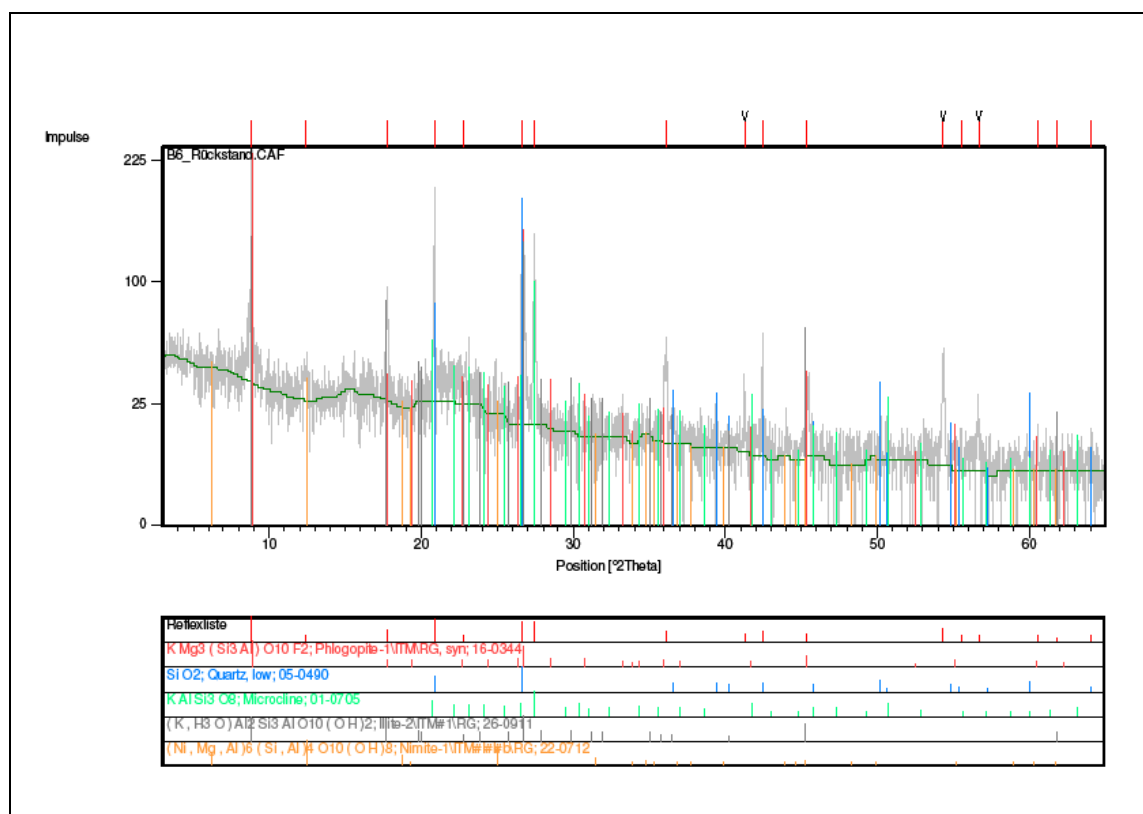


Abbildung 9.22: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes B6

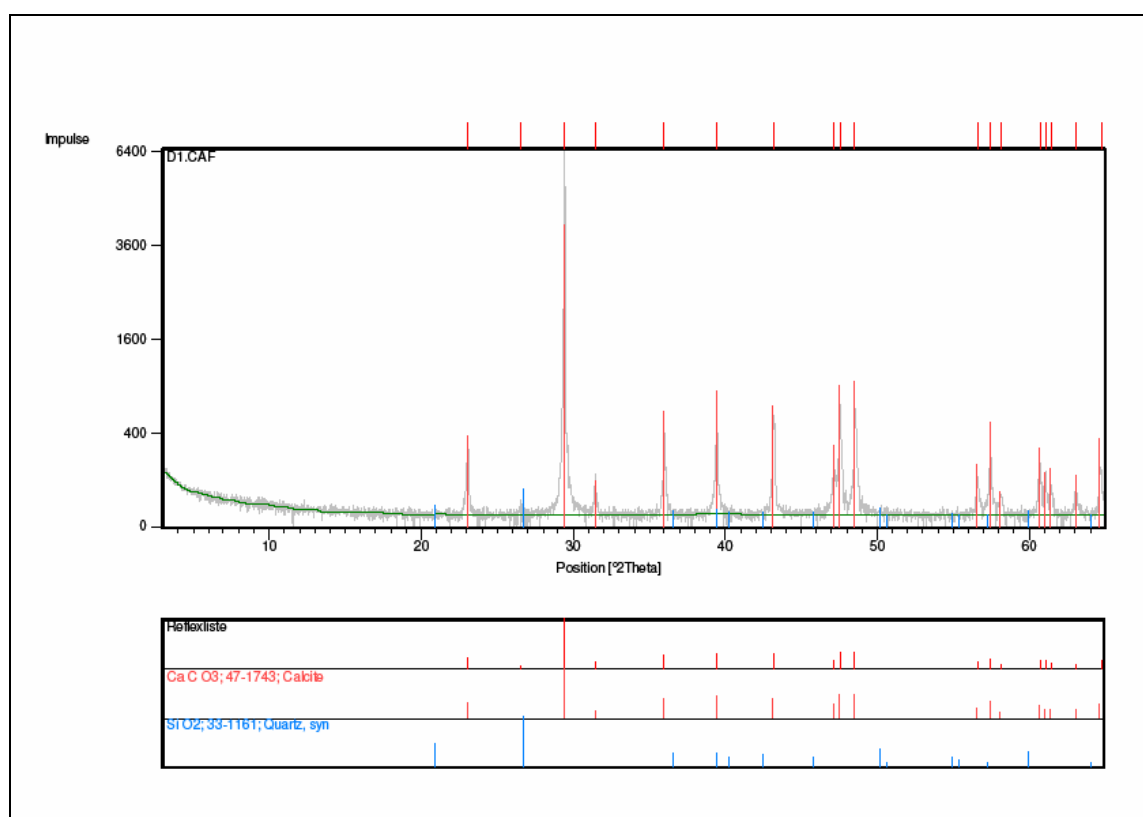


Abbildung 9.23: Röntgendiffraktogramm des Handstückes D1

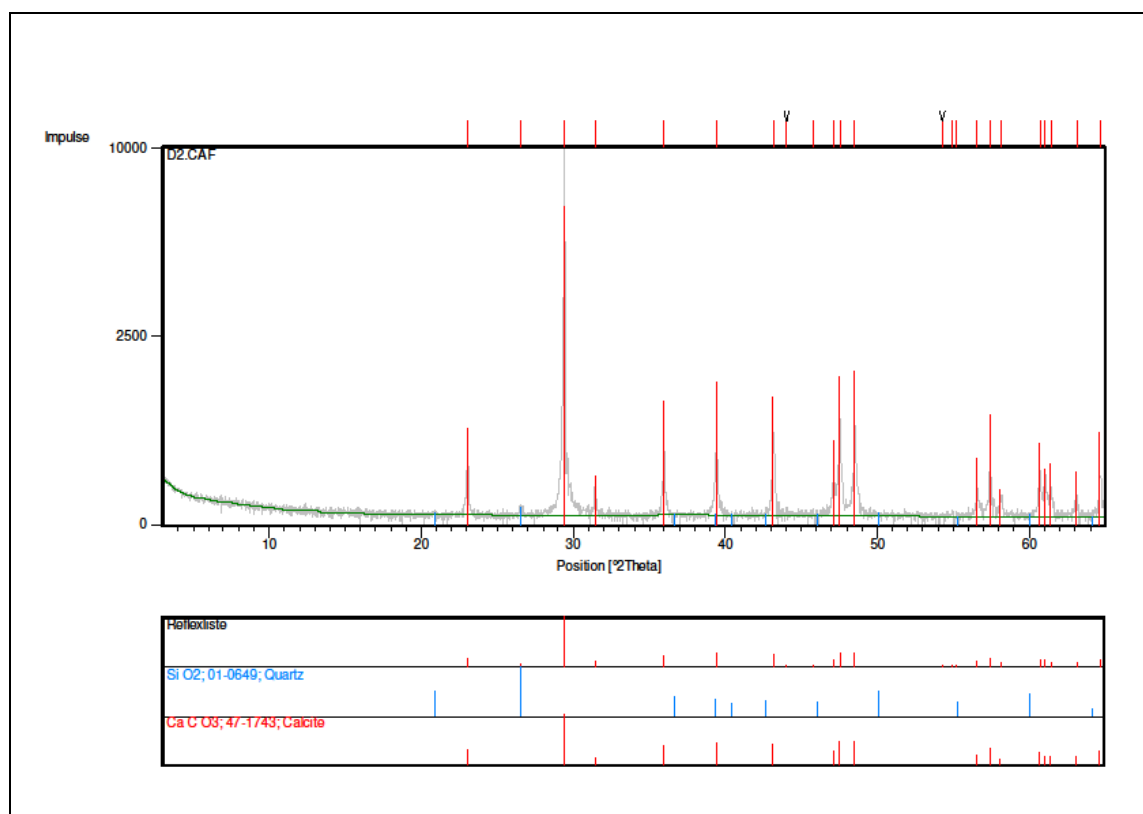


Abbildung 9.24: Röntgendiffraktogramm des Handstückes D2

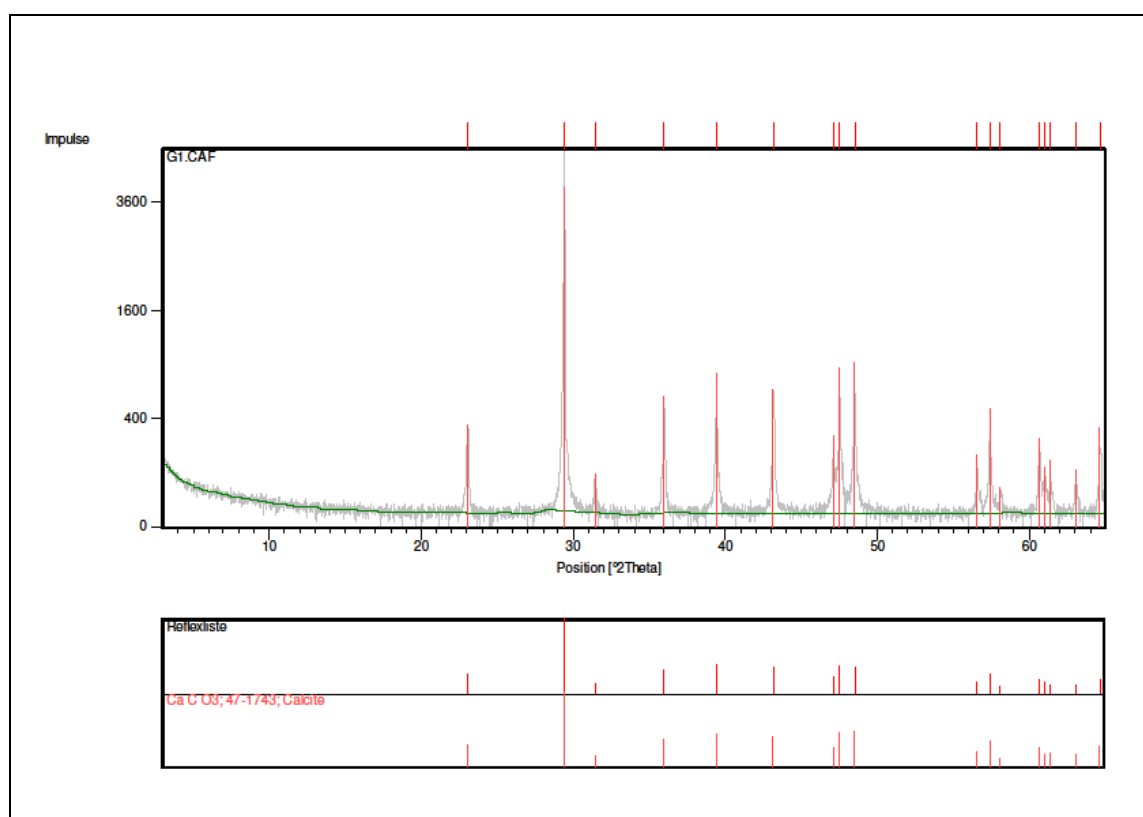


Abbildung 9.25: Röntgendiffraktogramm des Handstückes G1

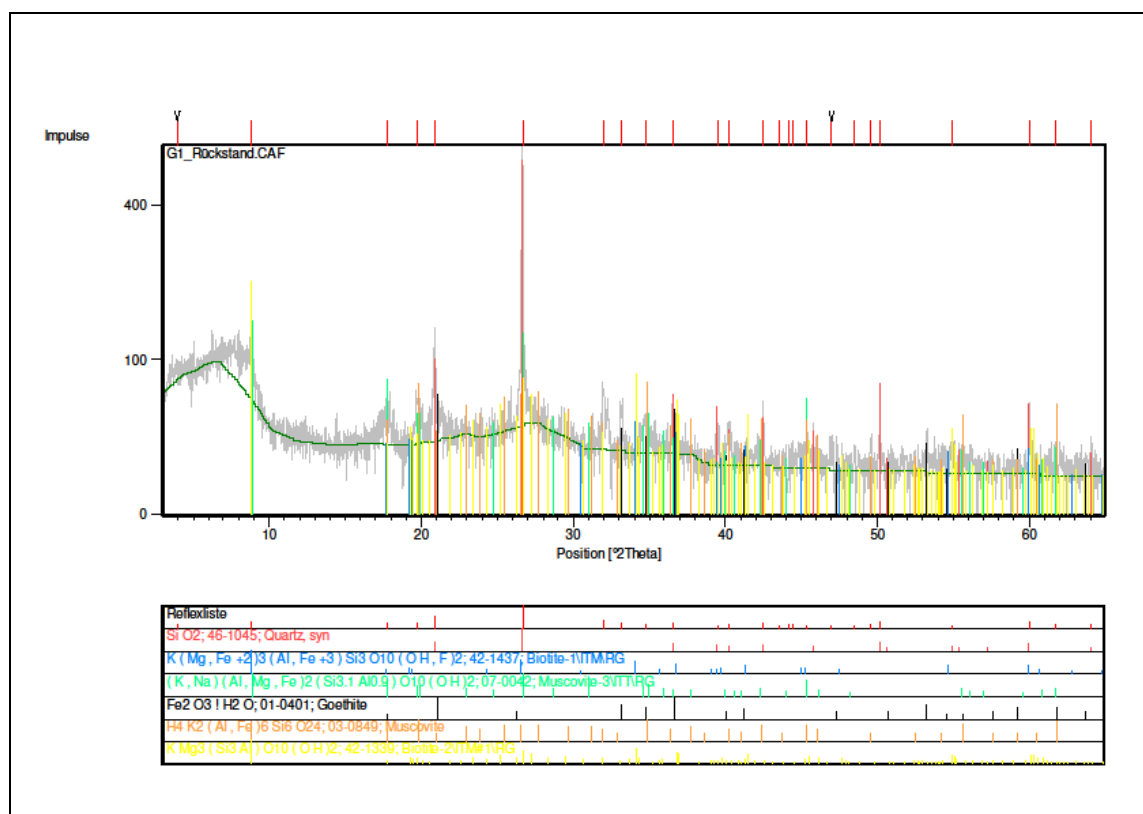


Abbildung 9.26: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes G1

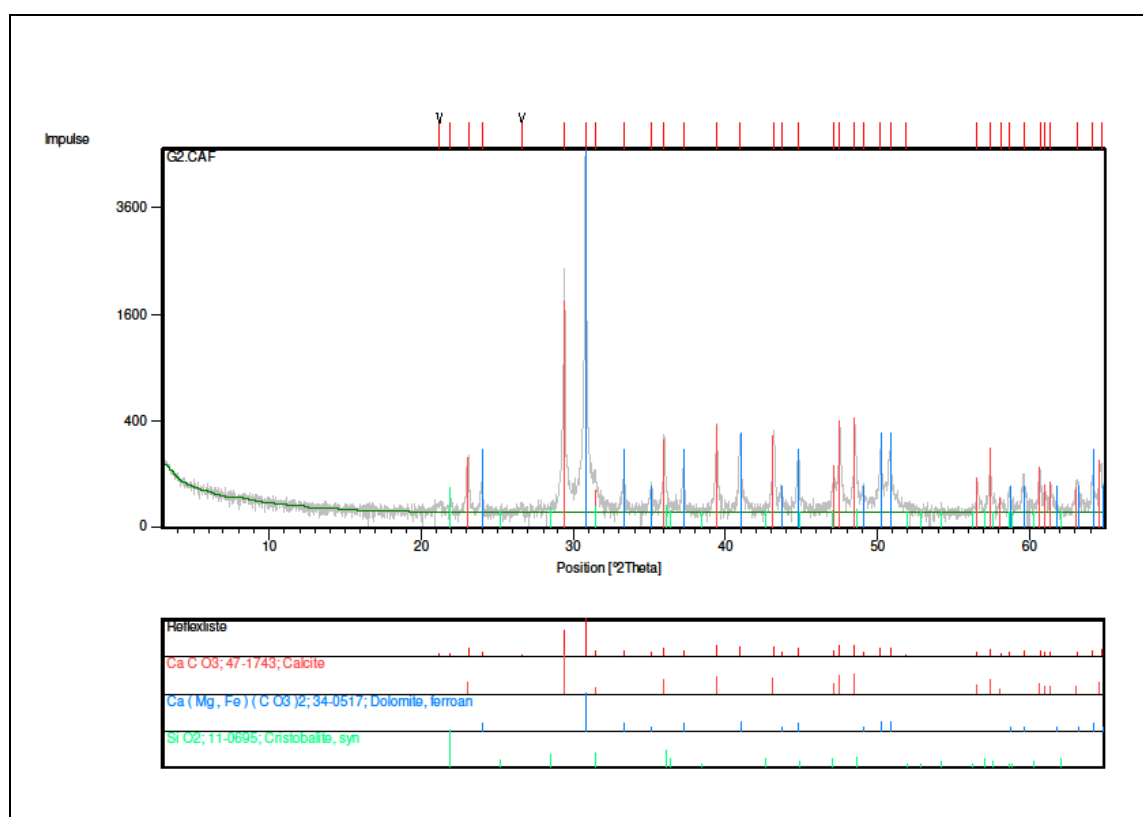


Abbildung 9.27: Röntgendiffraktogramm des Handstückes G2

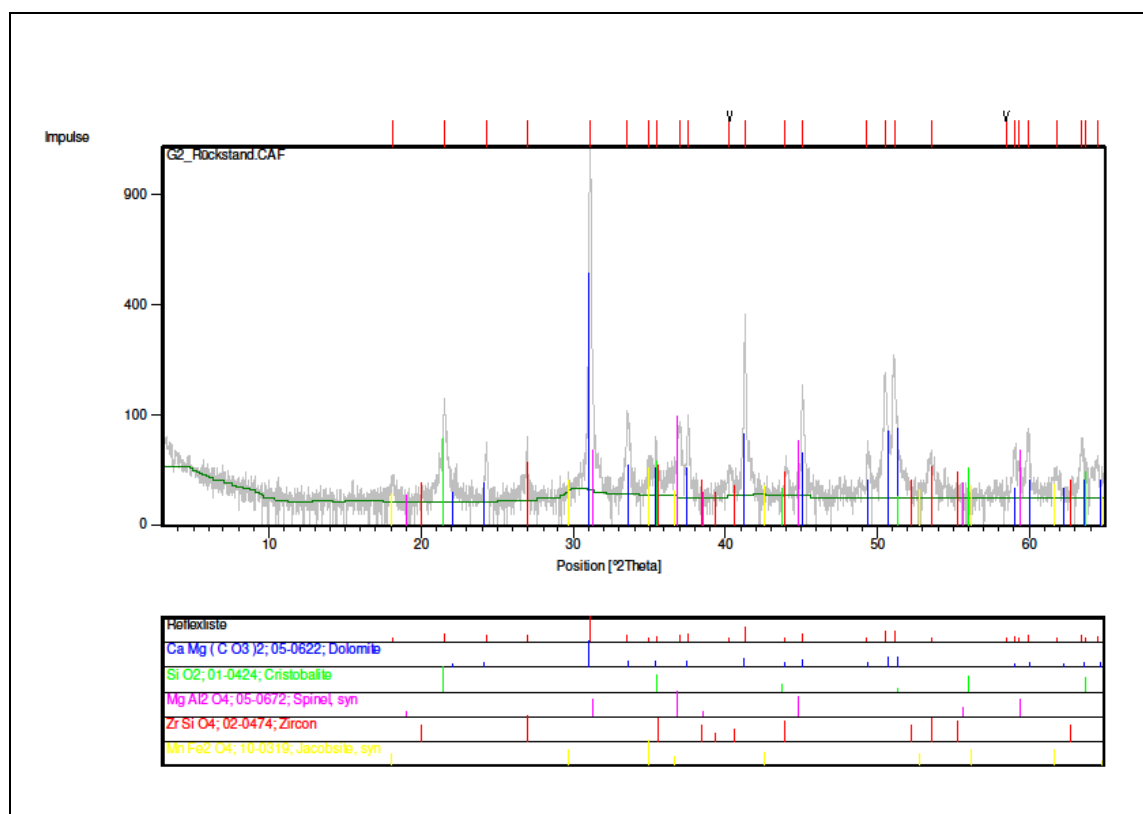
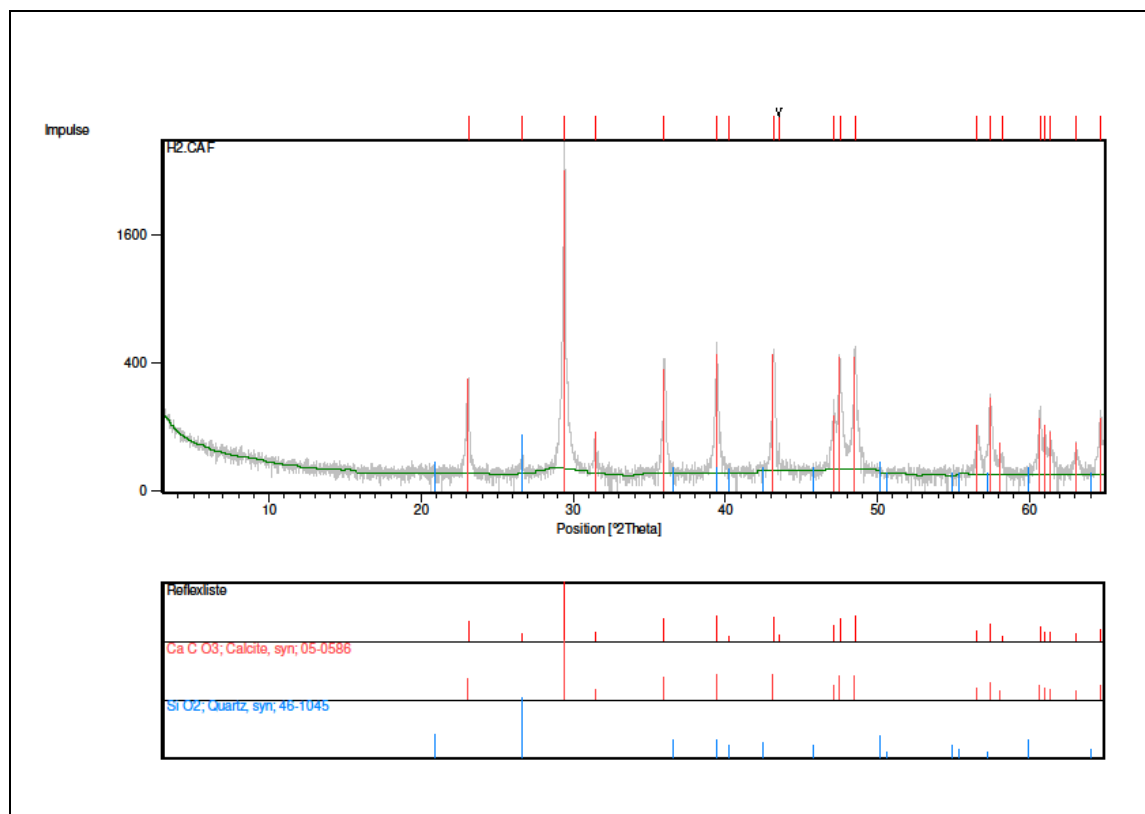
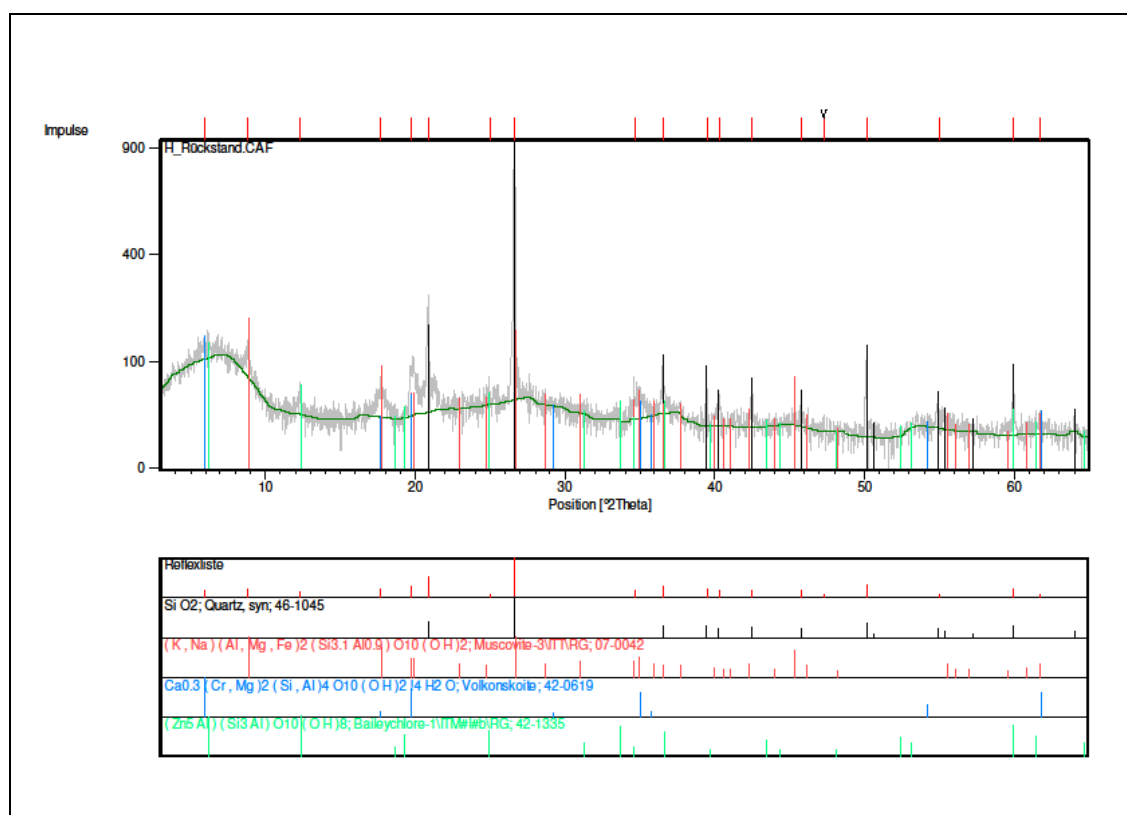


Abbildung 9.28: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes G2



Abbil

dung 9.29: Röntgendiffraktogramm des Handstückes H



Abbil

ung 9.30: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes H

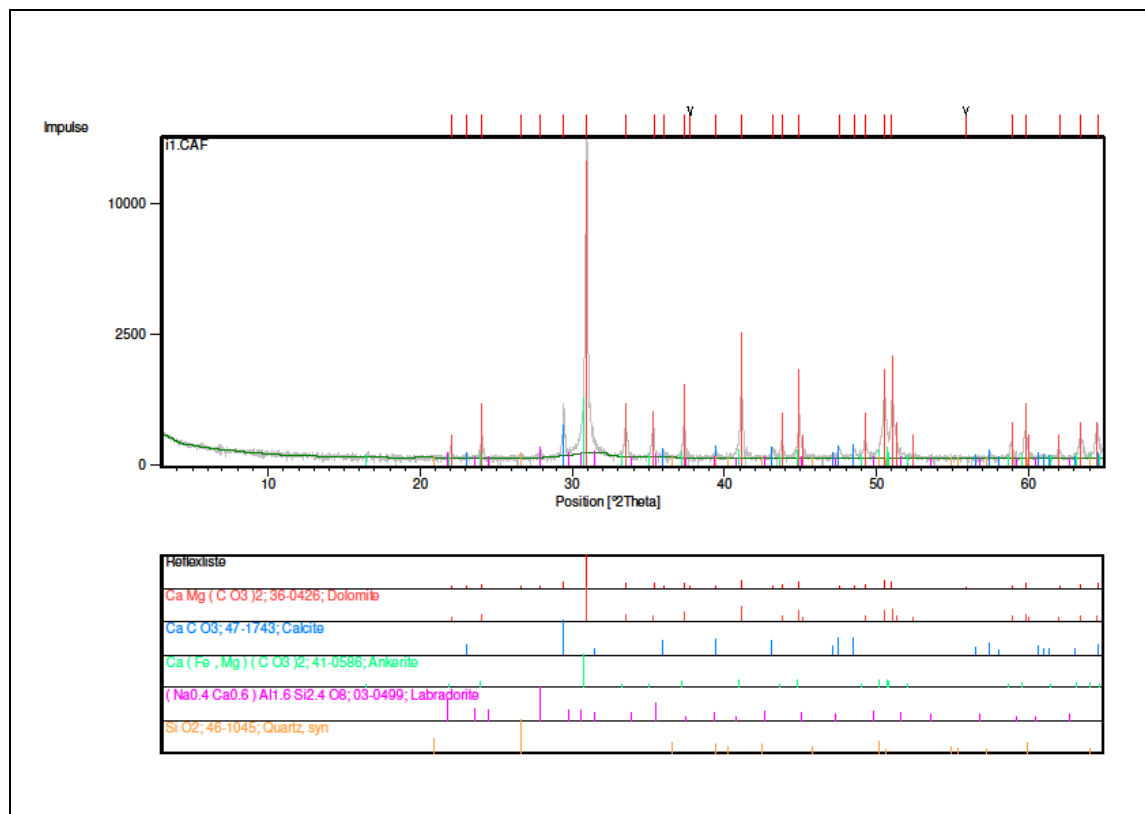


Abbildung 9.31: Röntgendiffraktogramm des Handstückes I1

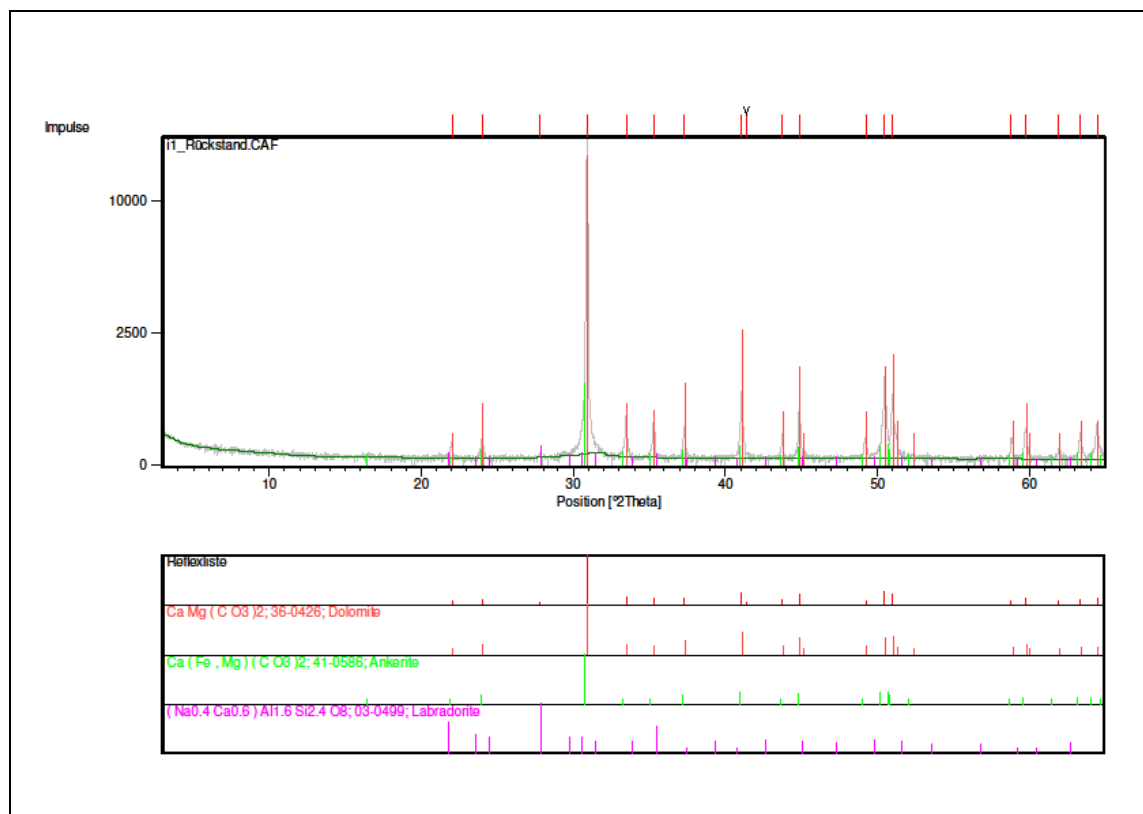


Abbildung 9.32: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes I1

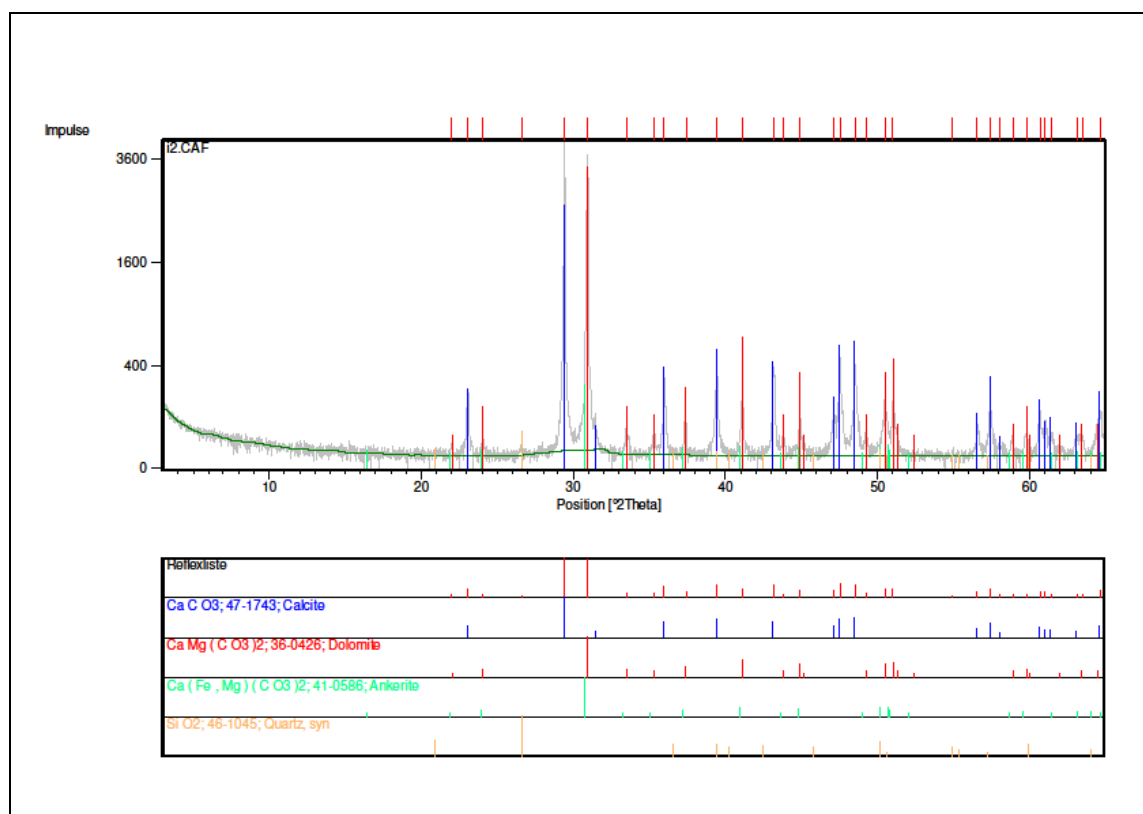


Abbildung 9.33: Röntgendiffraktogramm des Handstückes I2

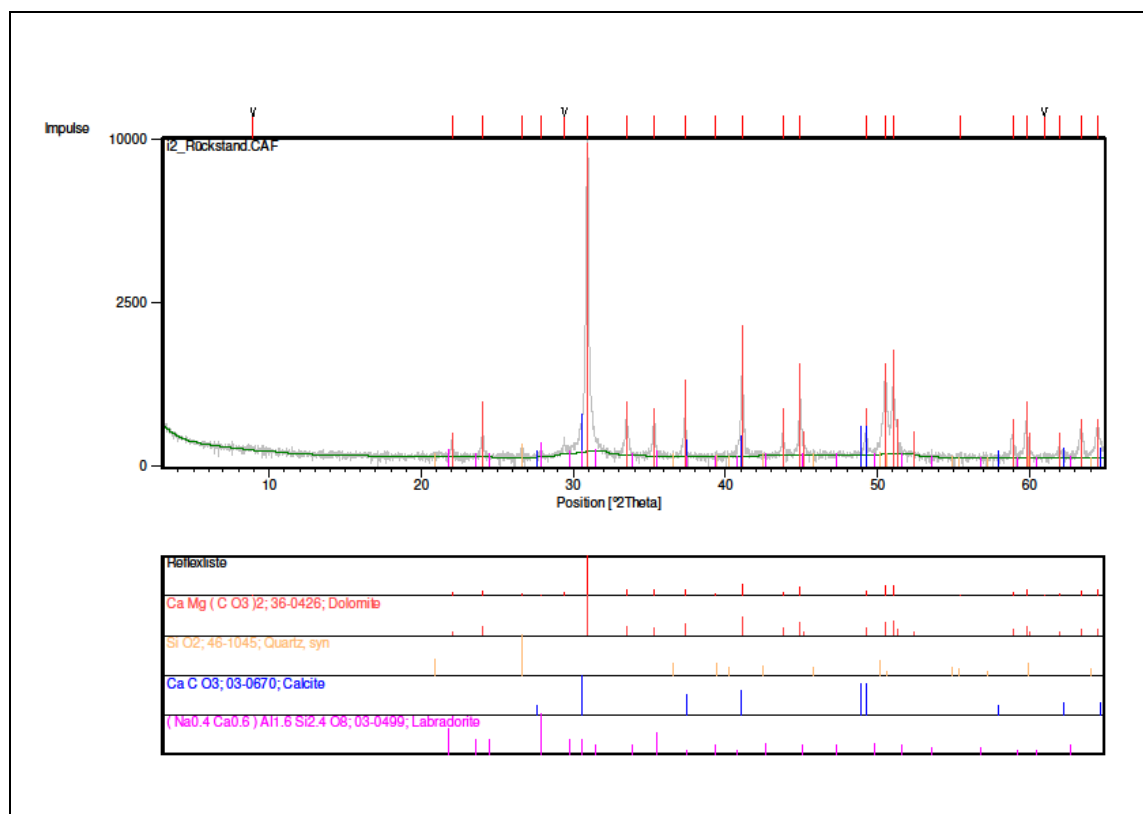


Abbildung 9.34: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes I2

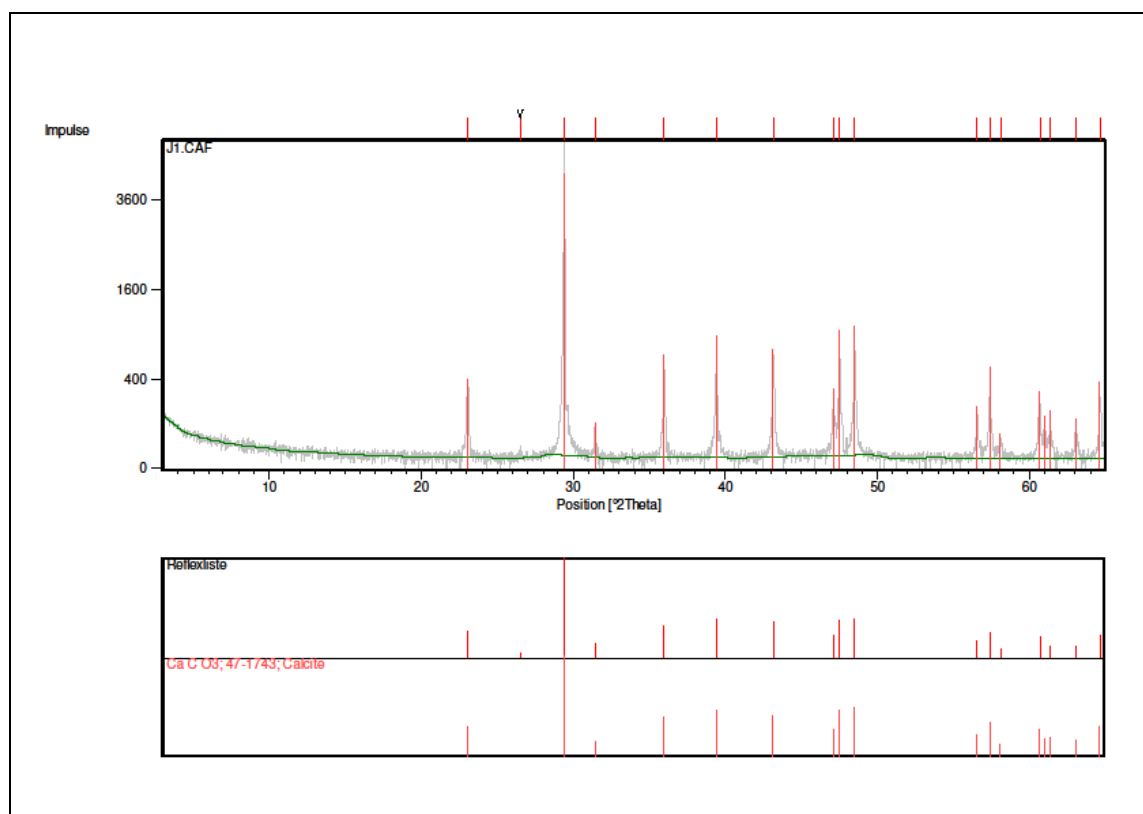


Abbildung 9.35: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J1

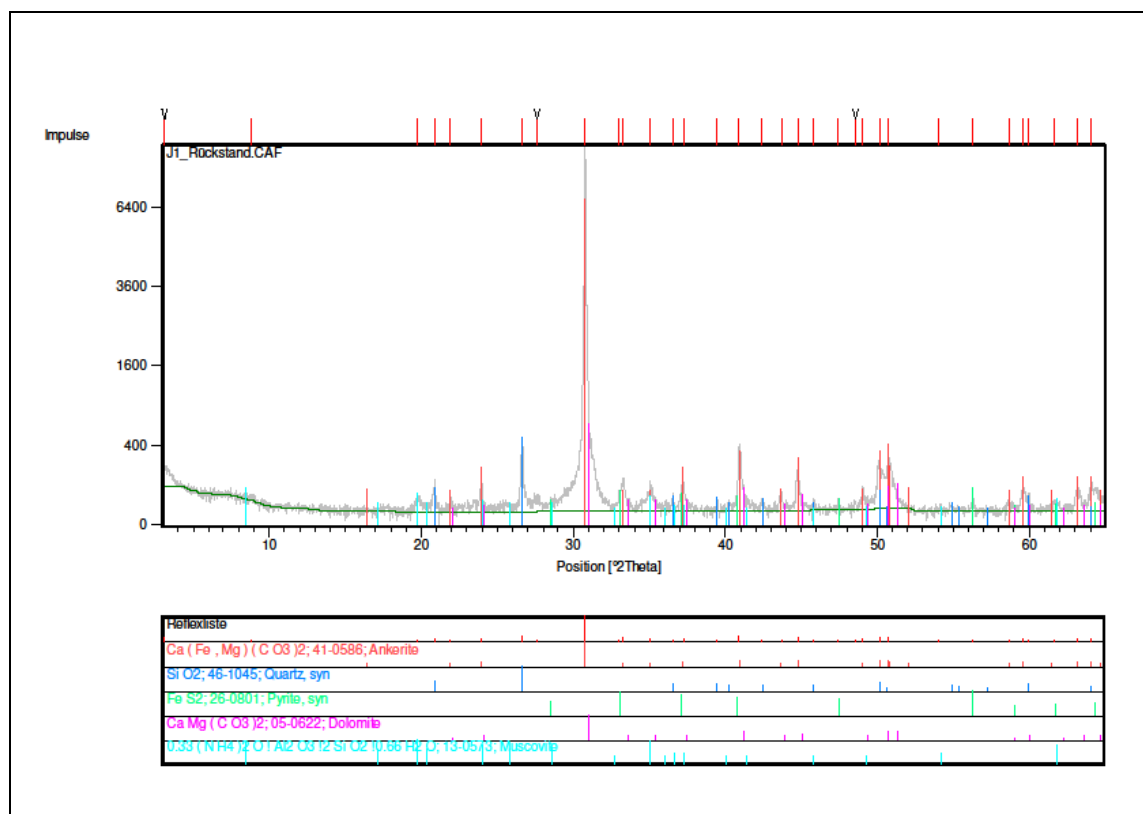


Abbildung 9.36: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J1

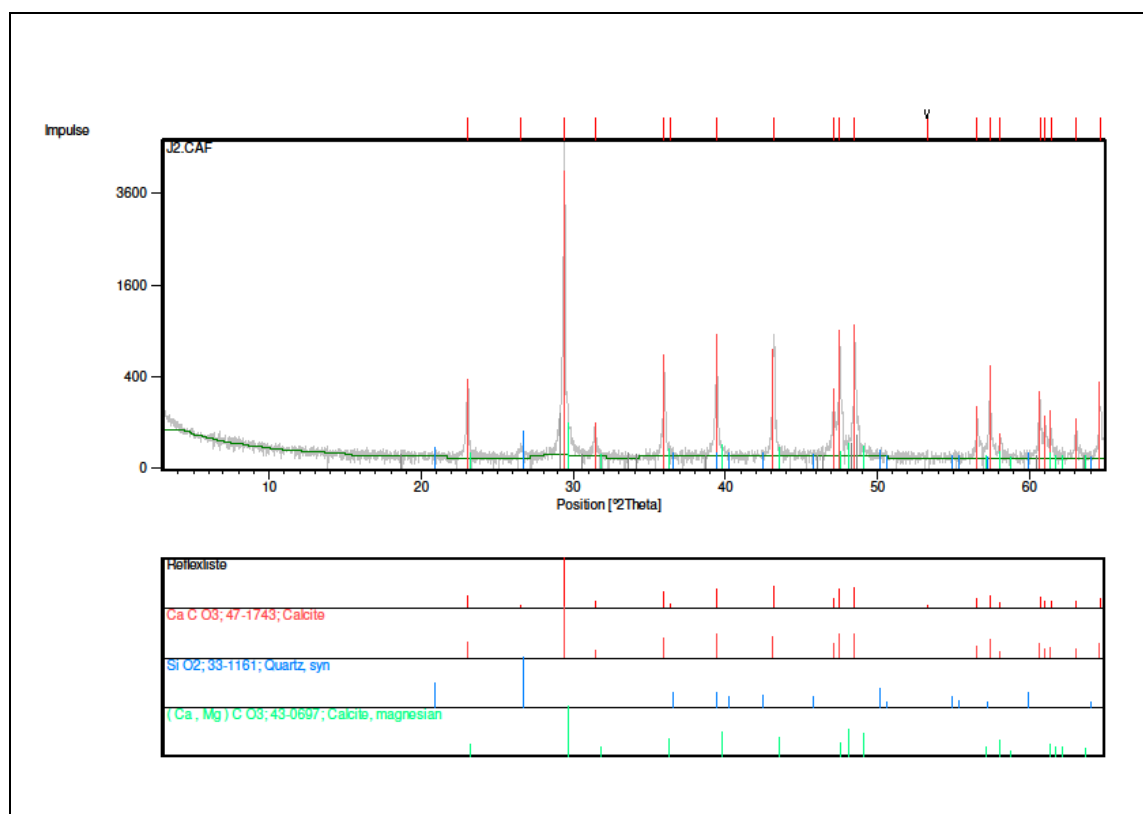


Abbildung 9.37: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J2

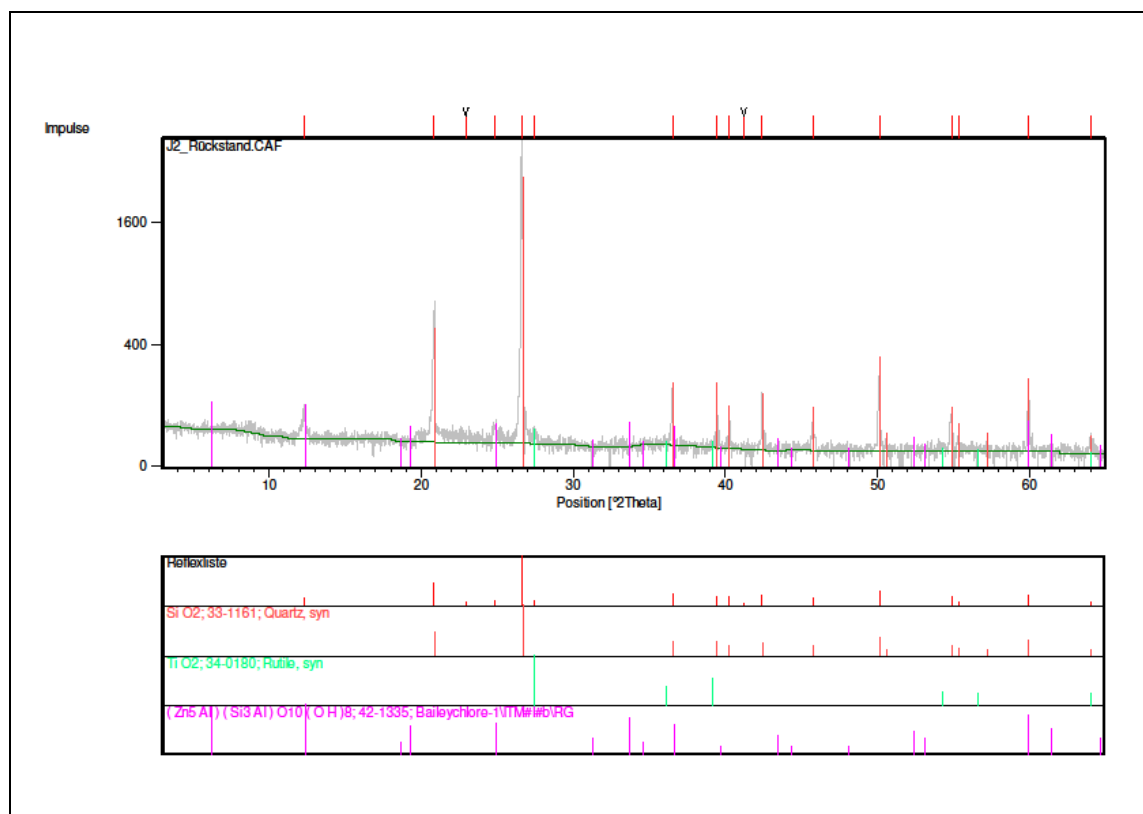


Abbildung 9.38: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J2

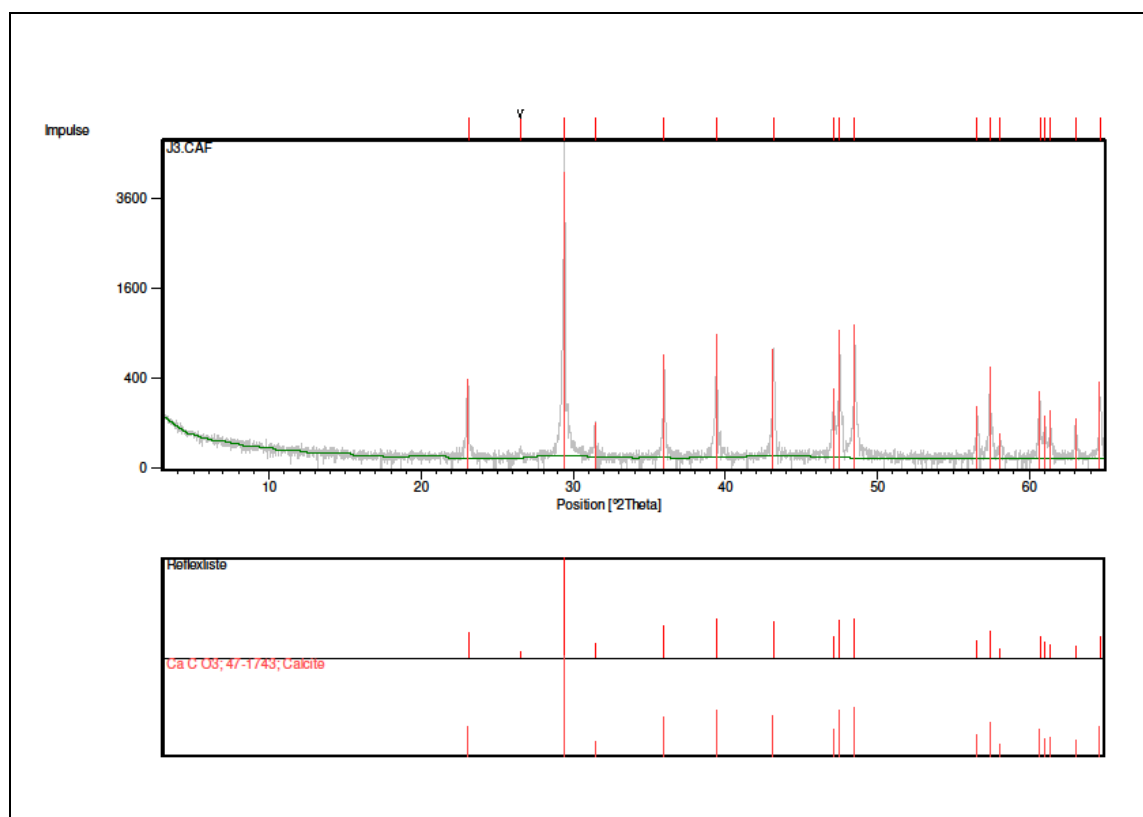


Abbildung 9.39: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J3

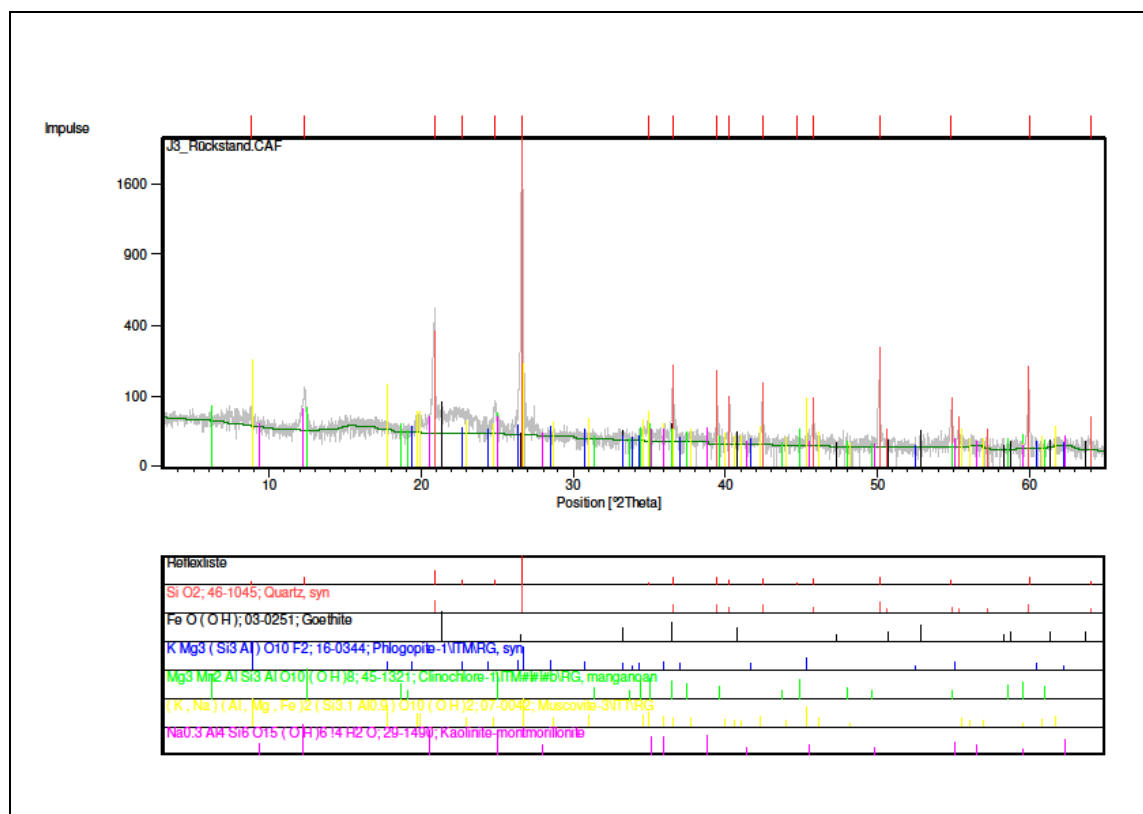


Abbildung 9.40: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J3

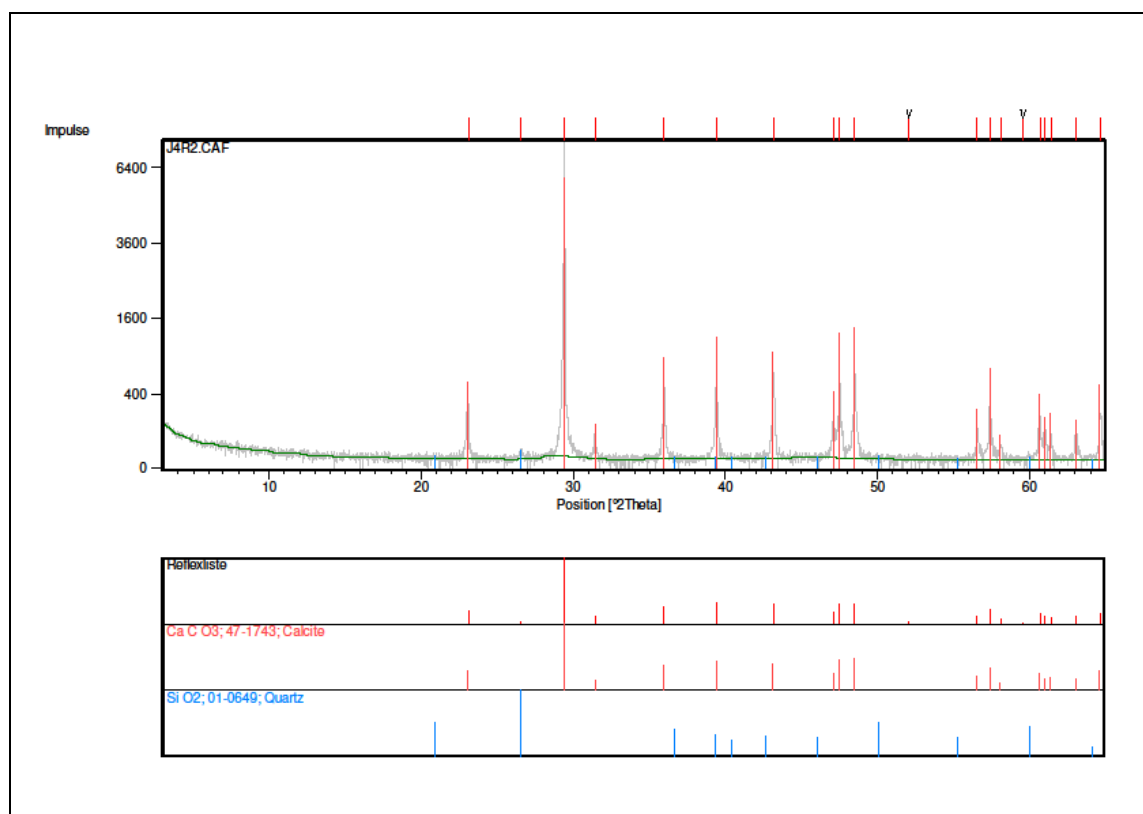


Abbildung 9.41: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J4

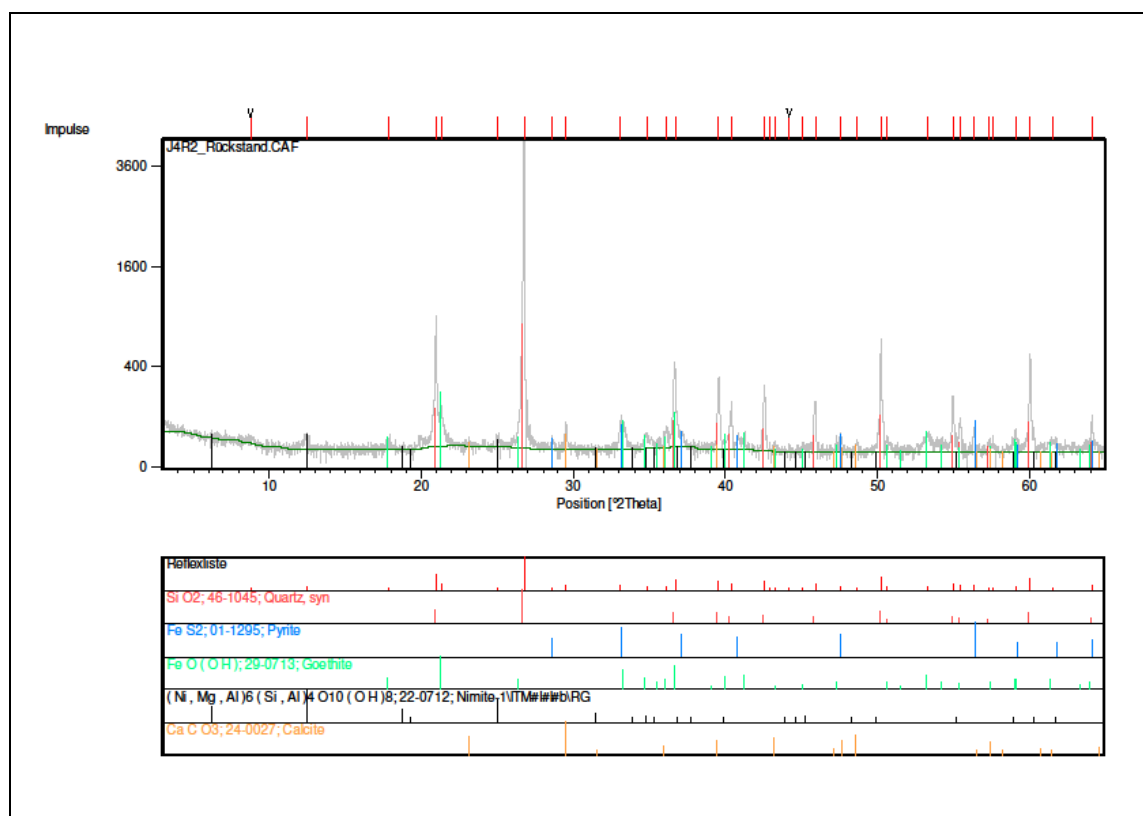


Abbildung 9.42: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J4

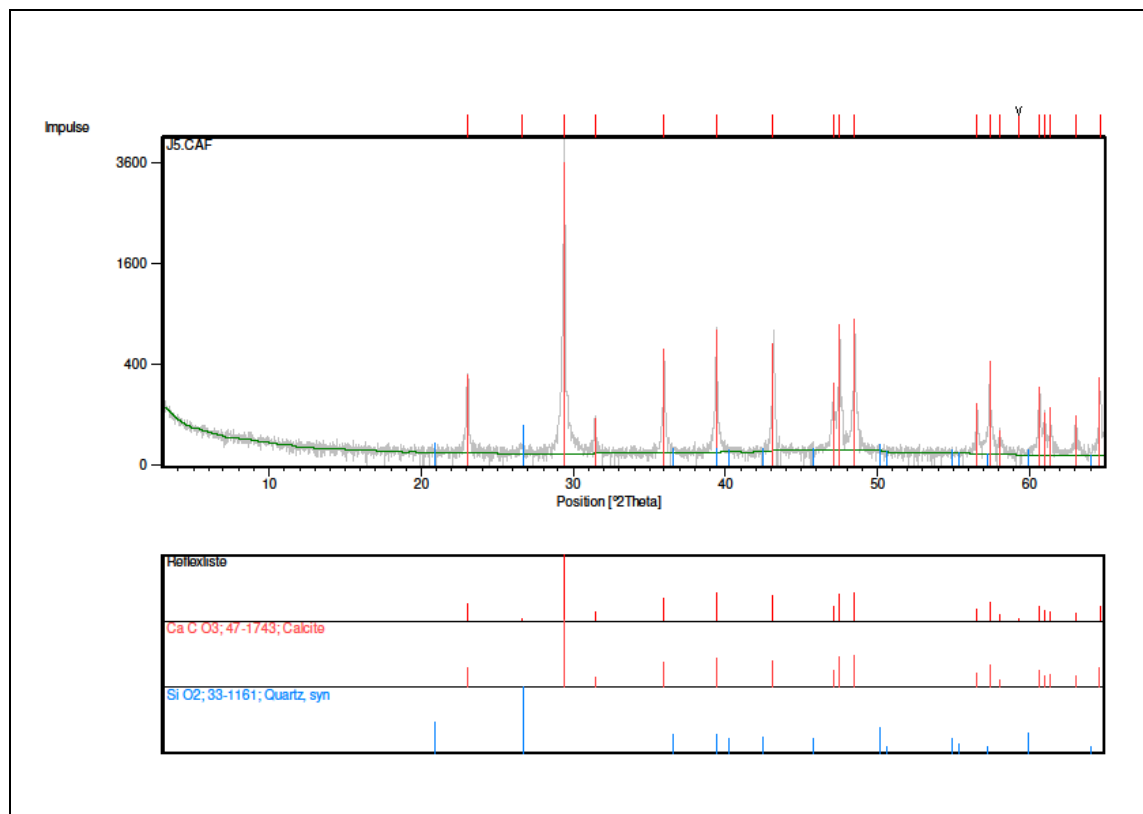


Abbildung 9.43: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J5

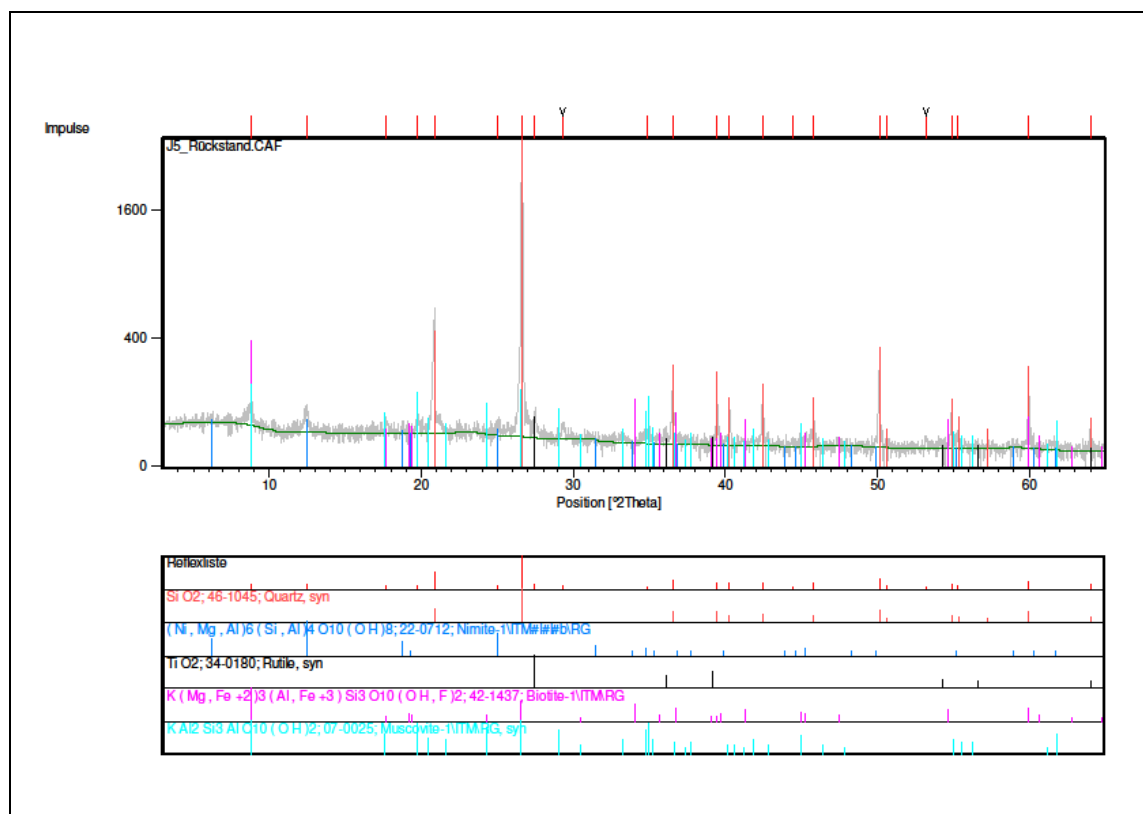


Abbildung 9.44: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J5

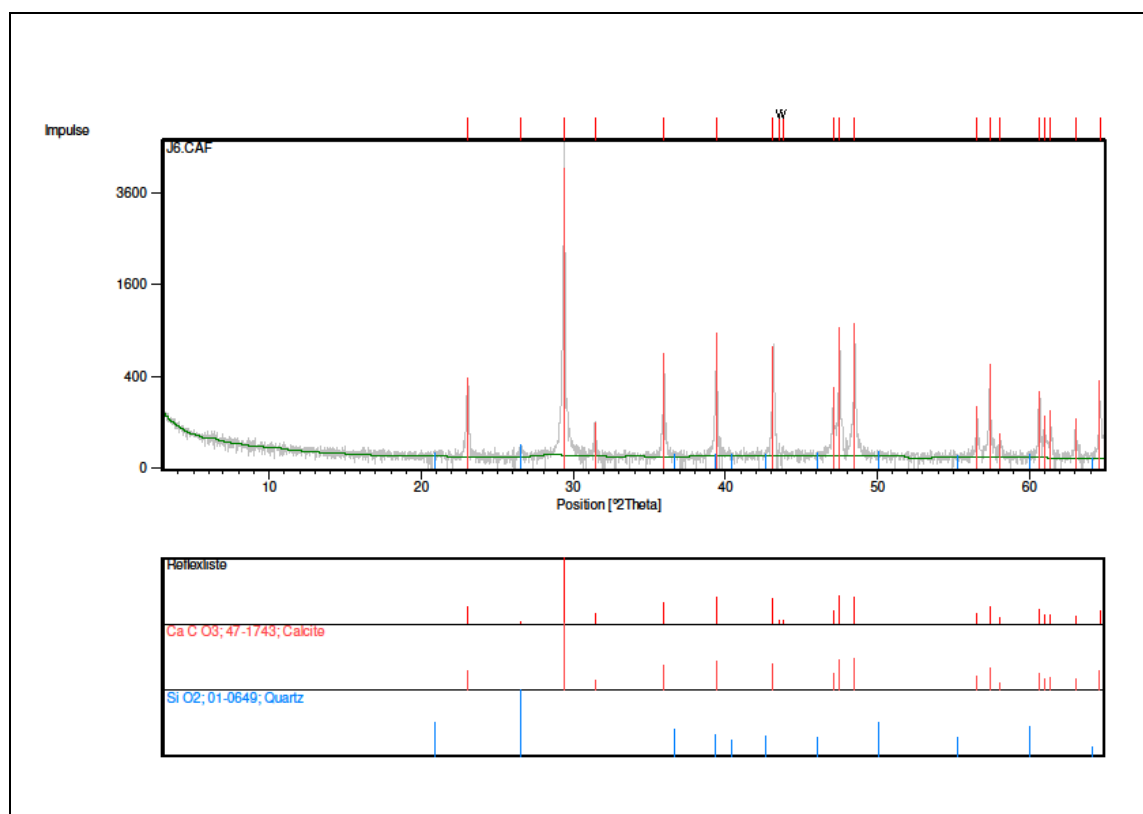


Abbildung 9.45: Röntgendiffraktogramm des Handstückes J6

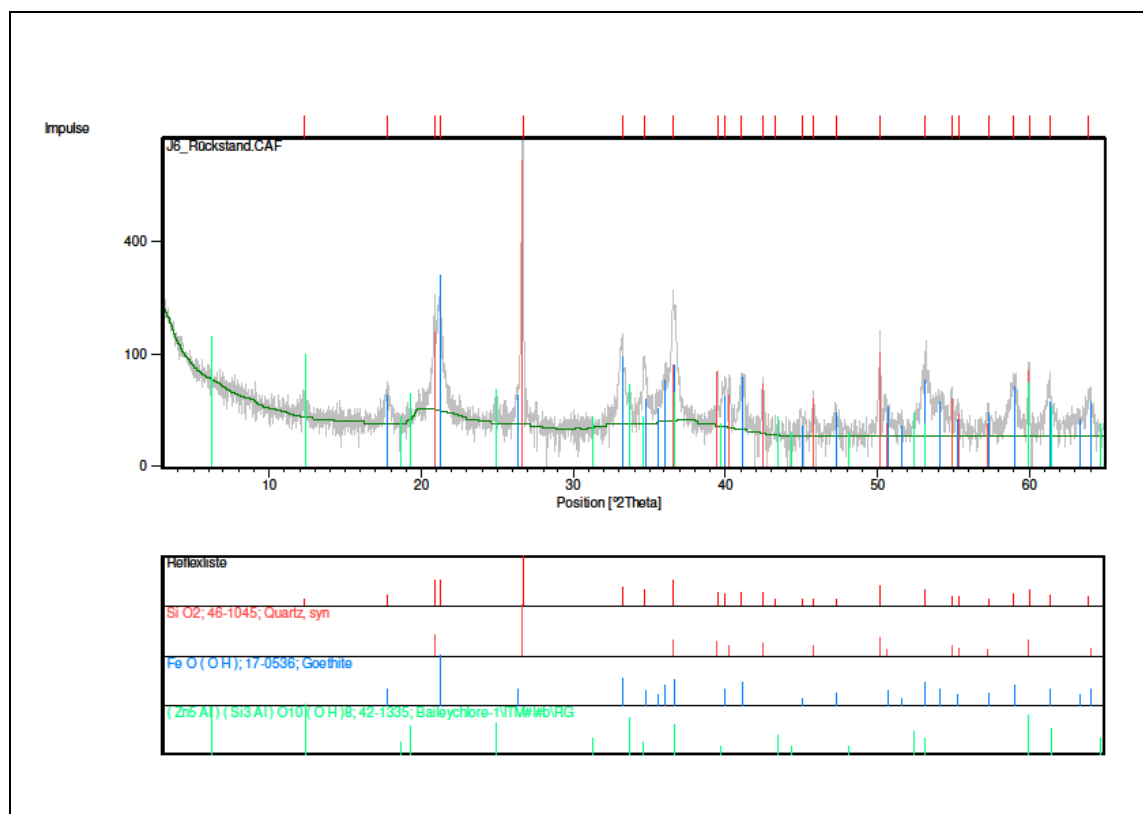


Abbildung 9.46: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes J6

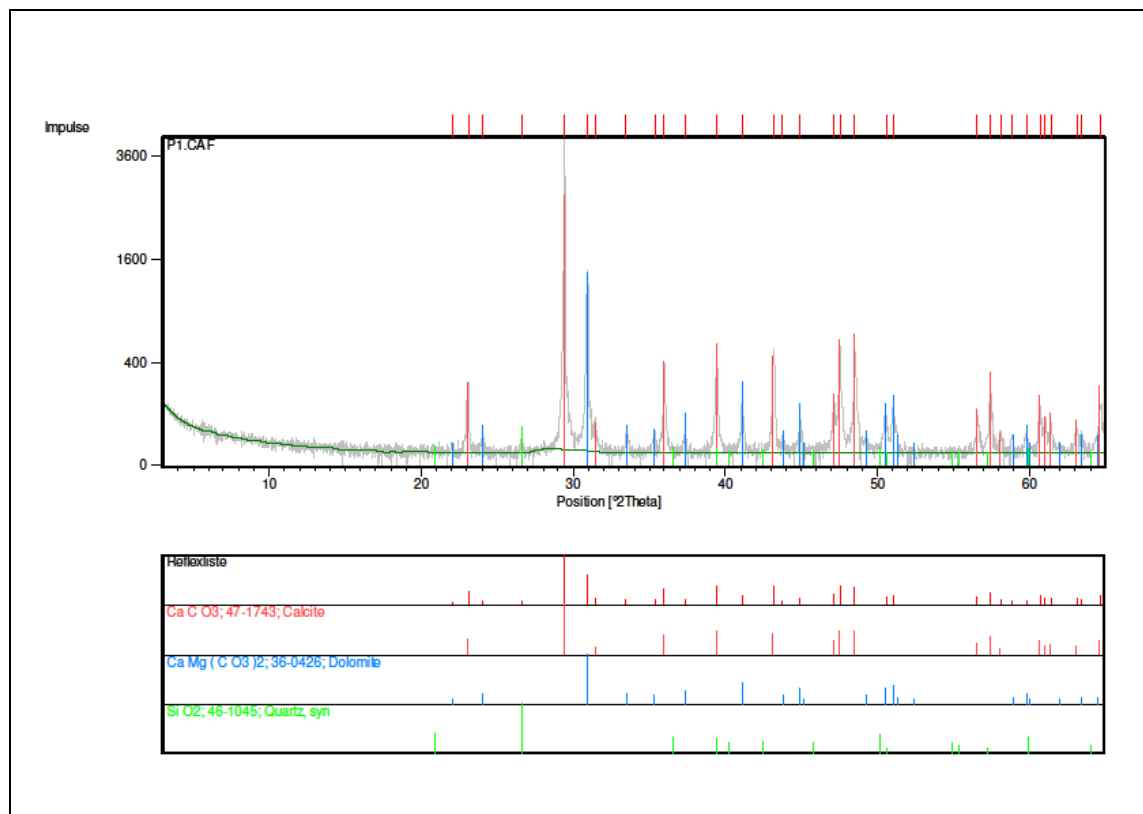


Abbildung 9.47: Röntgendiffraktogramm des Handstückes P1

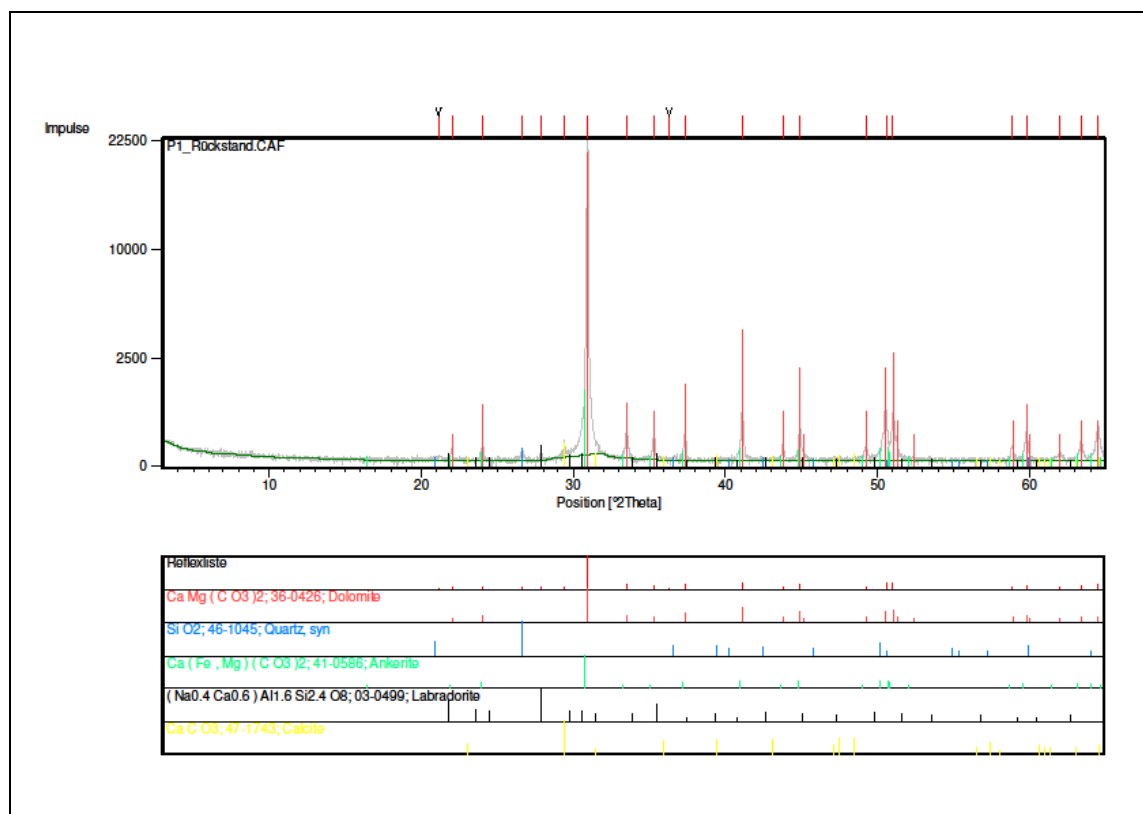


Abbildung 9.48: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes P1

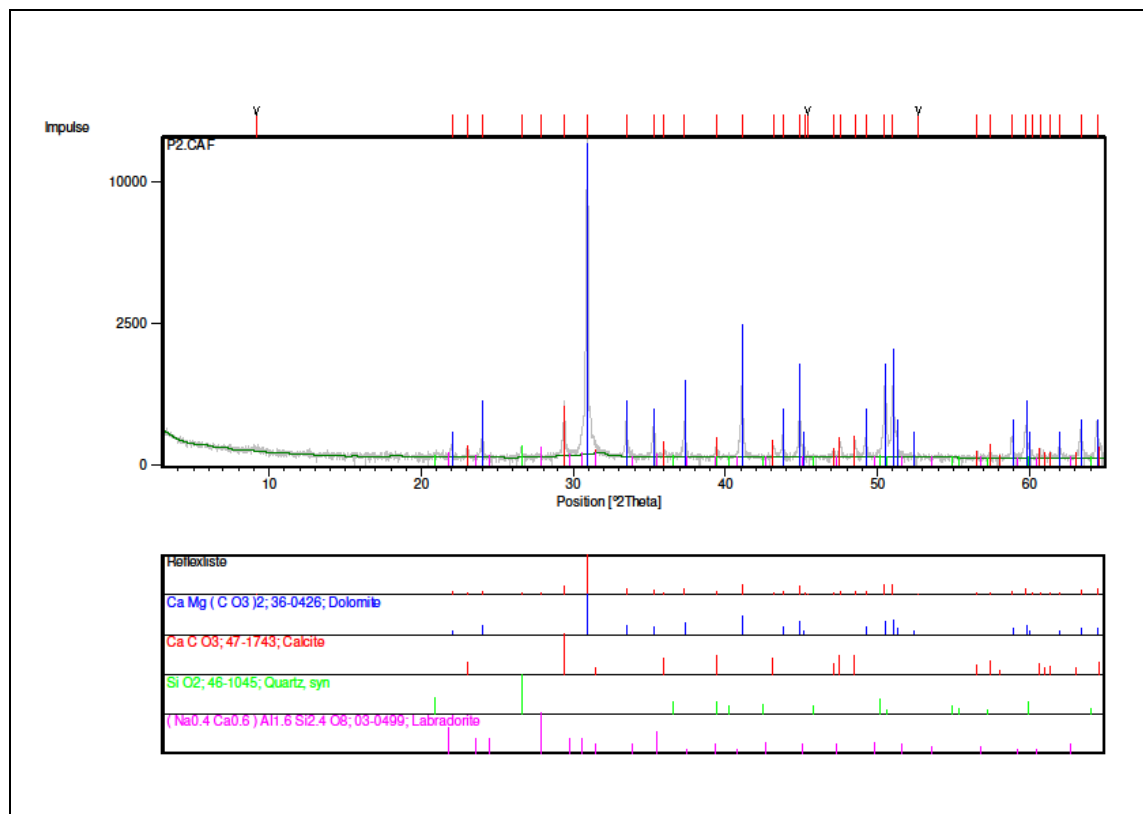


Abbildung 9.49: Röntgendiffraktogramm des Handstückes P2

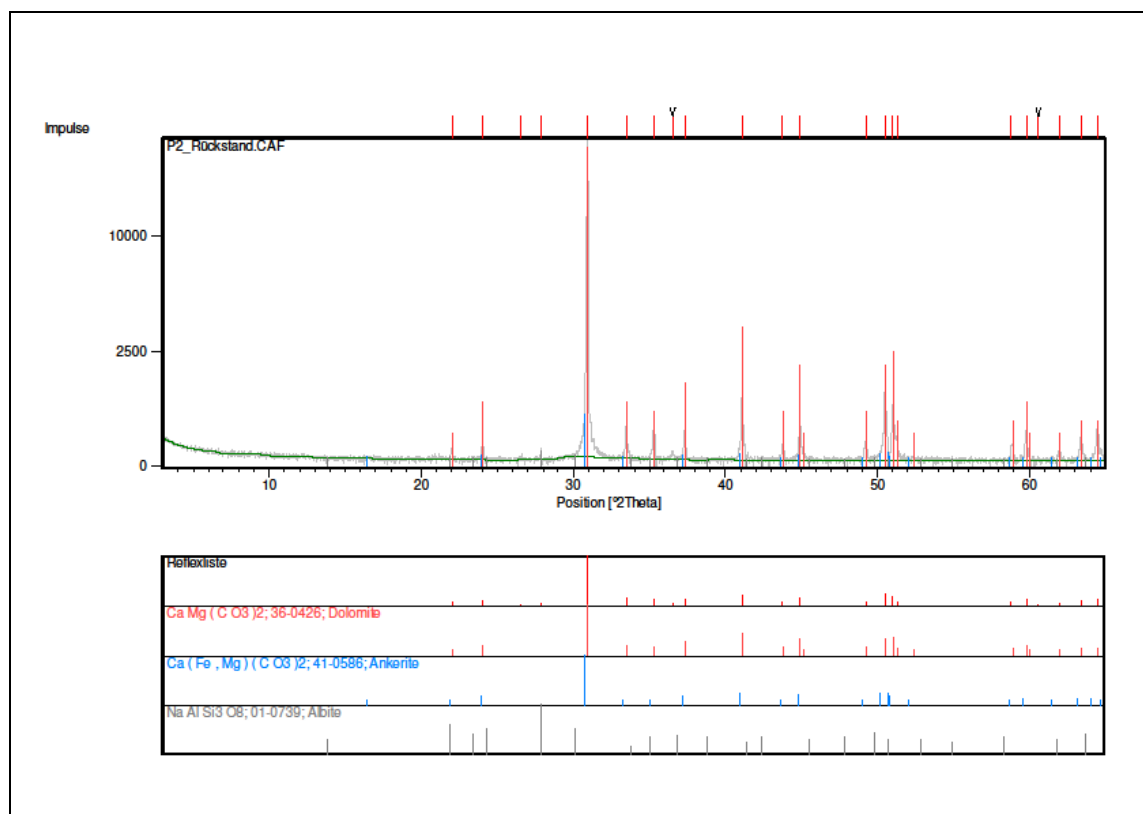


Abbildung 9.50: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes P2

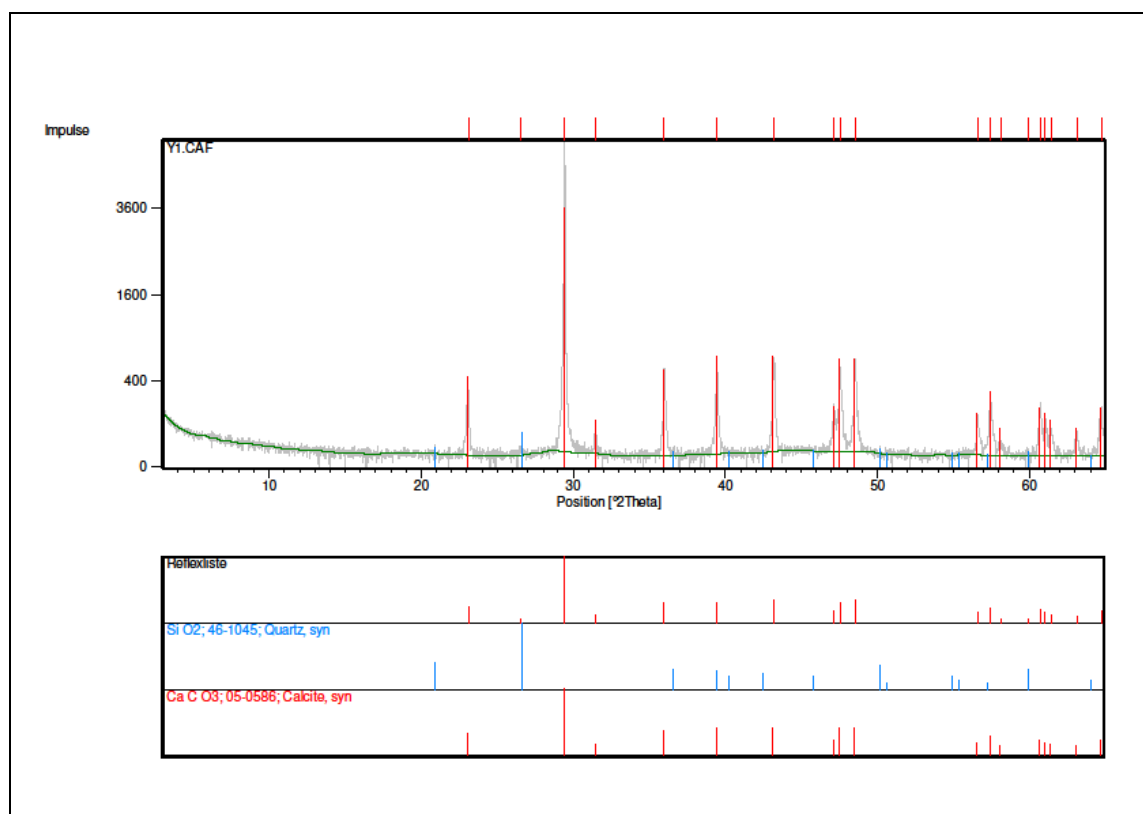


Abbildung 9.51: Röntgendiffraktogramm des Handstückes Y1

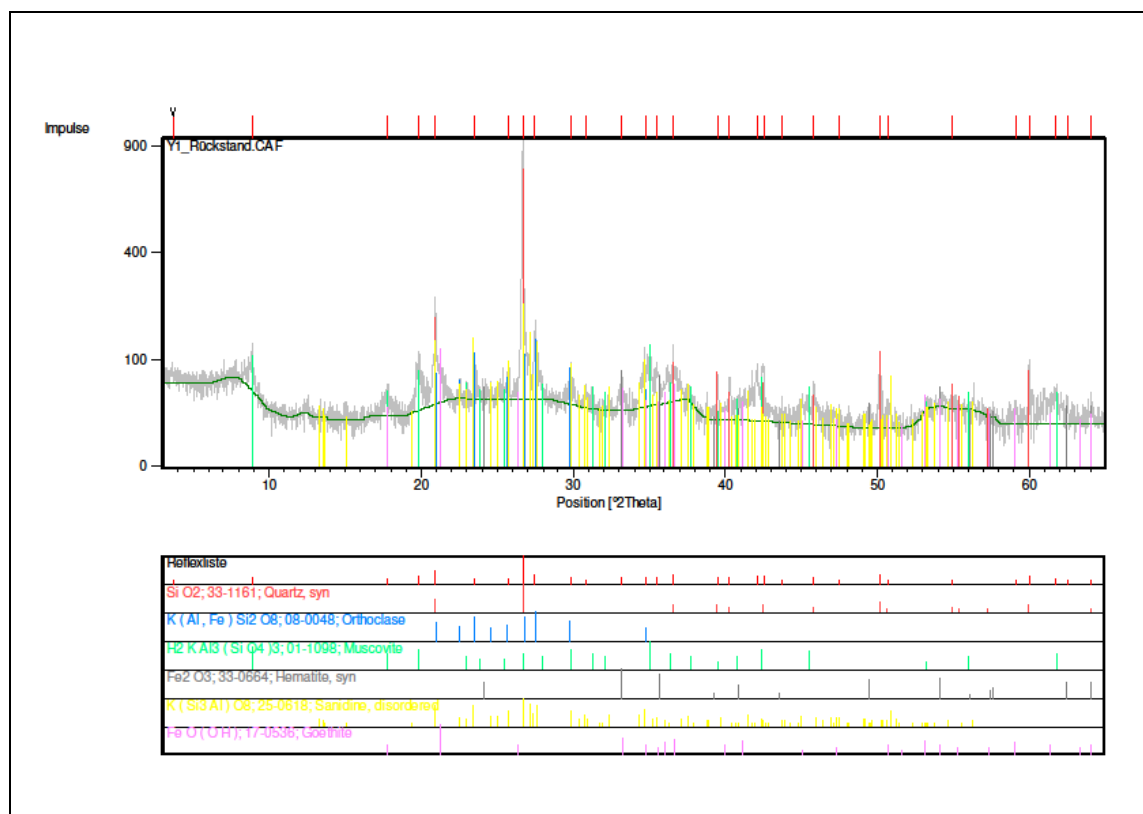


Abbildung 9.52: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes Y1

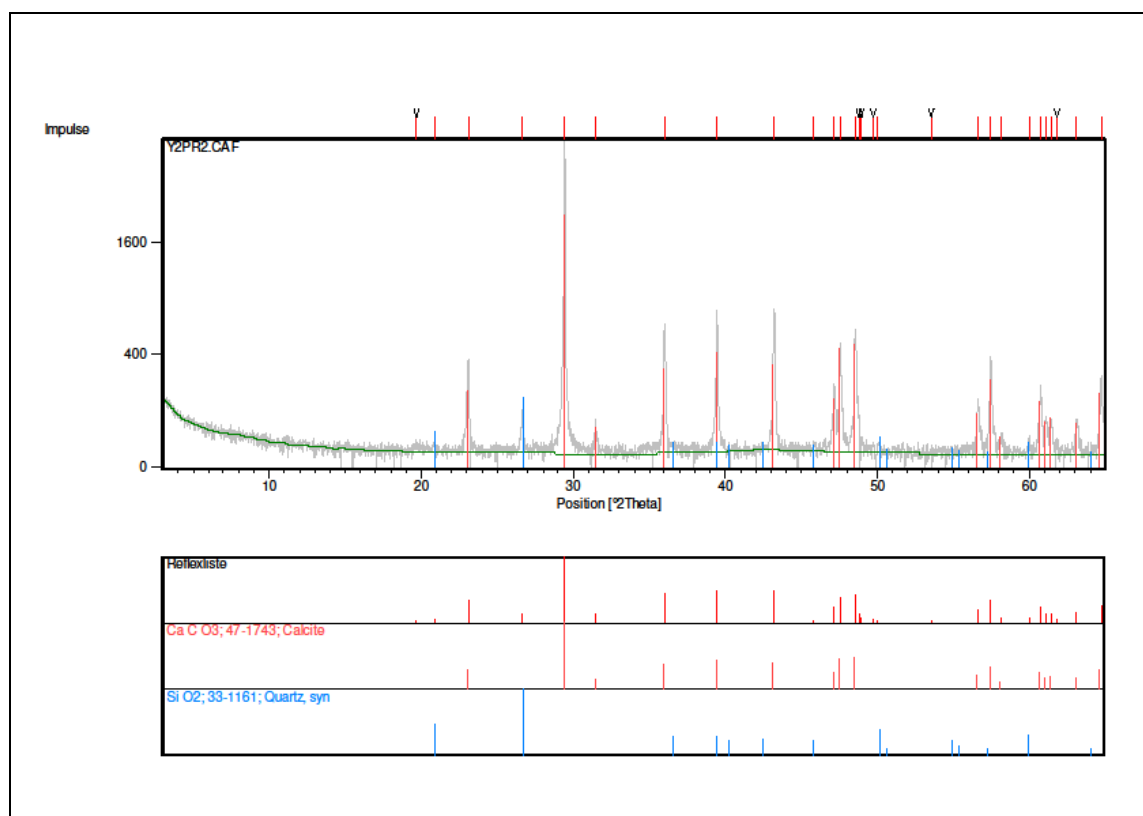


Abbildung 9.53: Röntgendiffraktogramm des Handstückes Y2

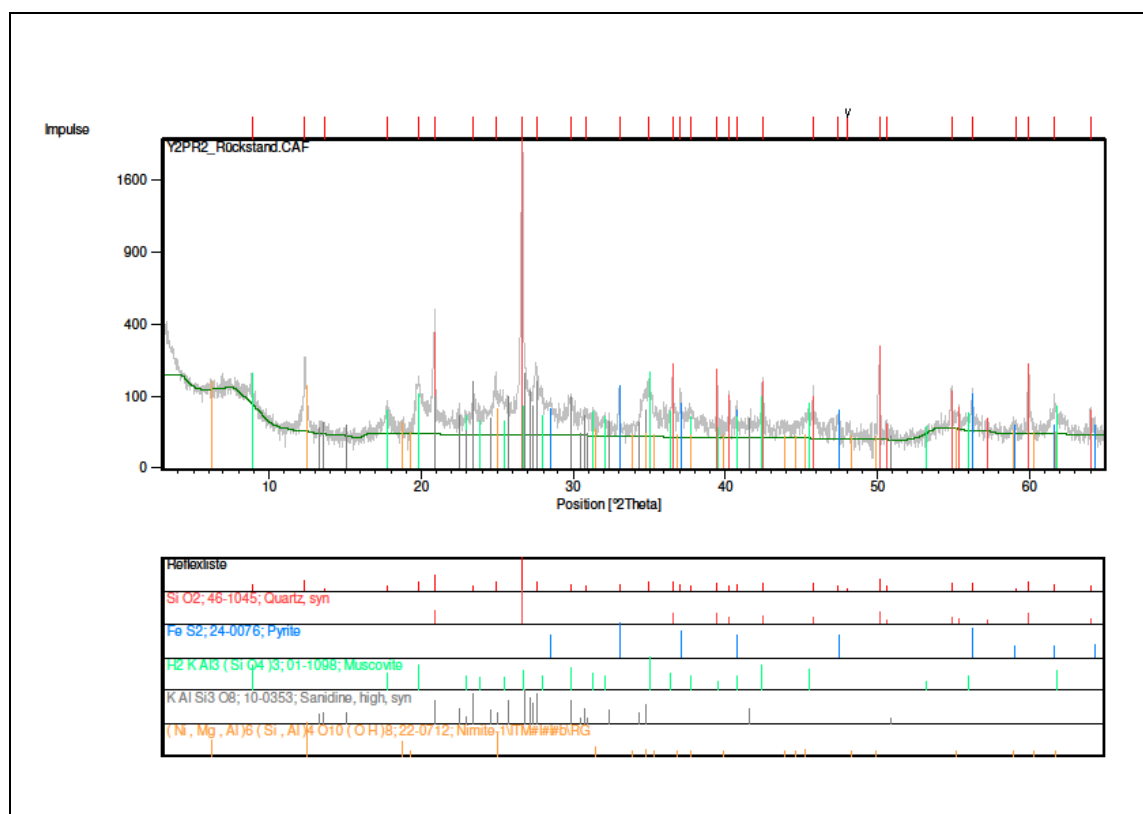


Abbildung 9.54: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes Y2

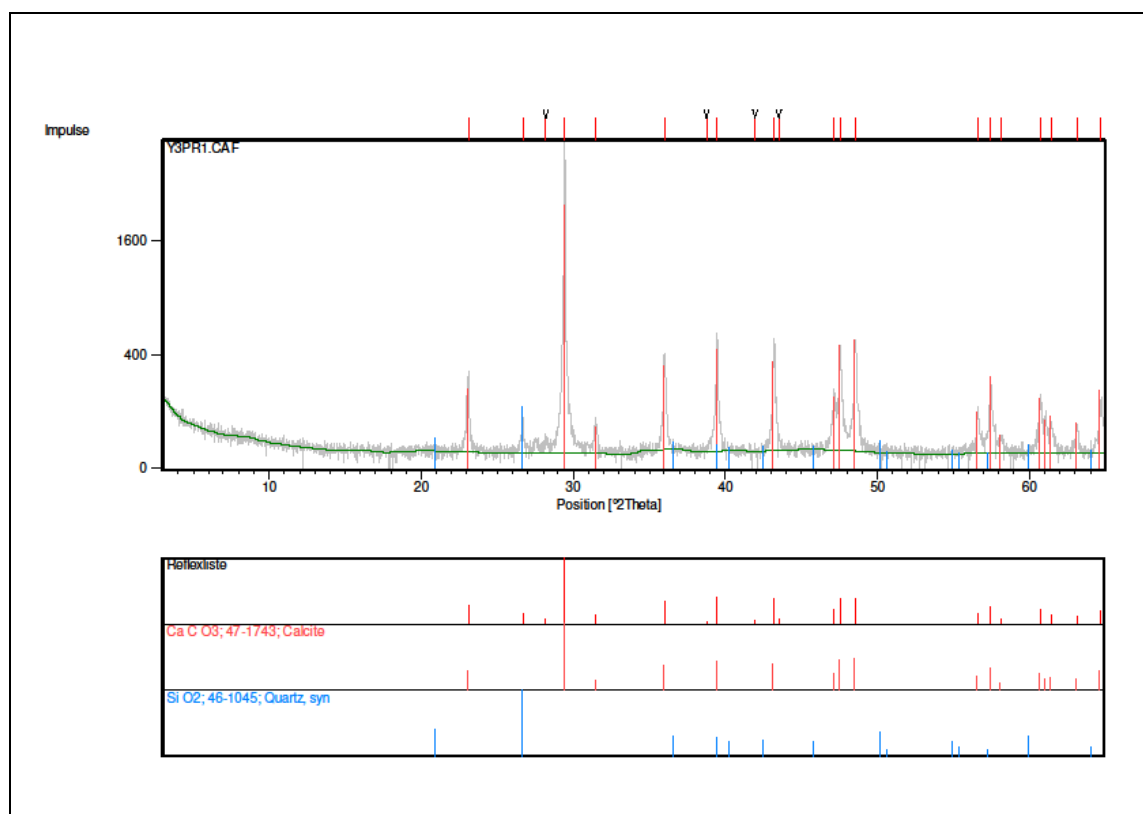


Abbildung 9.55: Röntgendiffraktogramm des Handstückes Y3

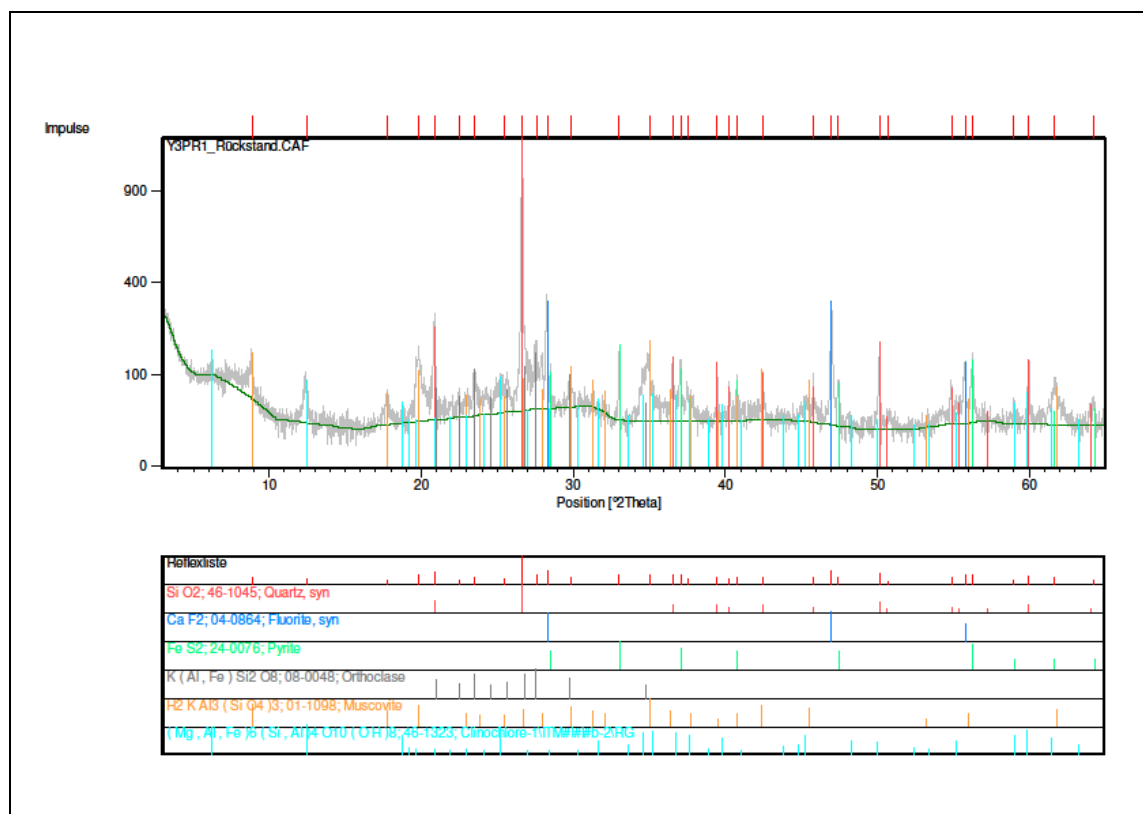


Abbildung 9.56: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes Y3

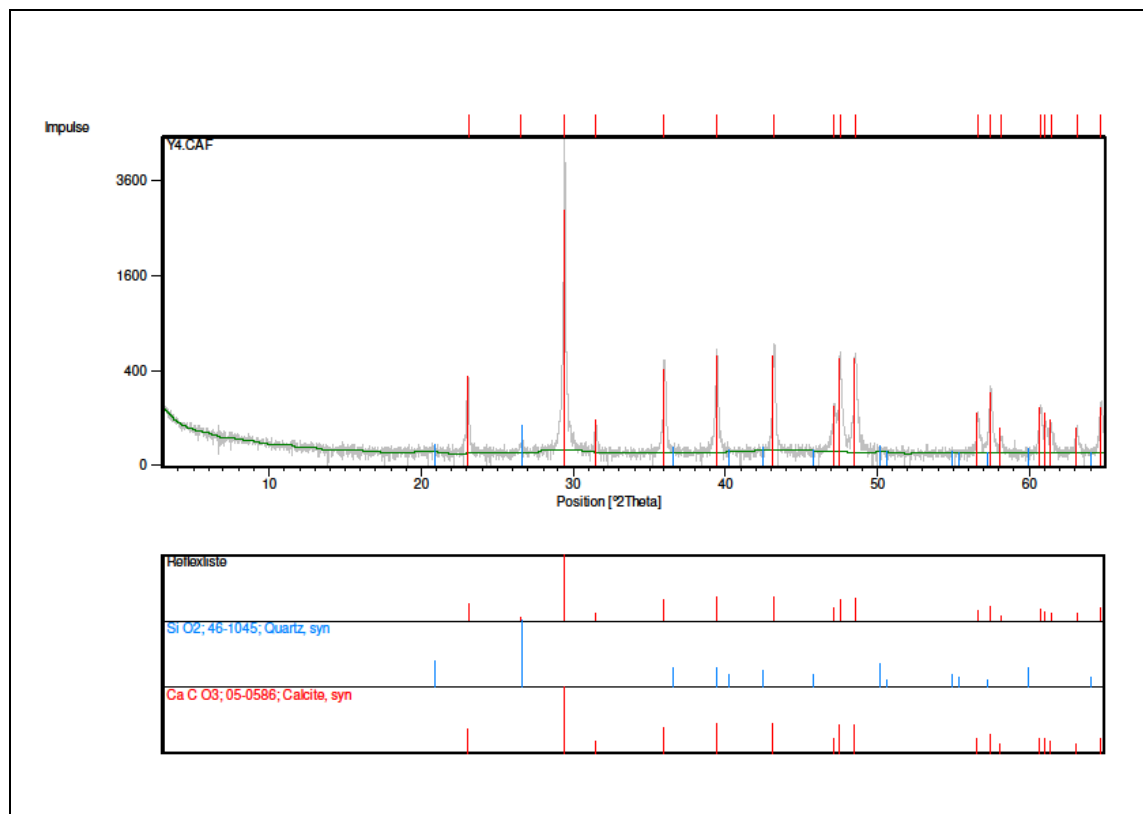


Abbildung 9.57: Röntgendiffraktogramm des Handstückes Y4

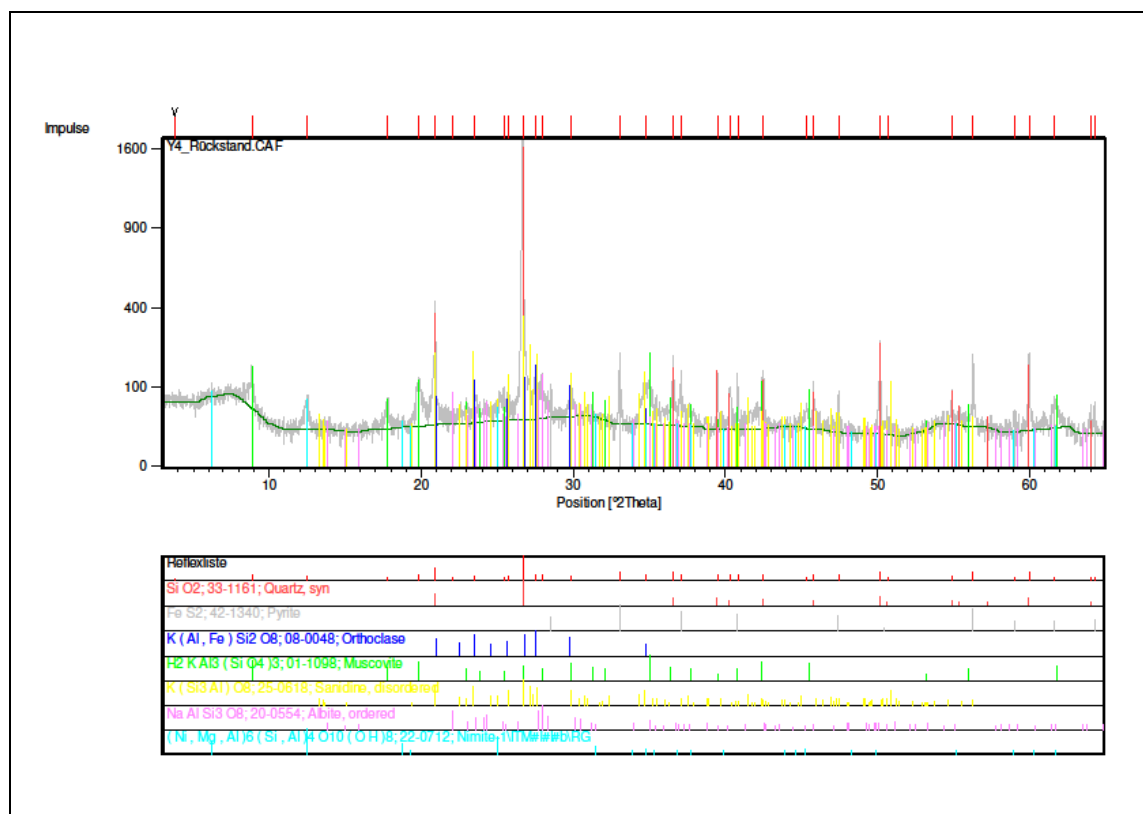
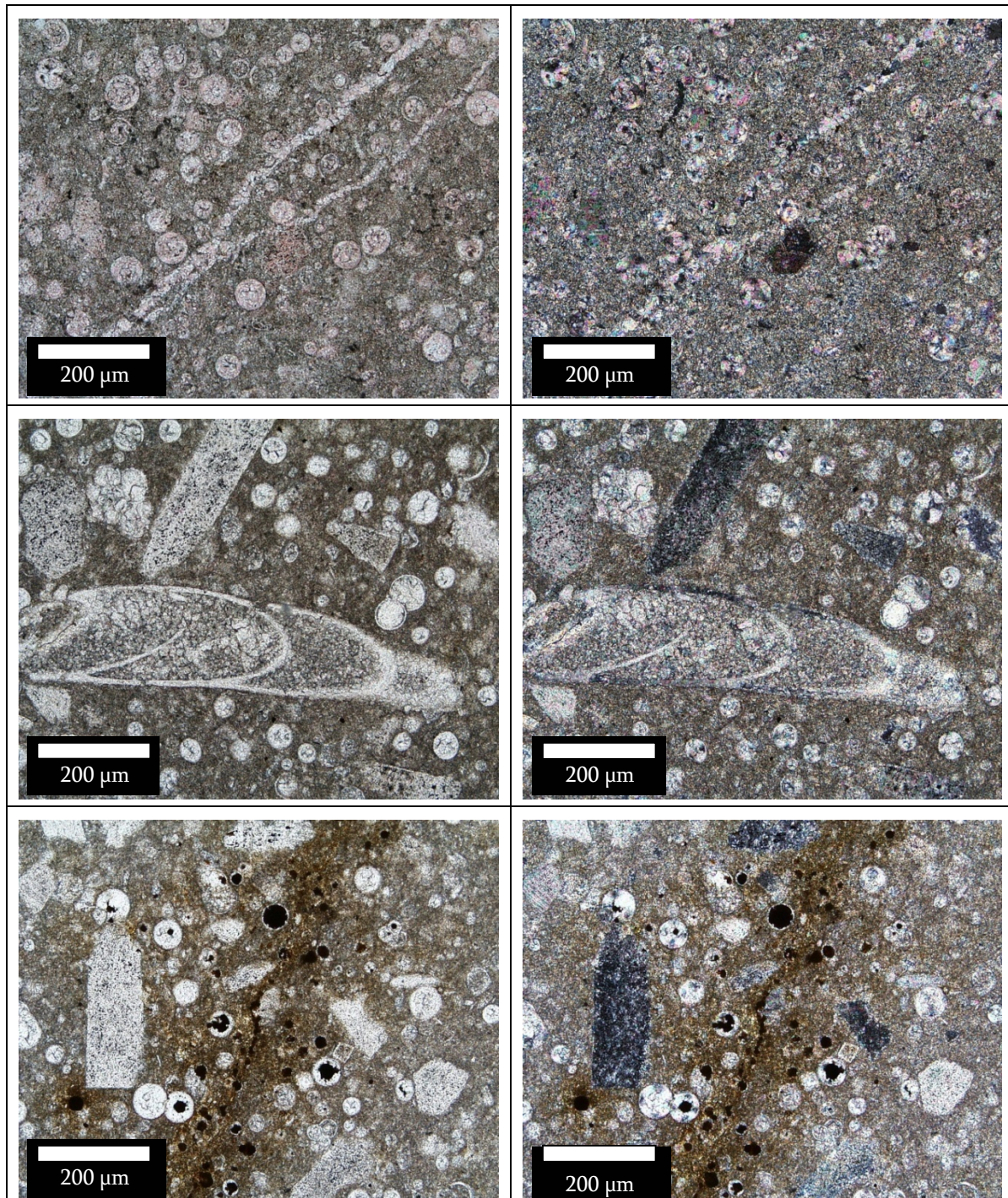


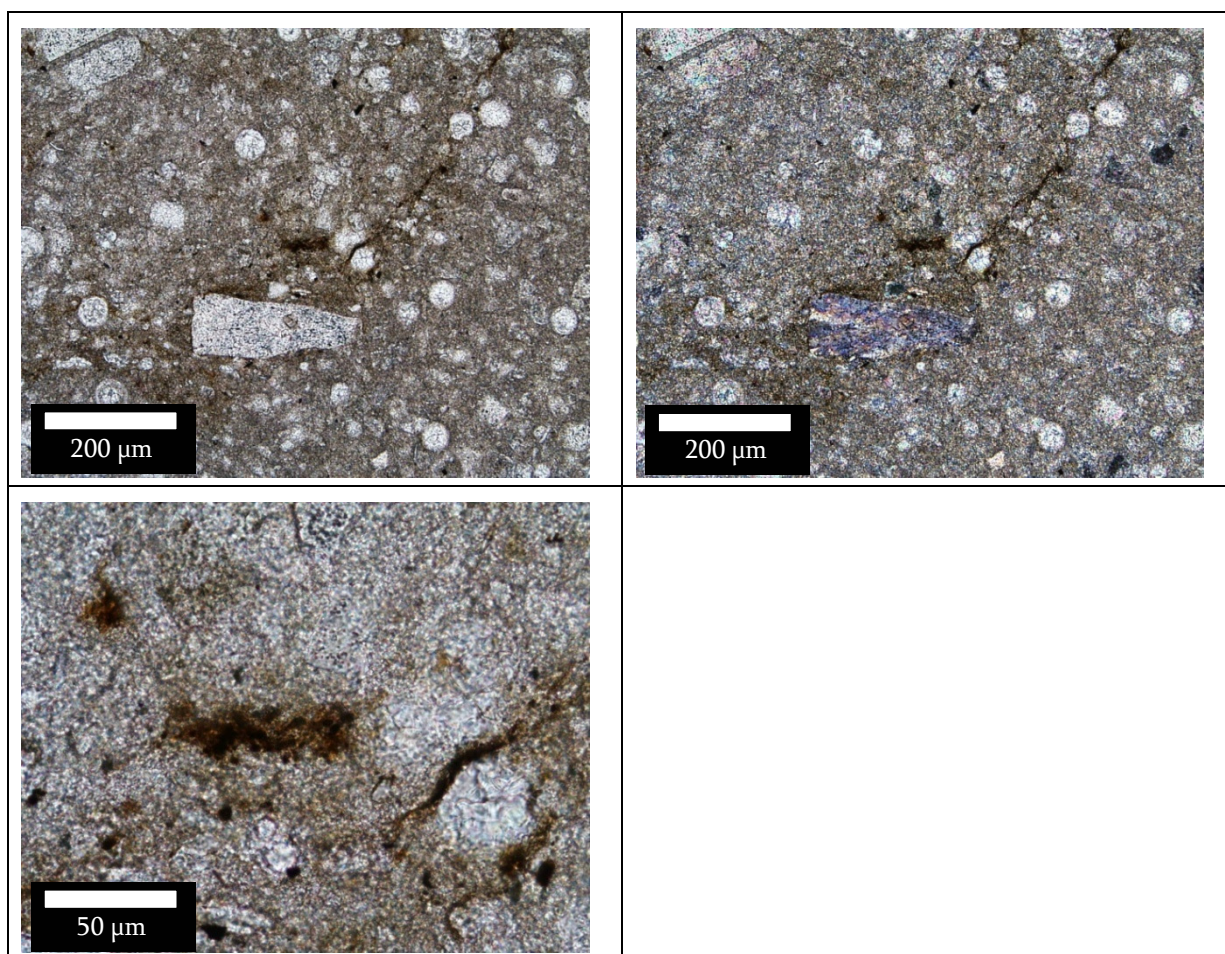
Abbildung 9.58: Röntgendiffraktogramm des Rückstands des Handstückes Y4

### 9.3 Dünnschliffabbildungen

#### Handstücke der Lagerstätte A

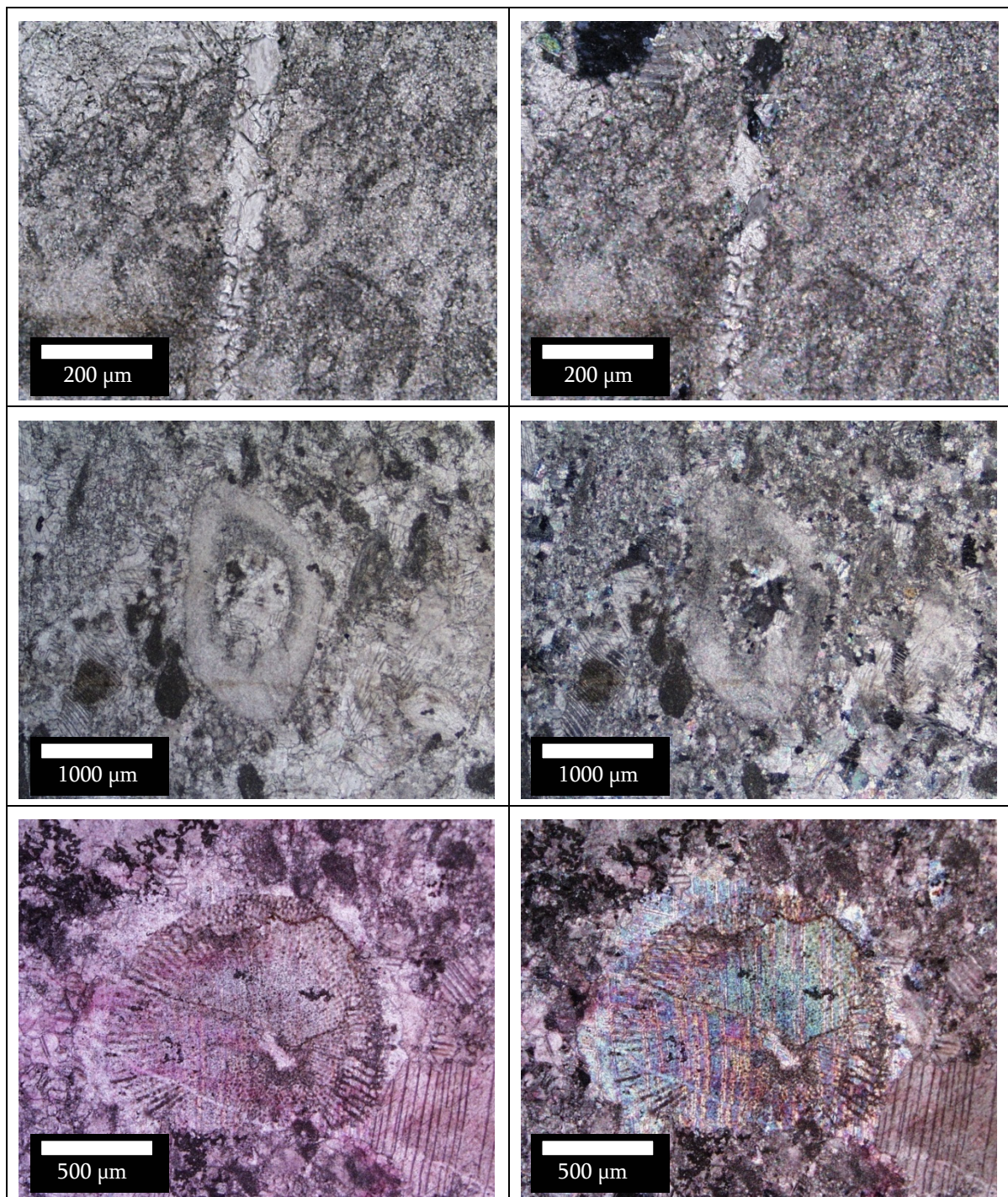
*Tabelle 9.9: Dünnschliffbilder des Handstückes A1*

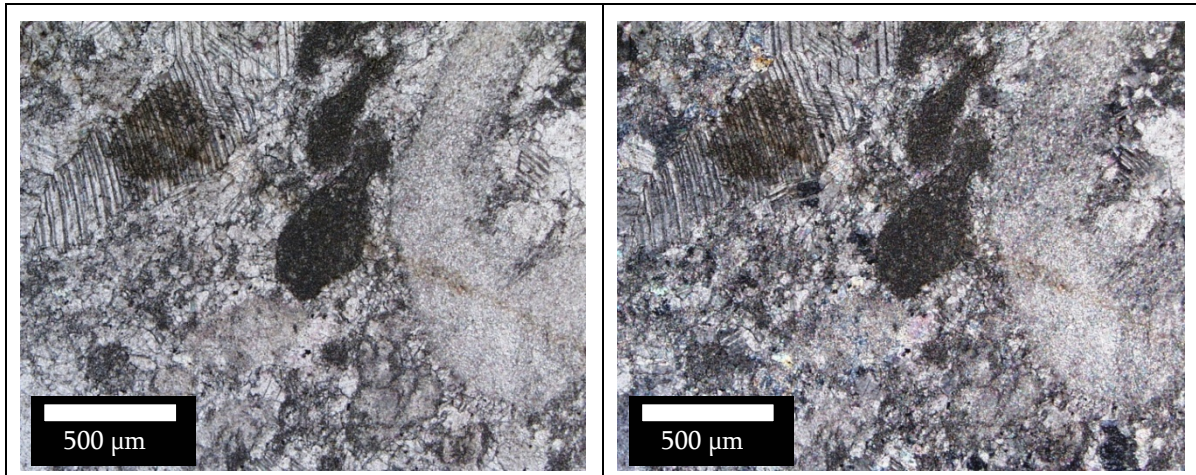


*Tabelle 9.10: Dünnschliffbilder des Handstückes A2*

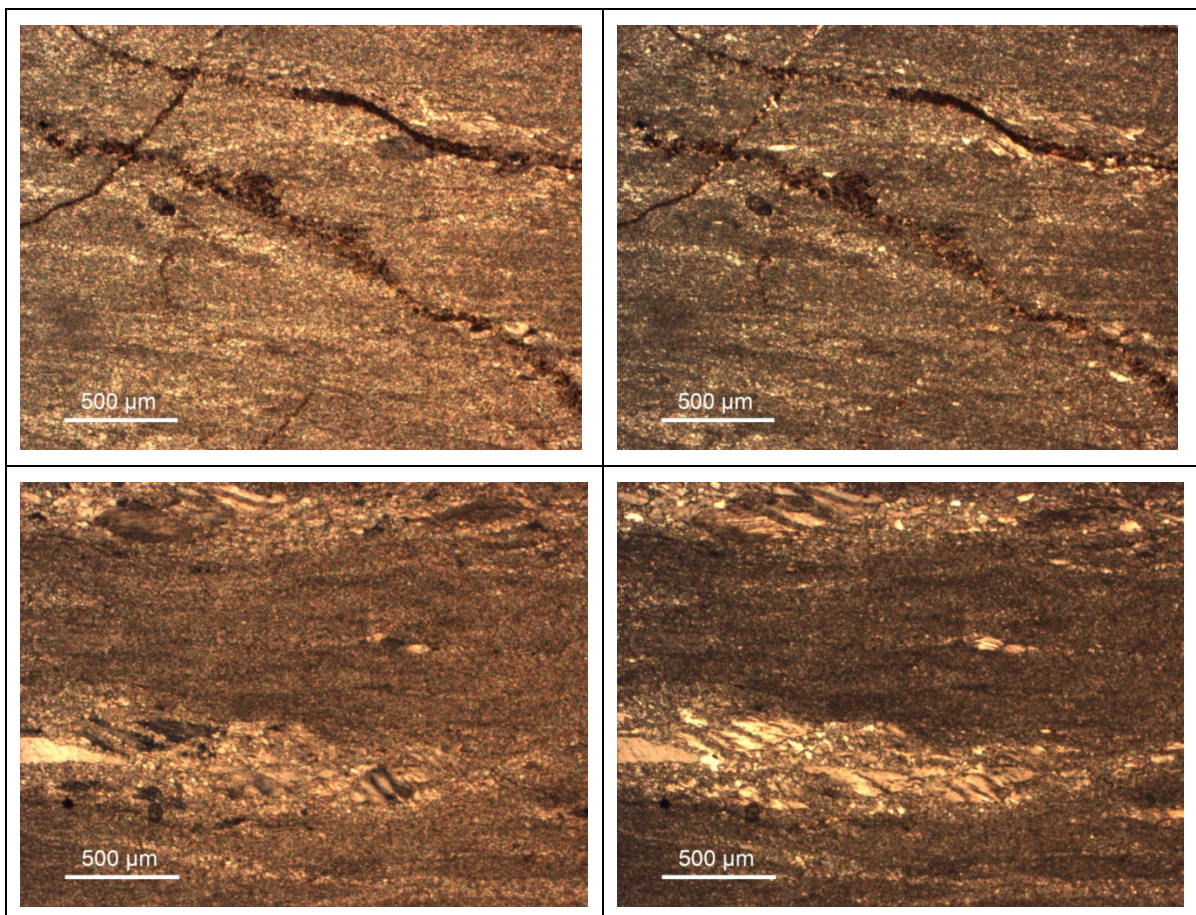
## Handstücke der Lagerstätte B

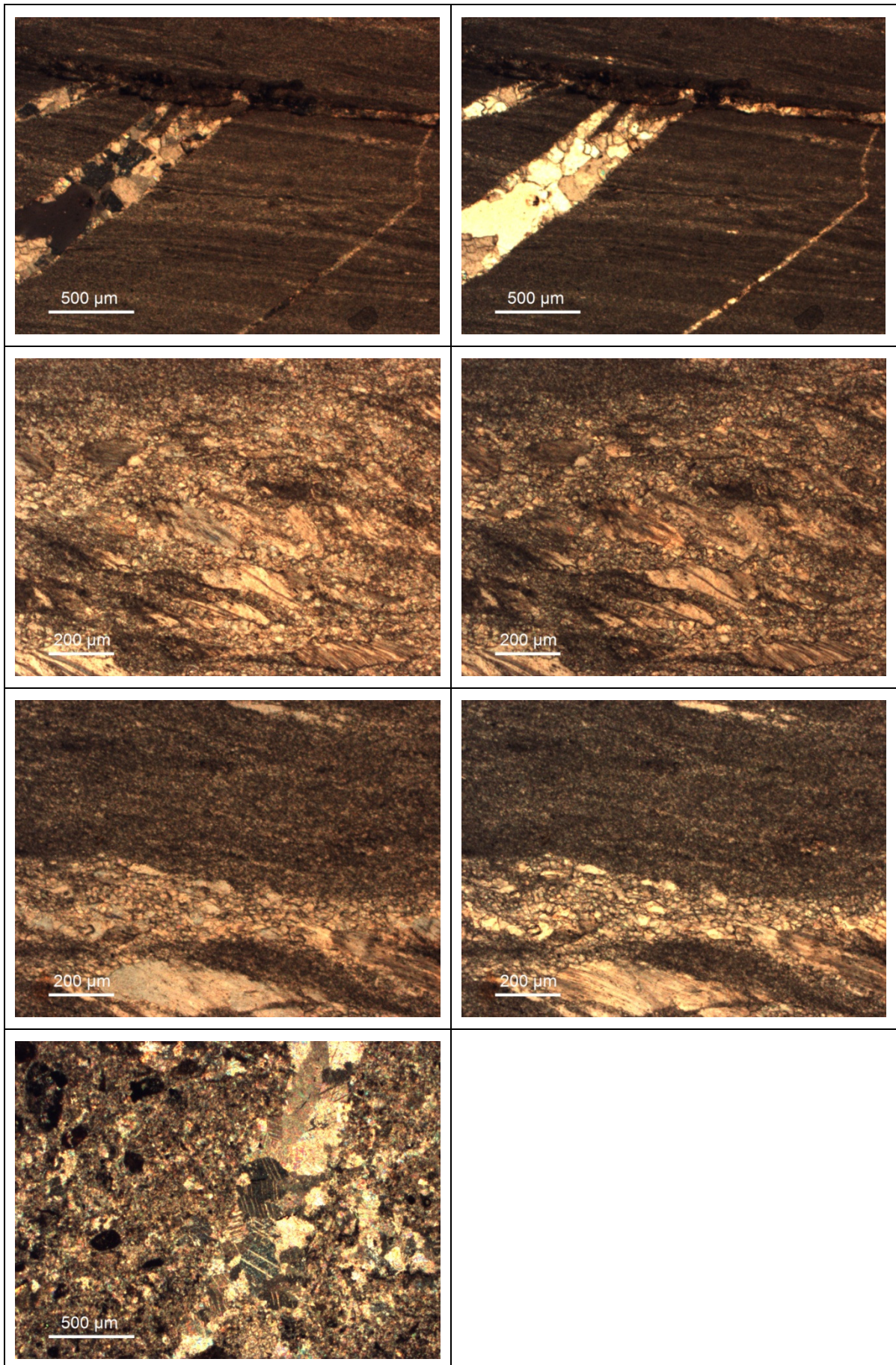
Tabelle 9.11: Dünnschliffabbildungen der Handstücke B1

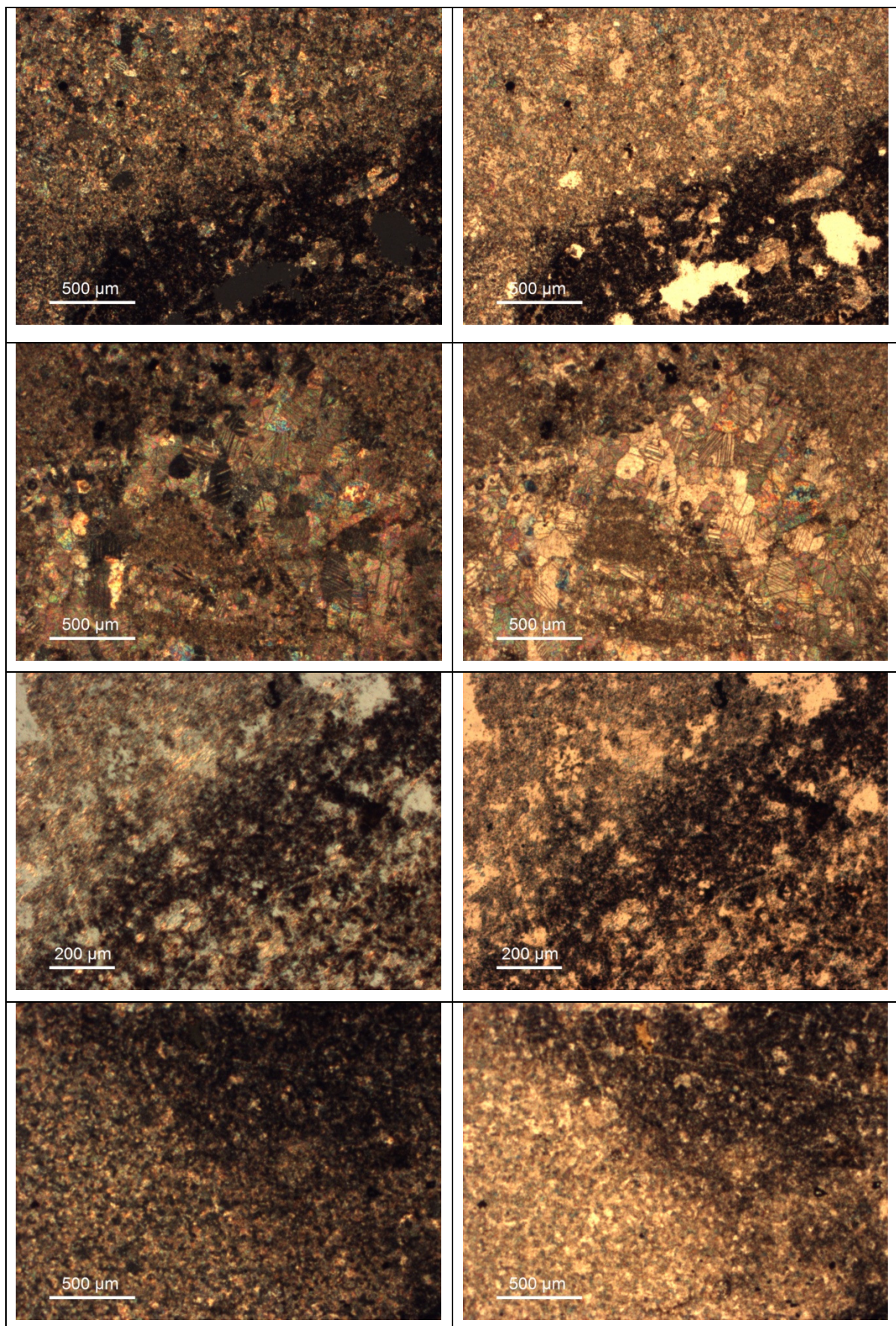


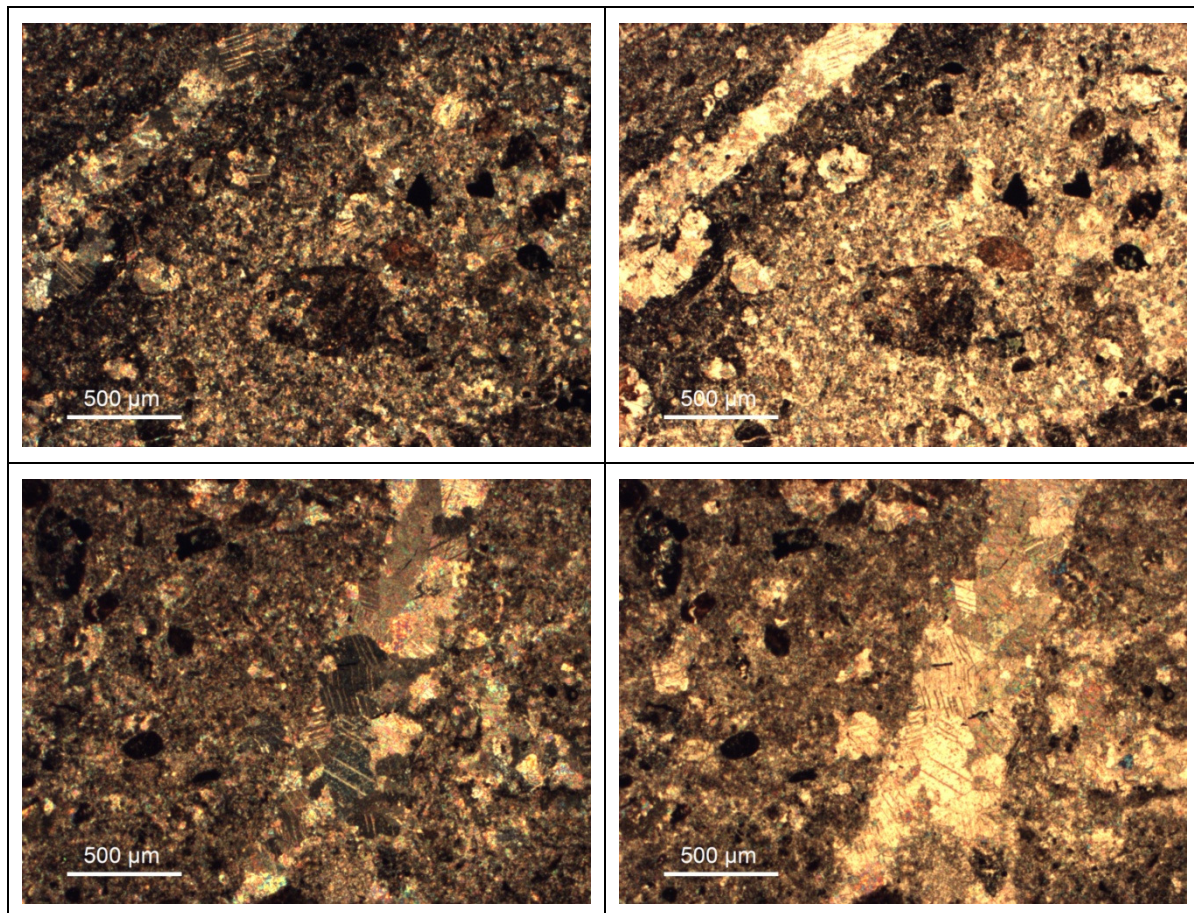
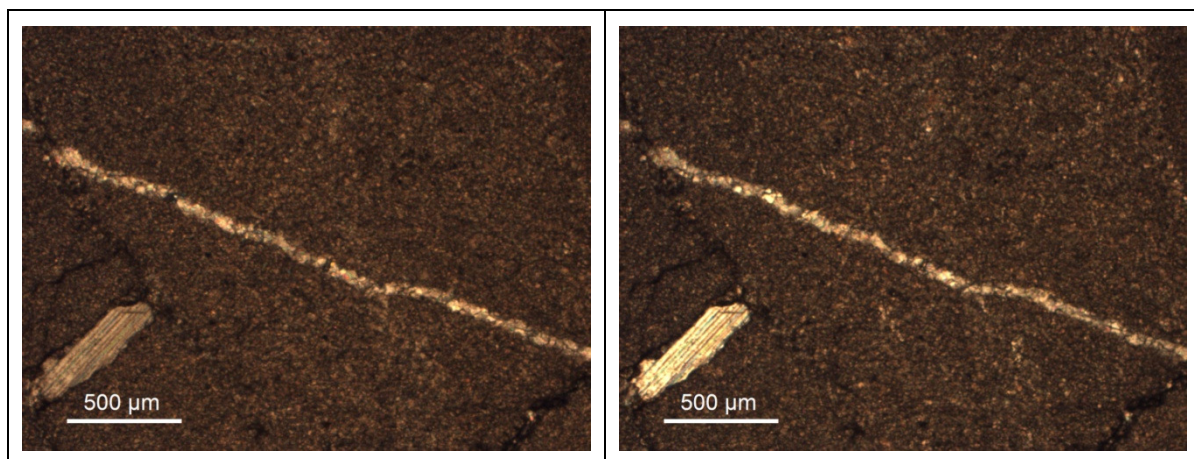


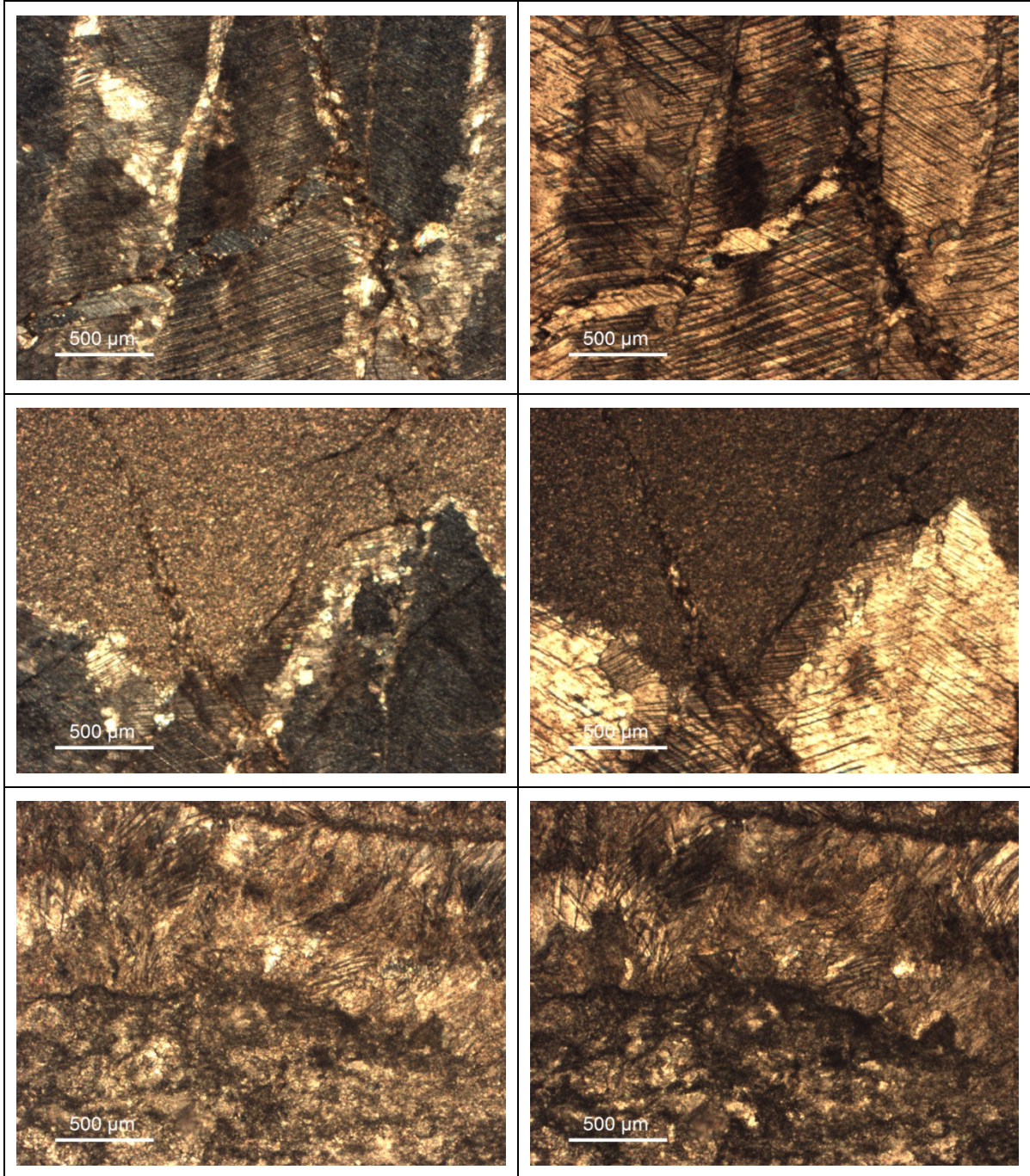
*Tabelle 9.12: Dünnschliffabbildungen der Handstücke B2*

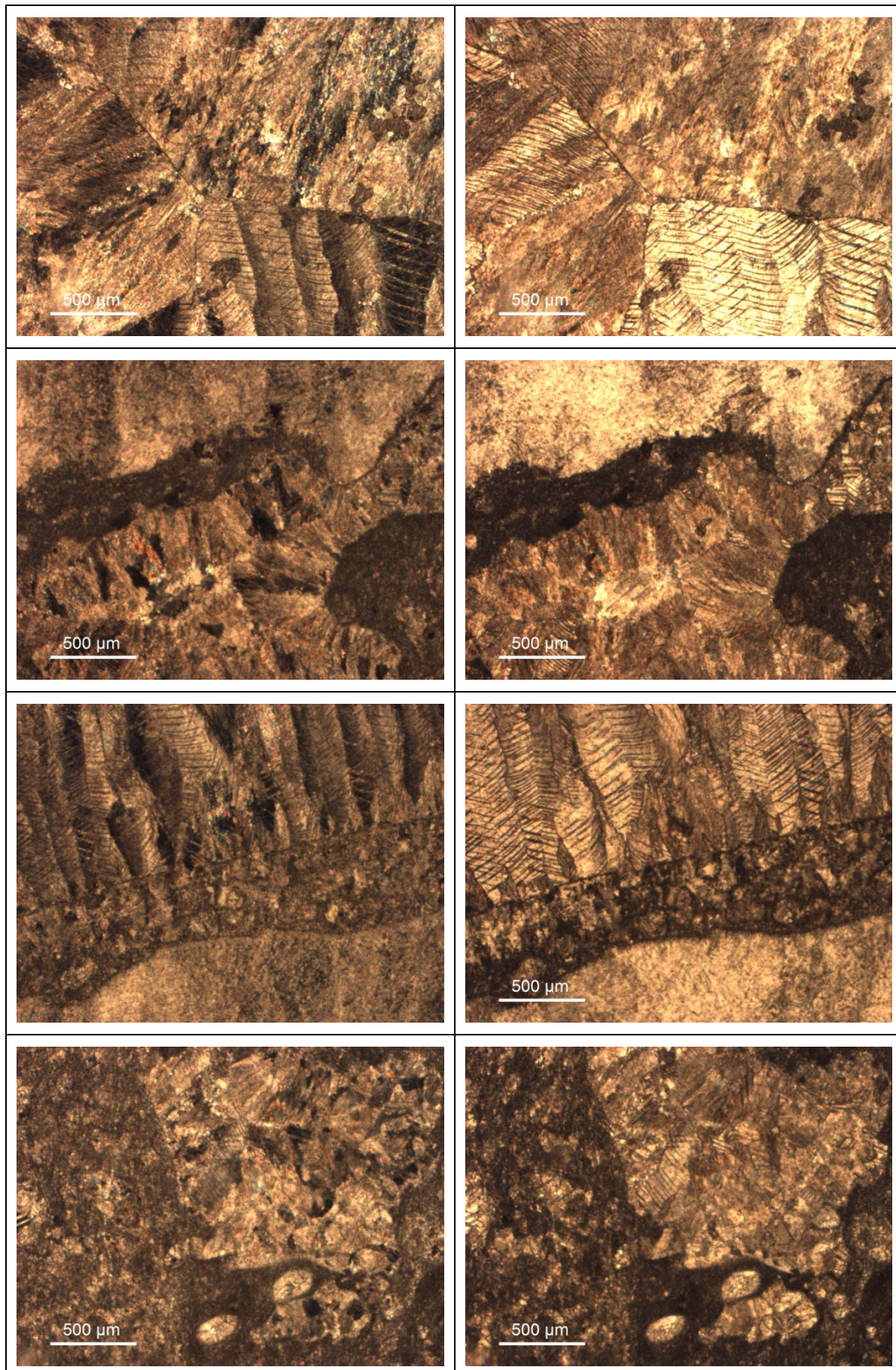


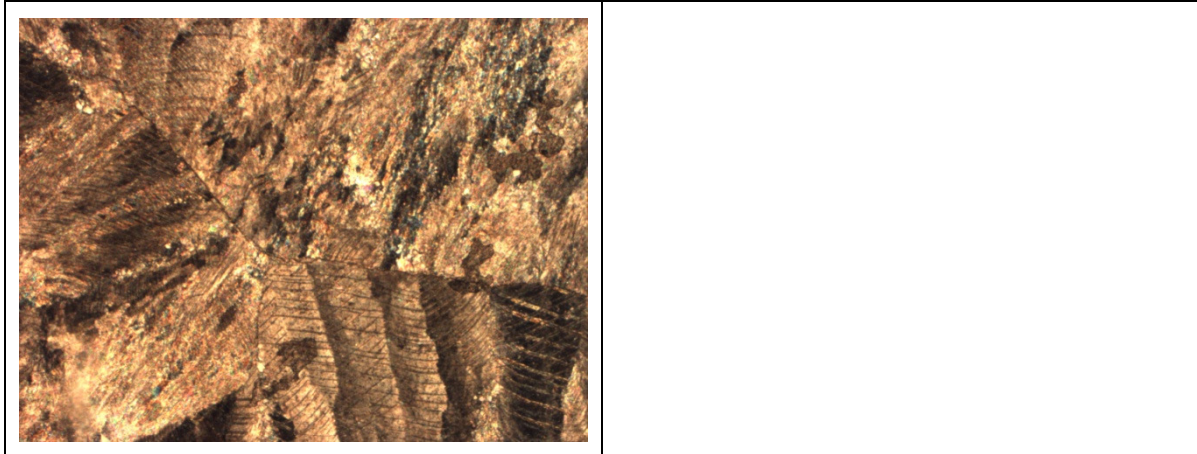


*Tabelle 9.13: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B3 Probe1*

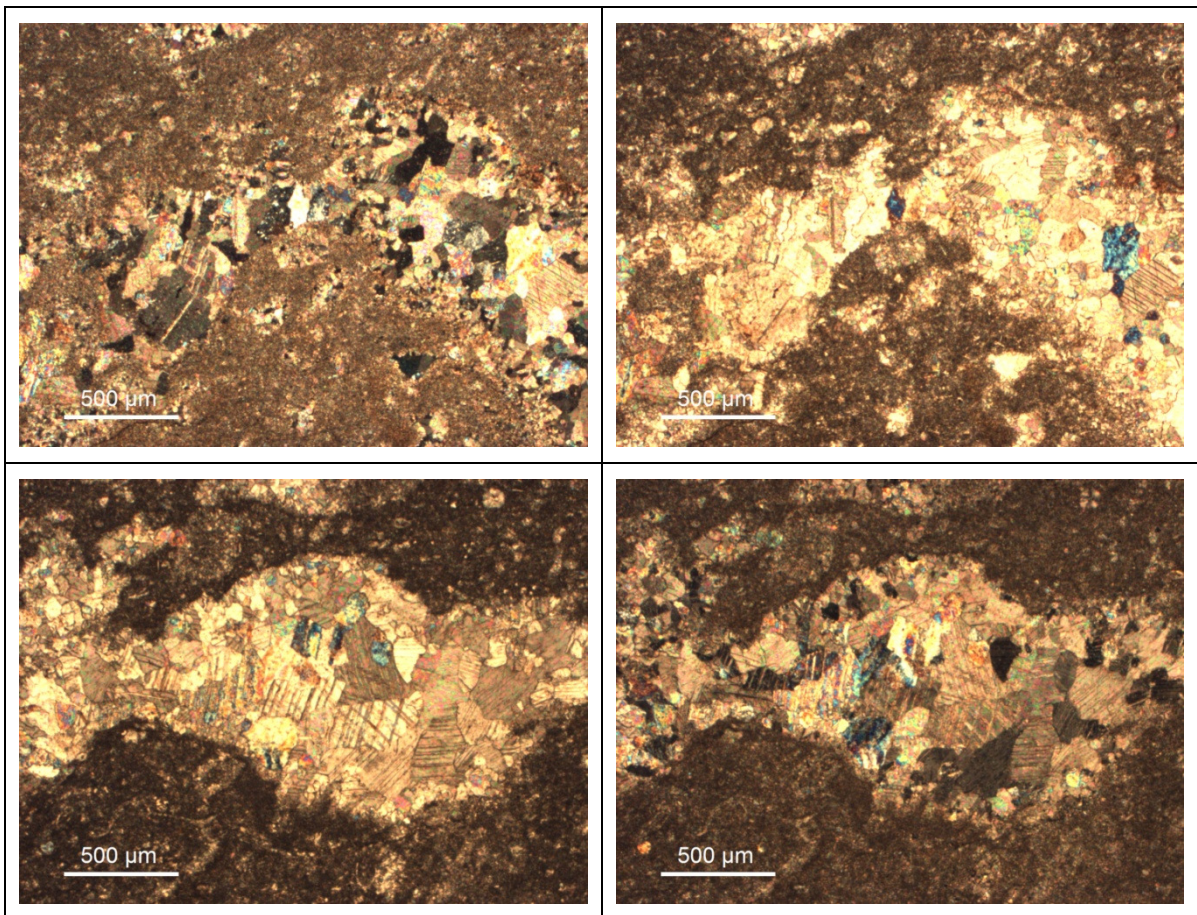
**Tabelle 9.14: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B3 Probe2****Tabelle 9.15: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B4 Probe2**

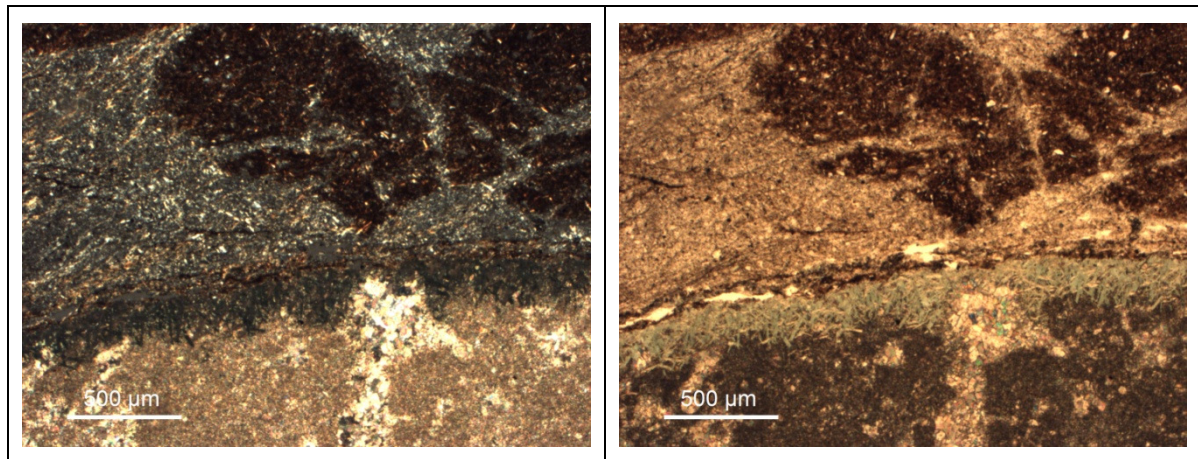


**Tabelle 9.16: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B4 Probe2**

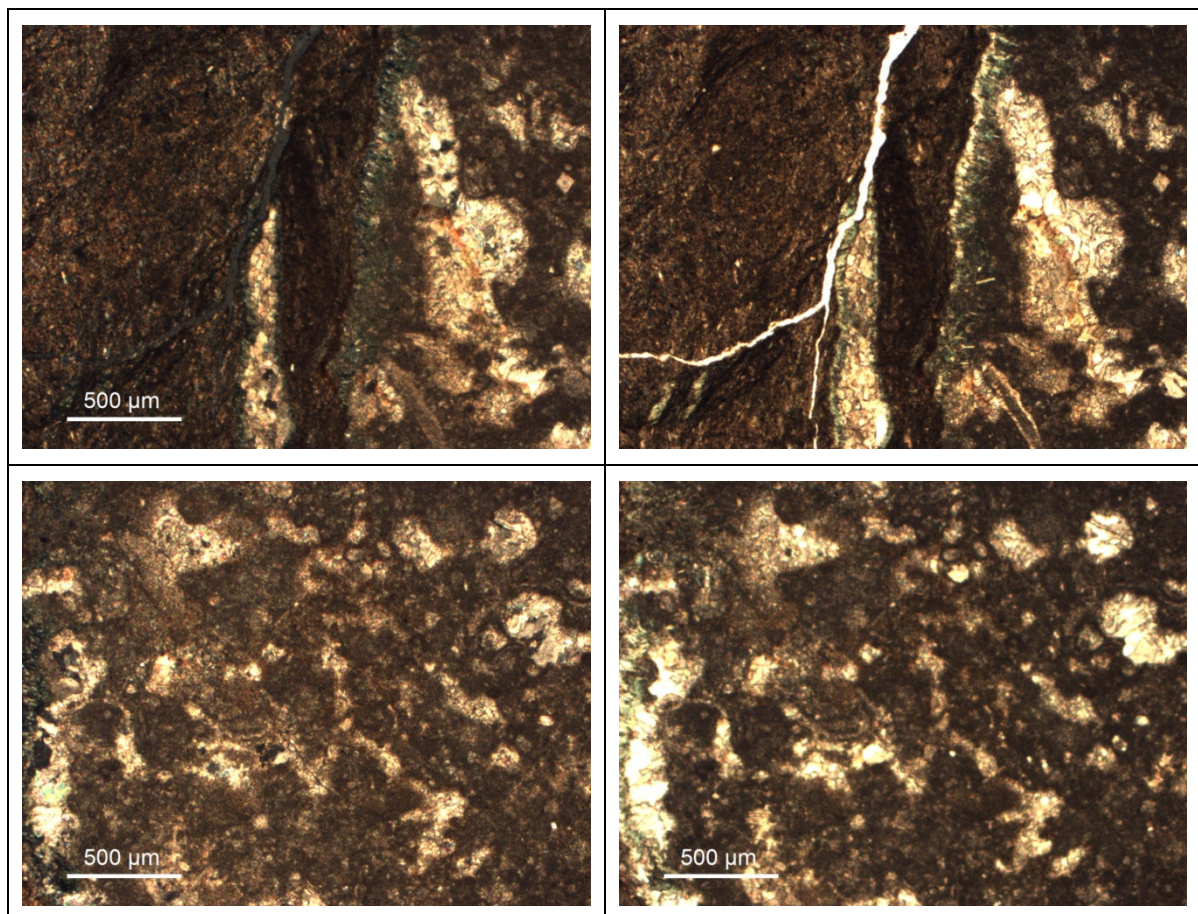


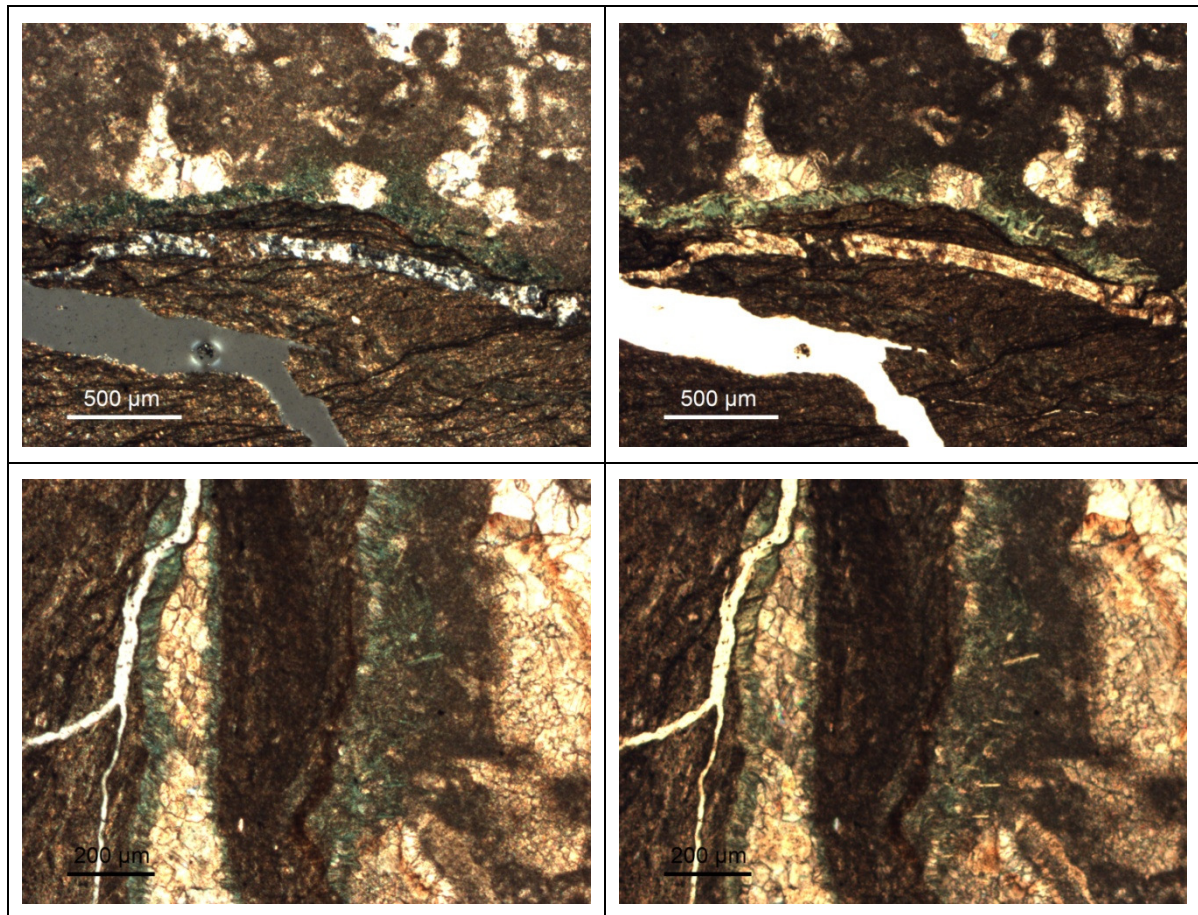
*Tabelle 9.17: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B5 Probe 1*



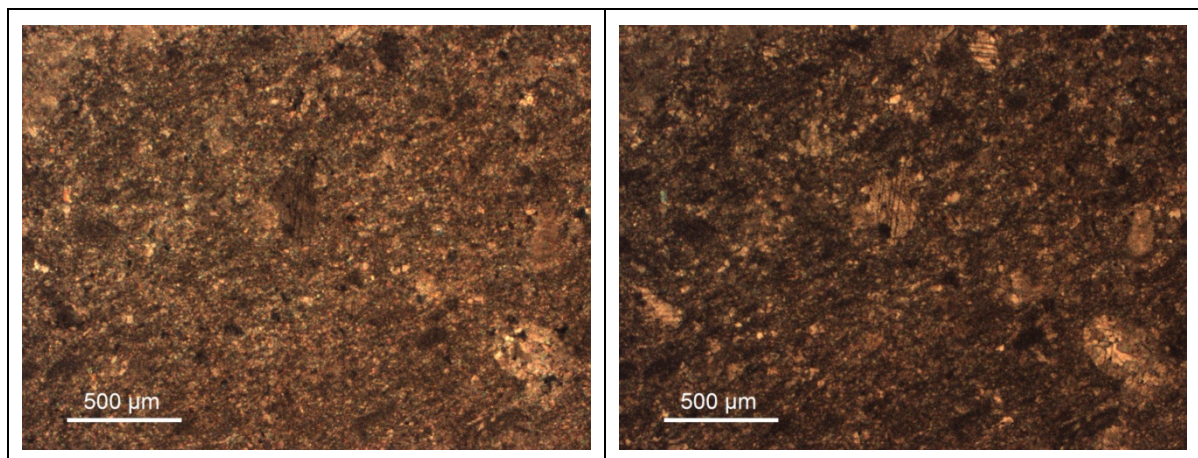


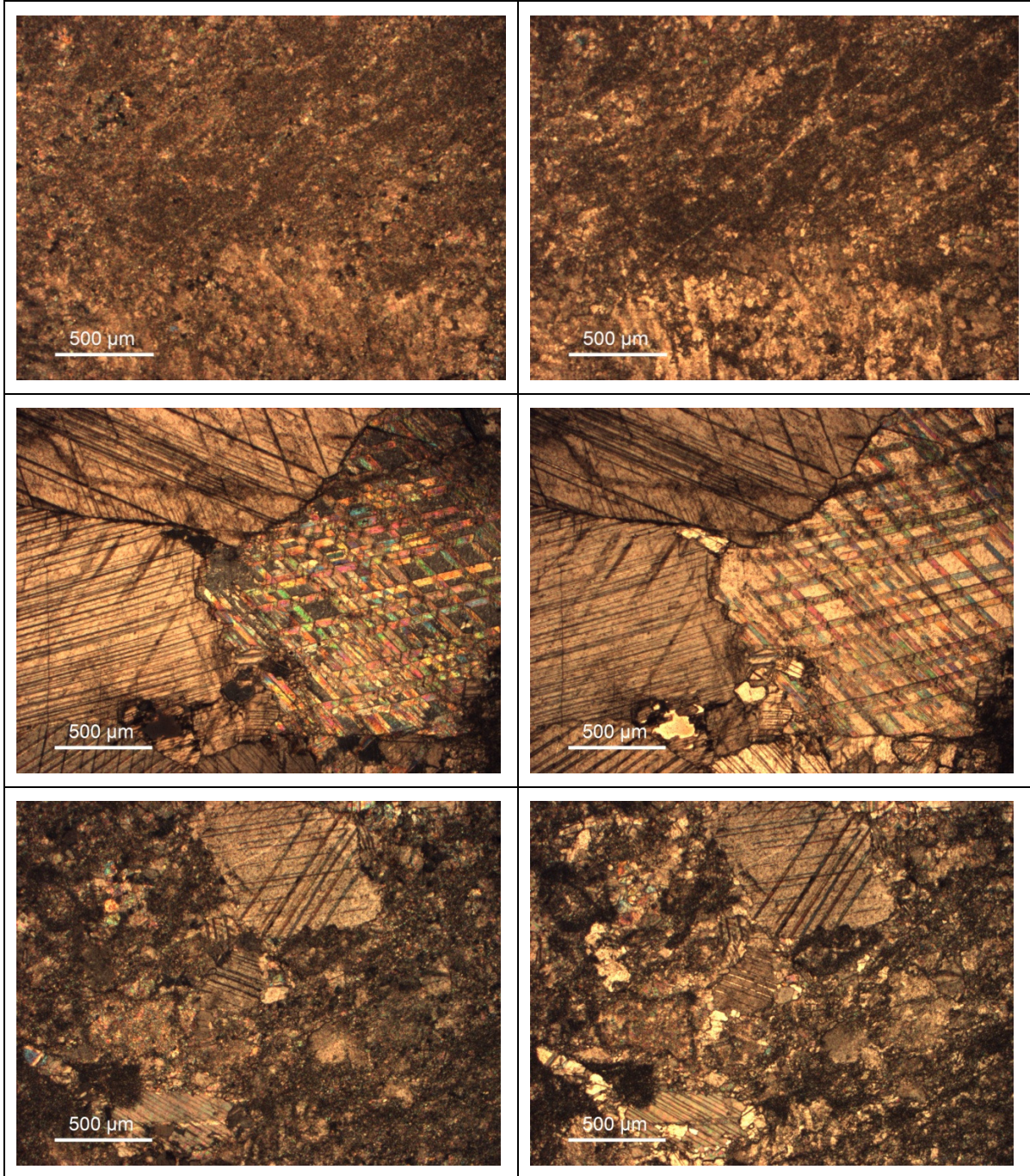
*Tabelle 9.18: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B5 Probe 2*

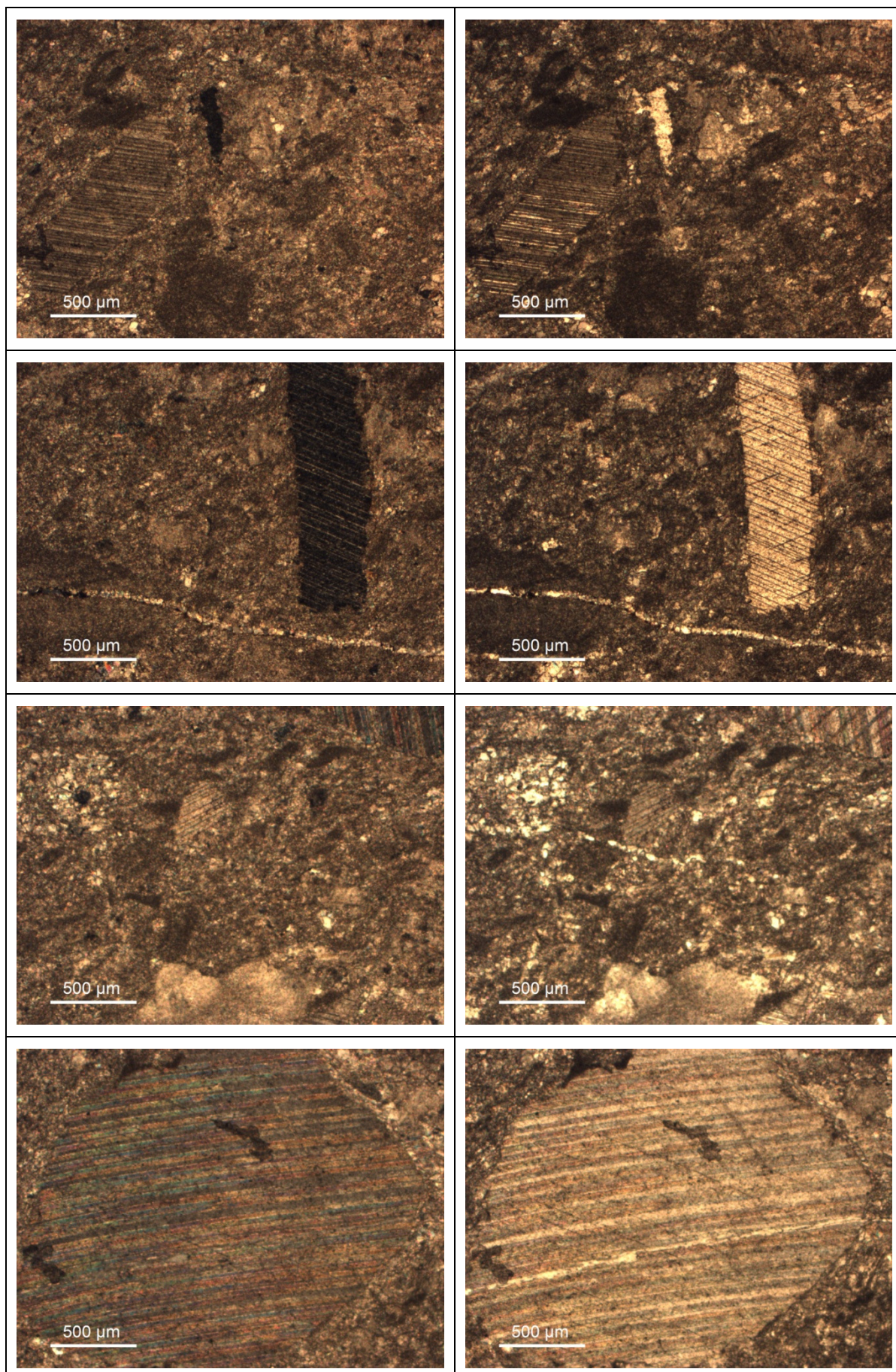




*Tabelle 9.19: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B6 Probe 1*

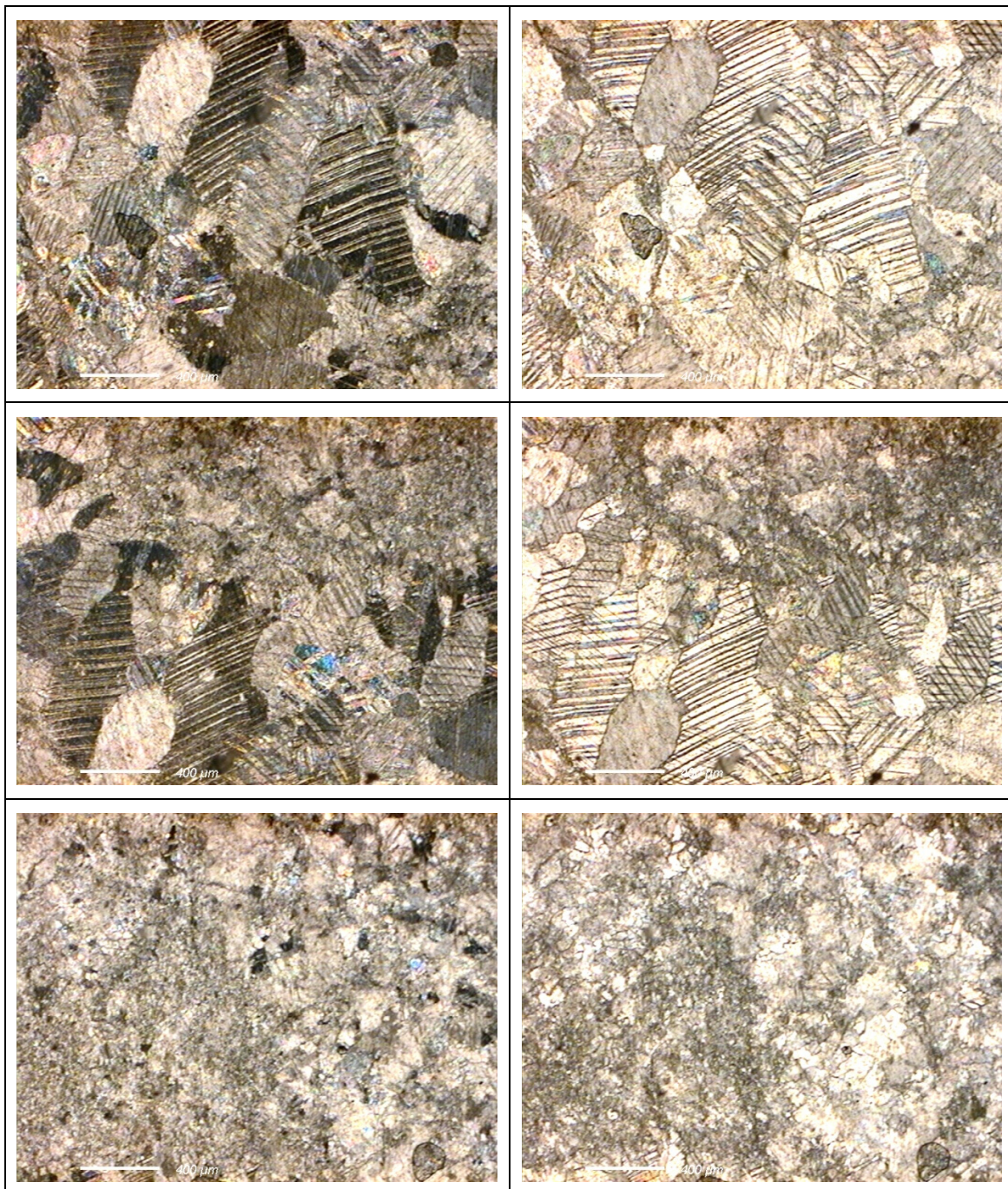


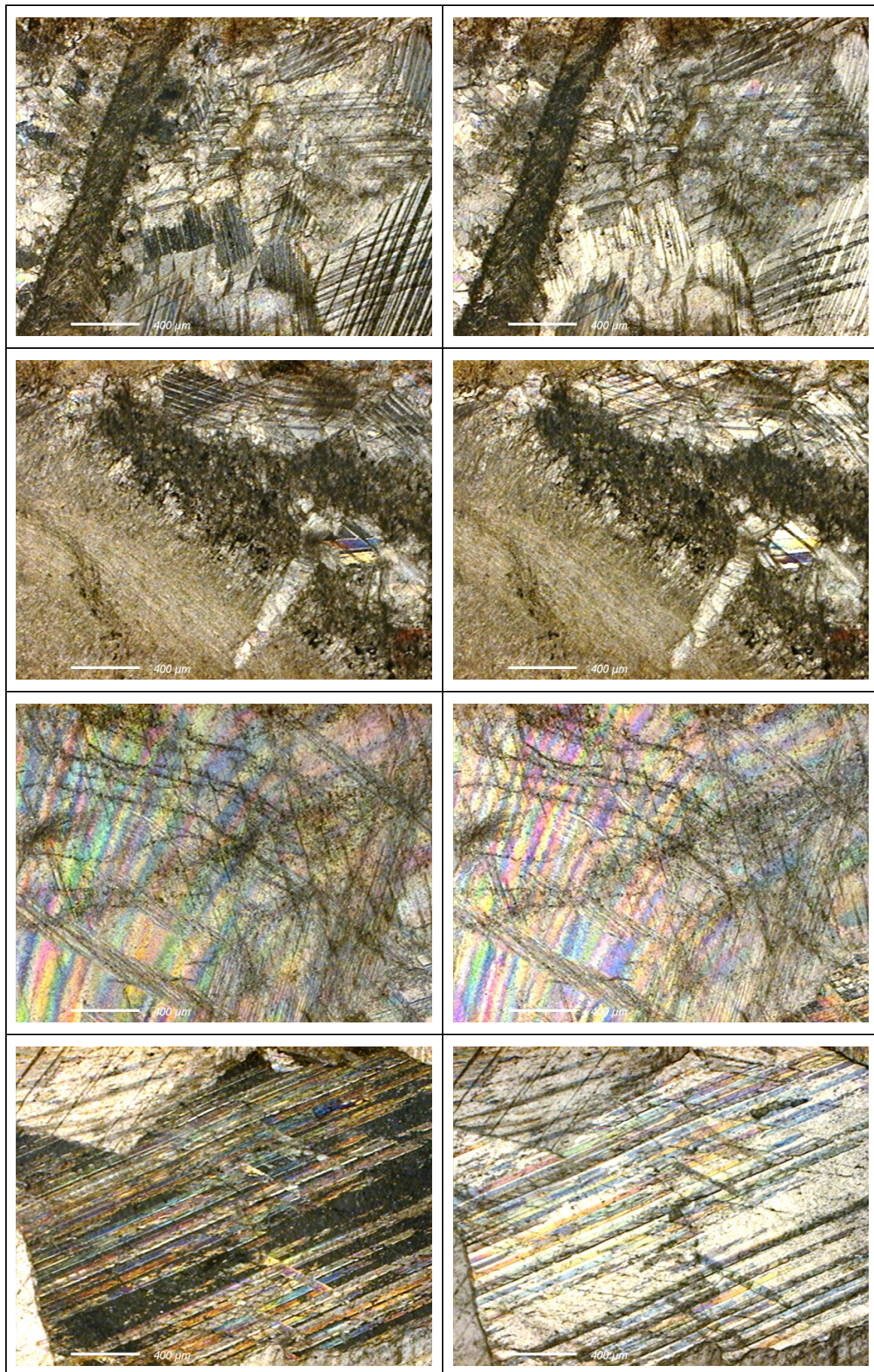


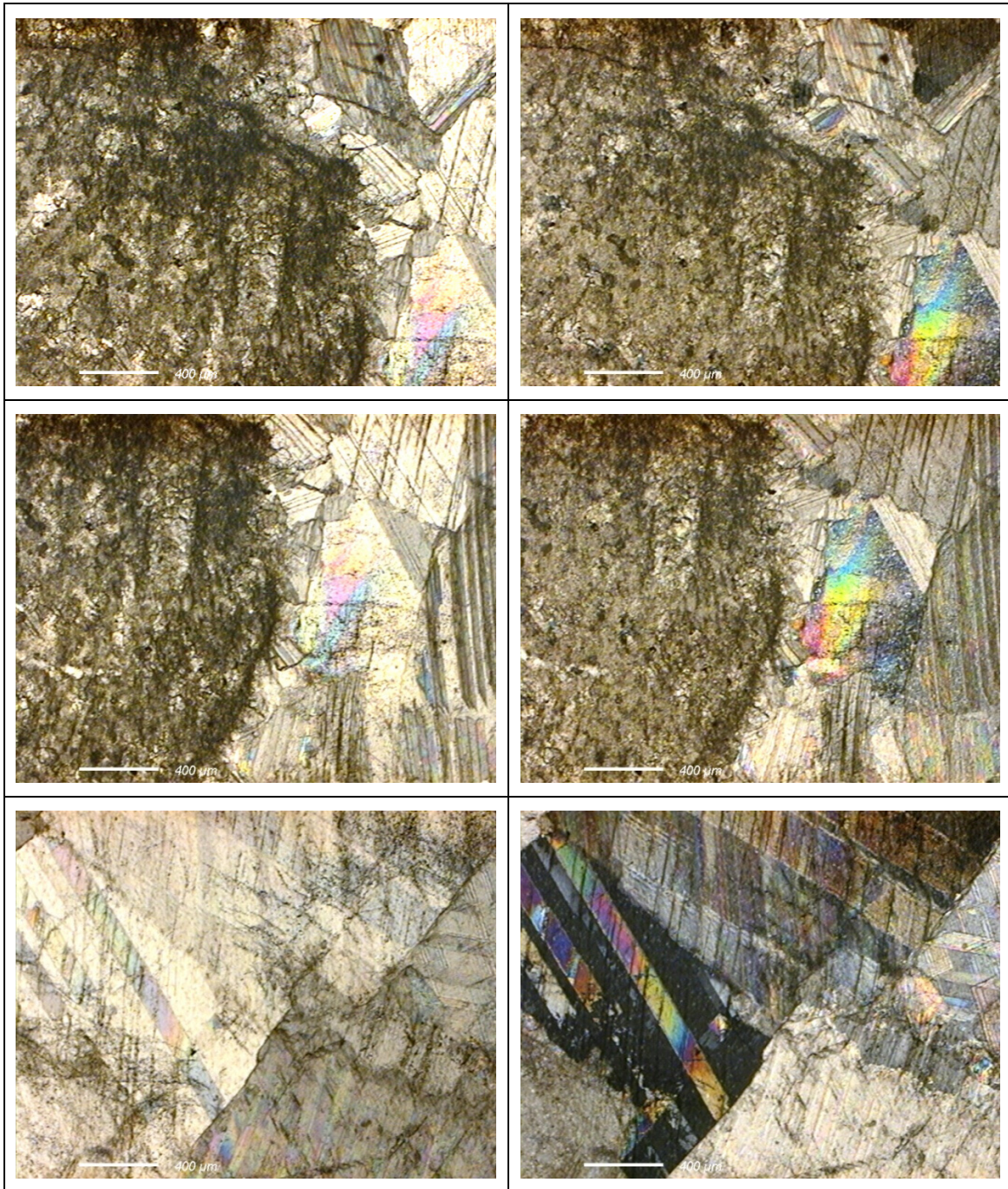
*Tabelle 9.20: Dünnschliffabbildungen des Handstückes B6 Probe2*

## Handstücke der Lagerstätte D

Tabelle 9.21: Dünnschliffabbildungen der Handstücke D1

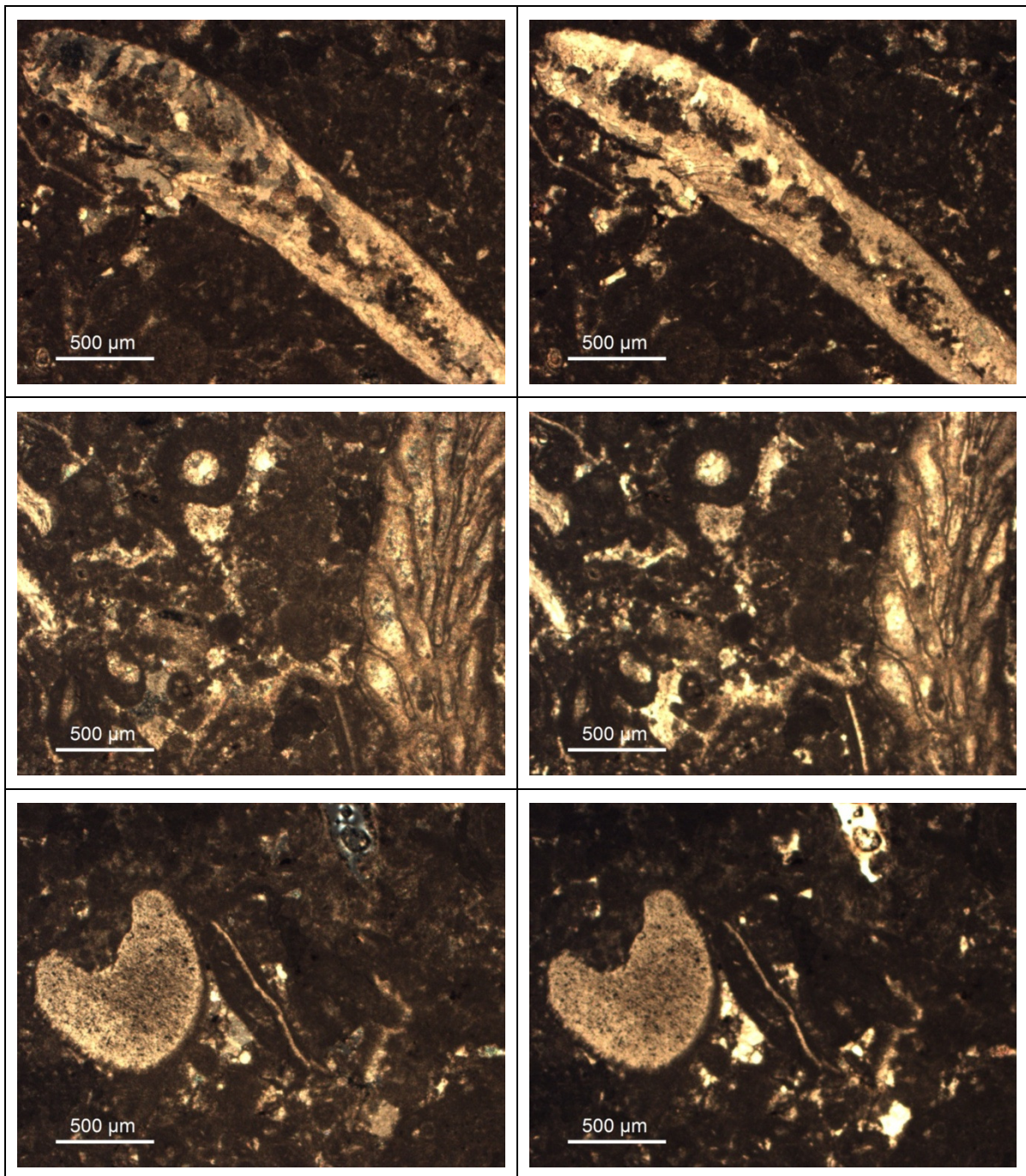


**Tabelle 9.22: Dünnschliffabbildungen der Handstücke D2**



## Handstücke der Lagerstätte G

Tabelle 9.23: Dünnschliffabbildungen des Handstückes G1



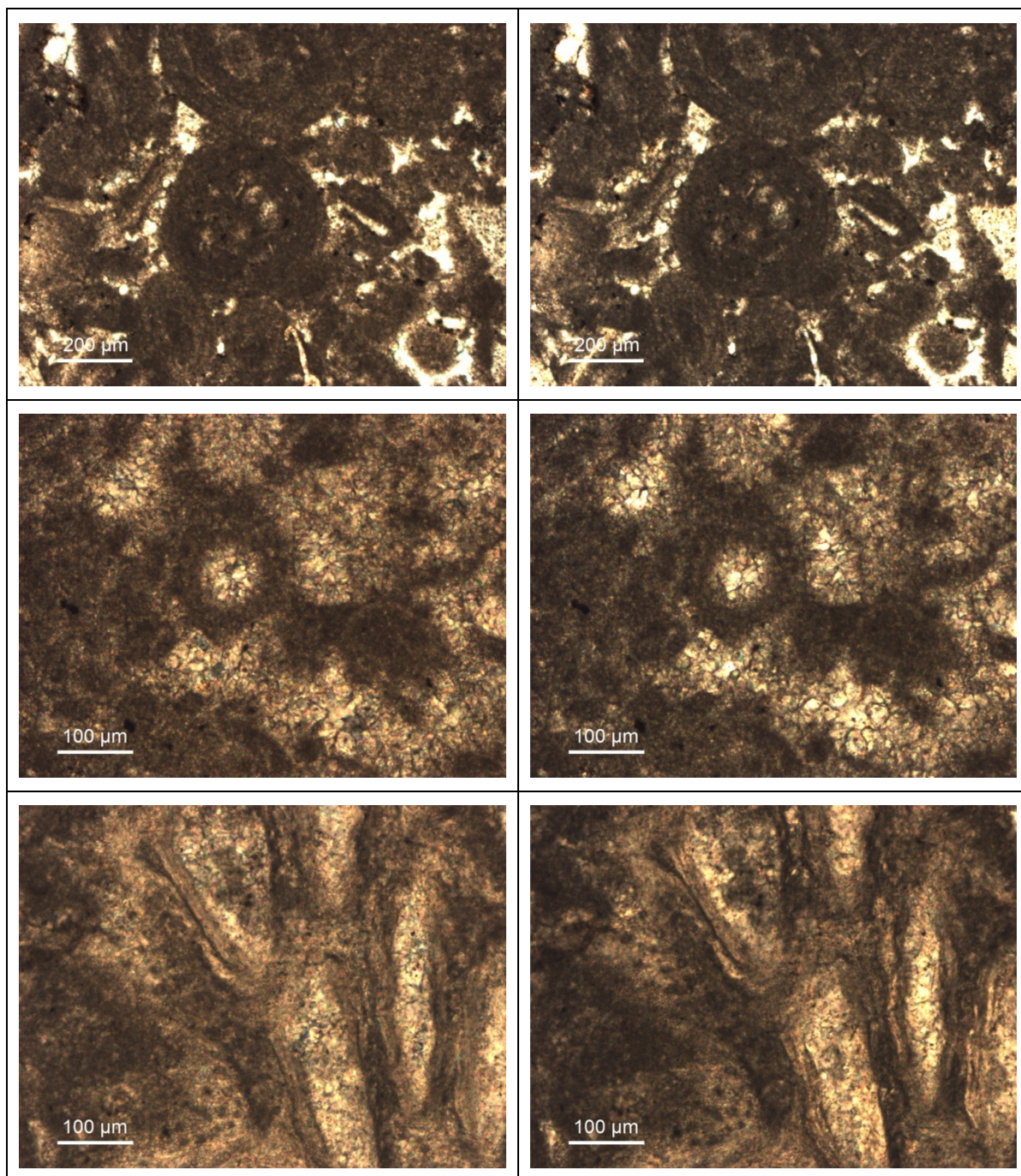
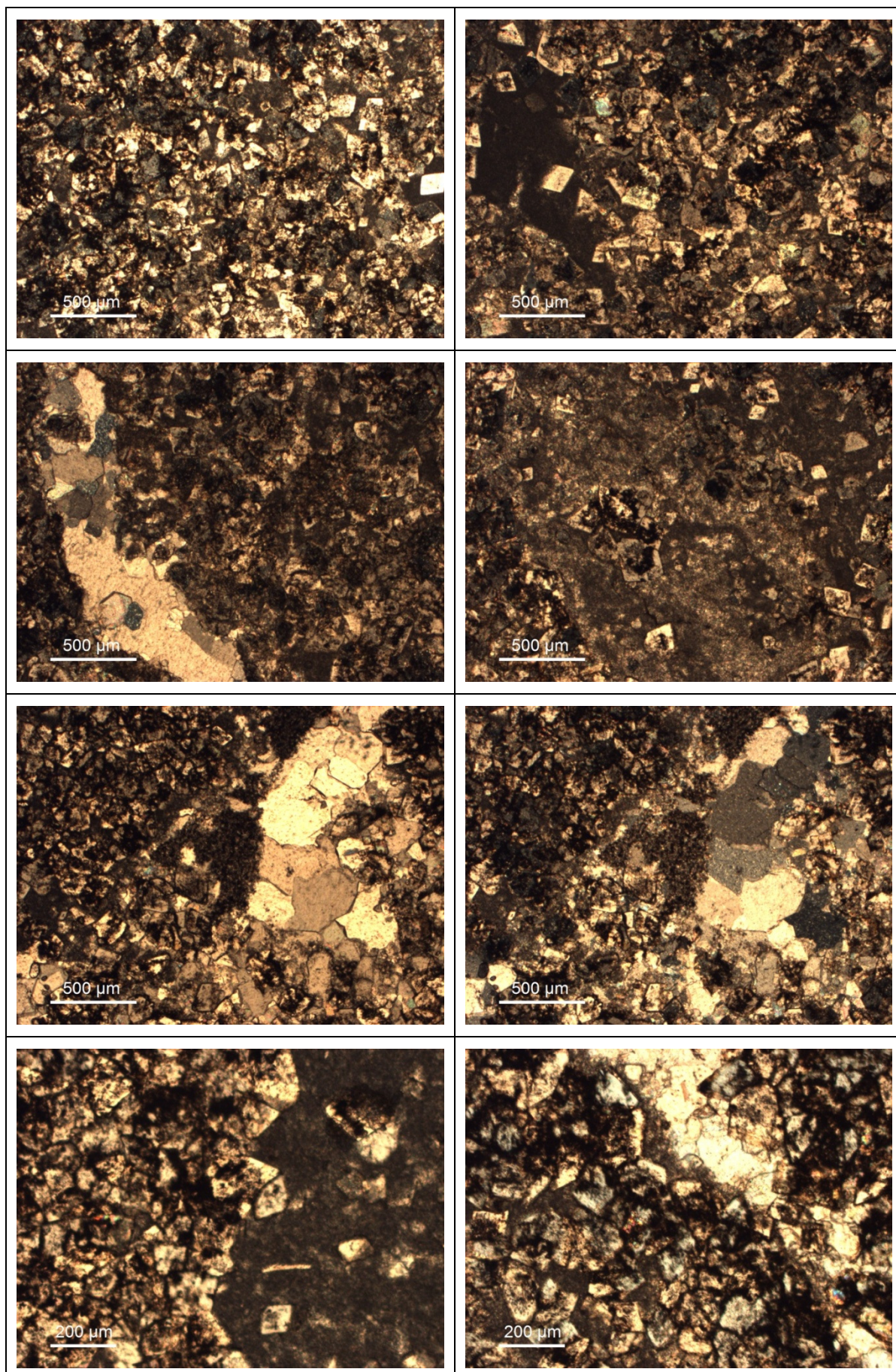
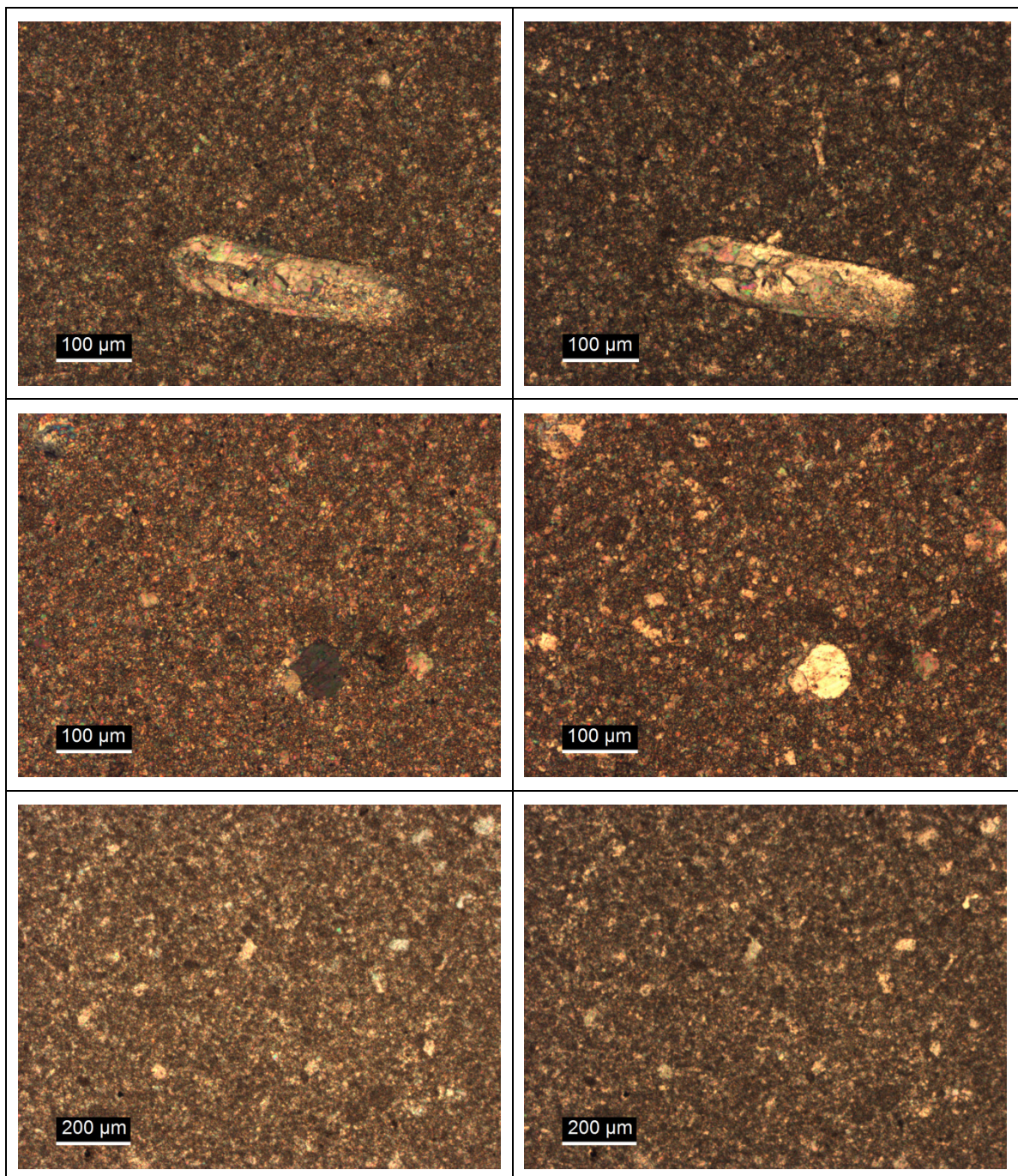


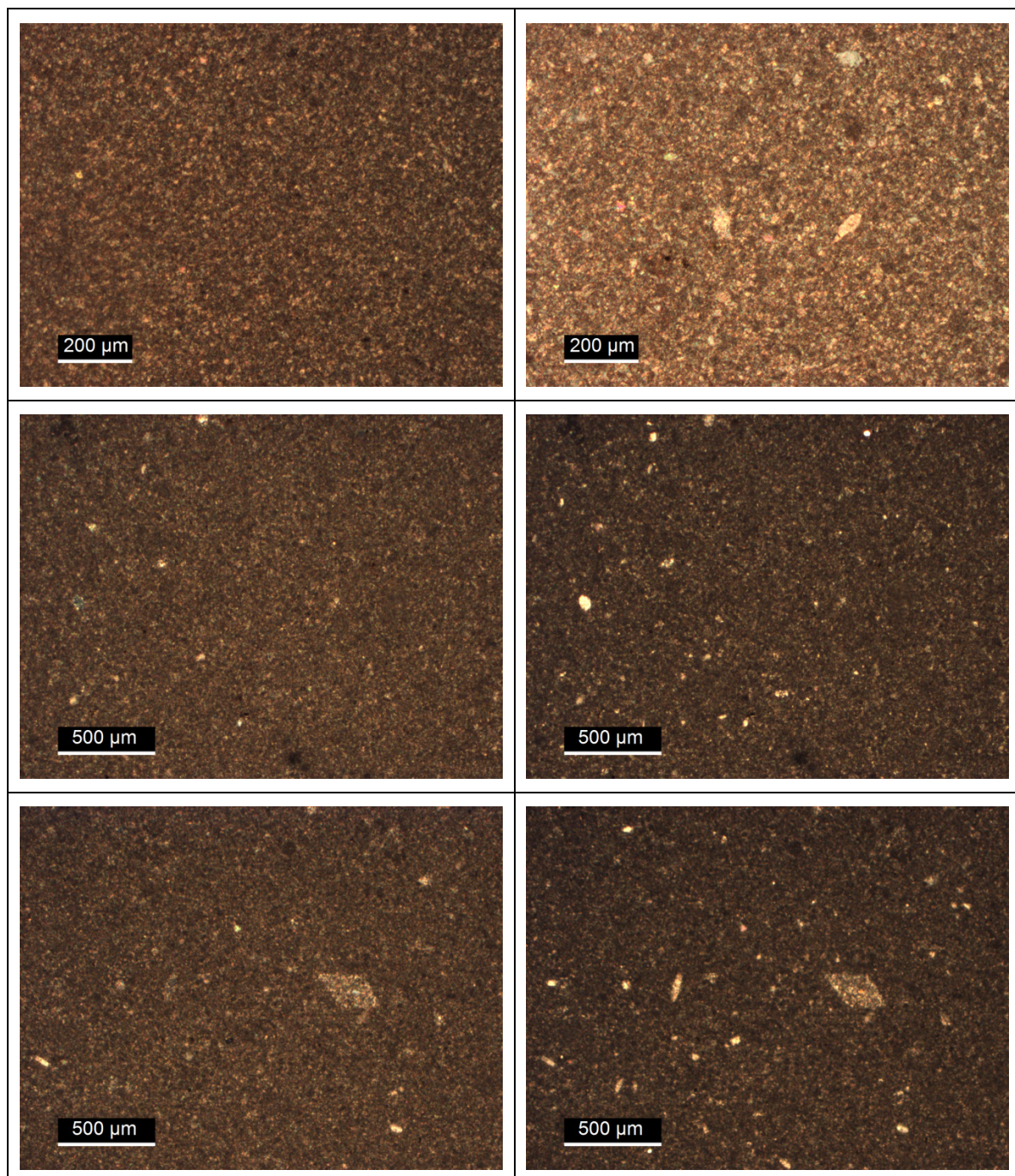
Tabelle 9.24: Dünnschliffabbildungen des Handstückes G2



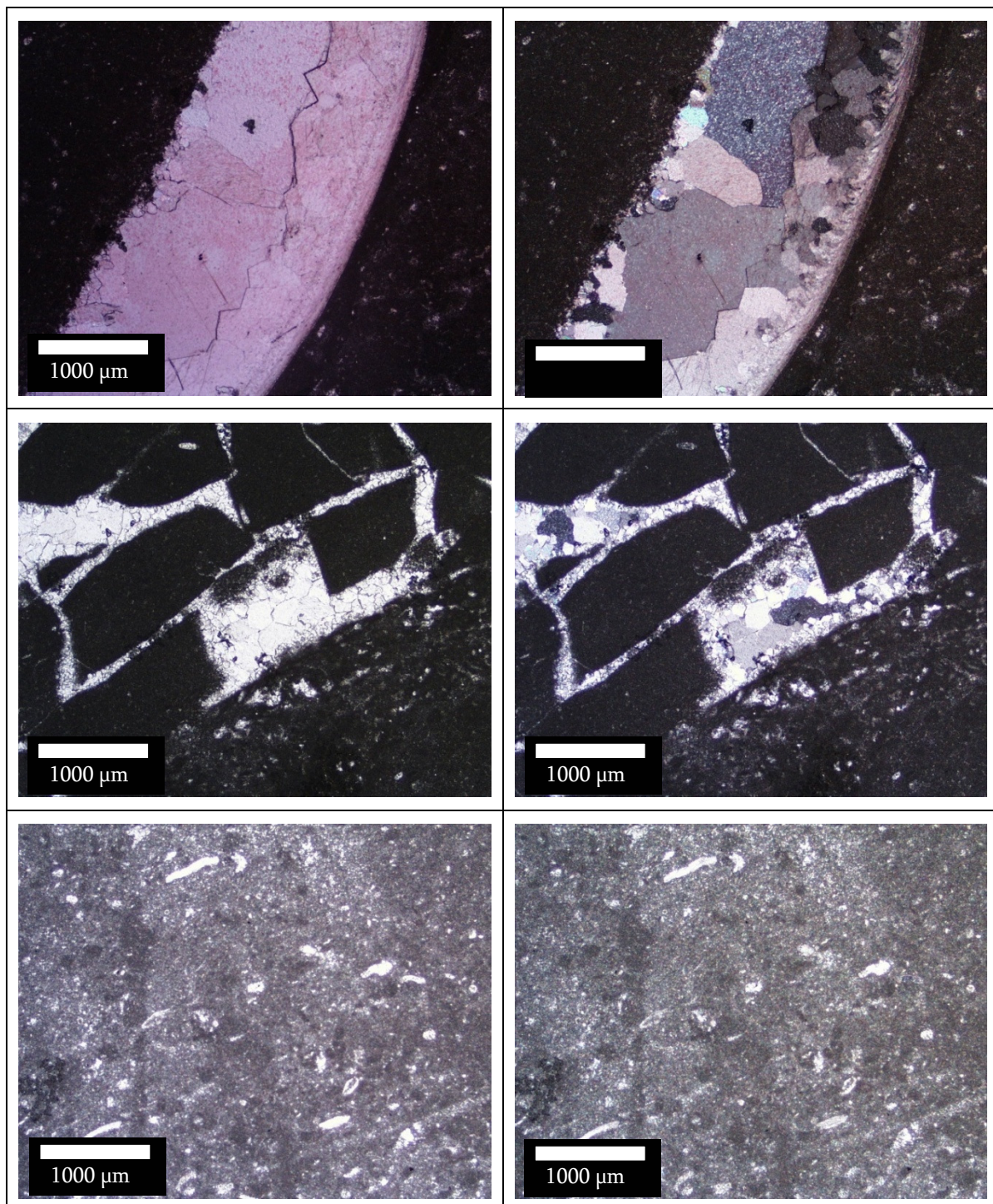
## Handstücke der Lagerstätte H

Tabelle 9.25: Dünnschliffabbildungen des Handstückes H

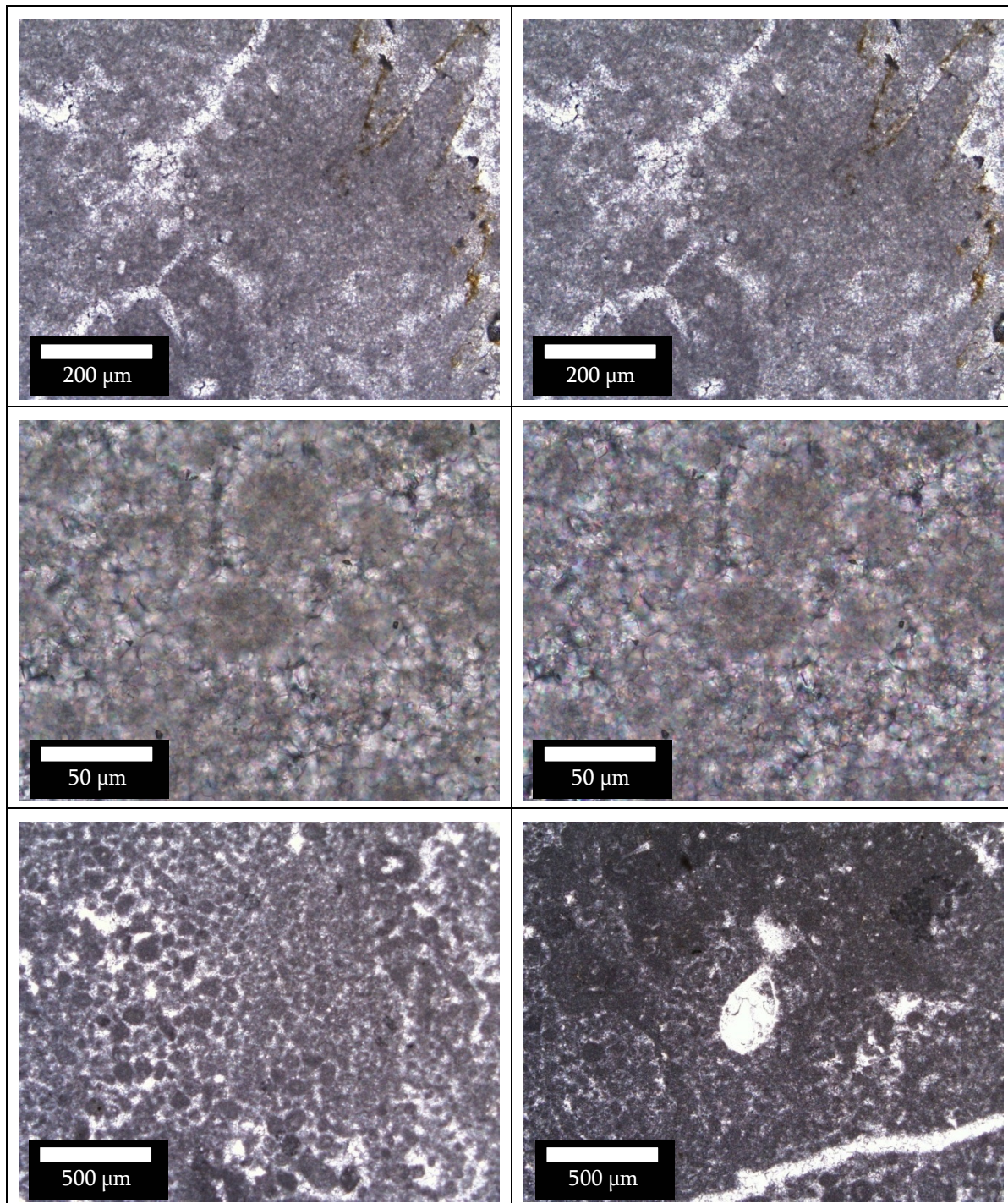


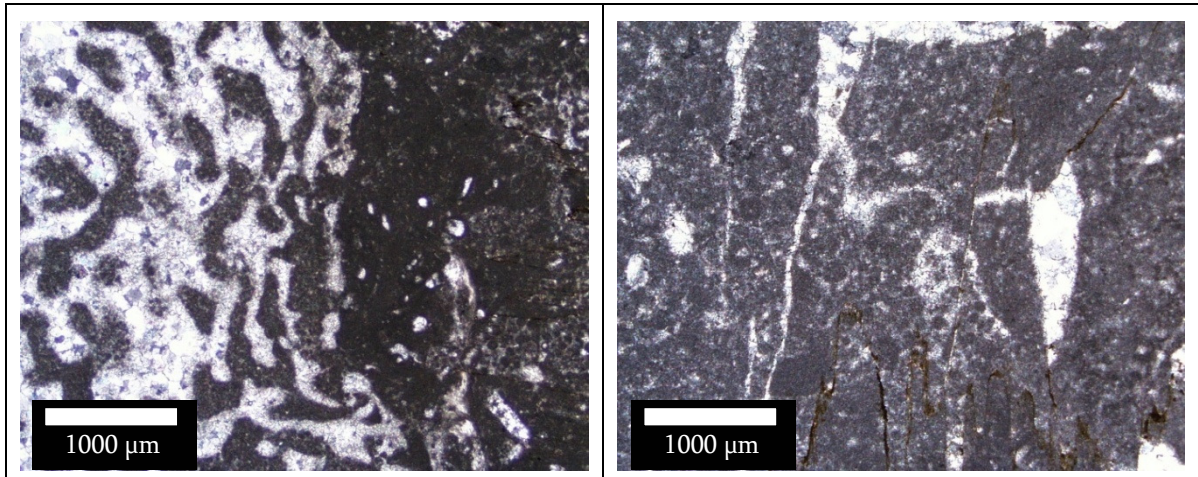


## Handstücke der Lagerstätte J

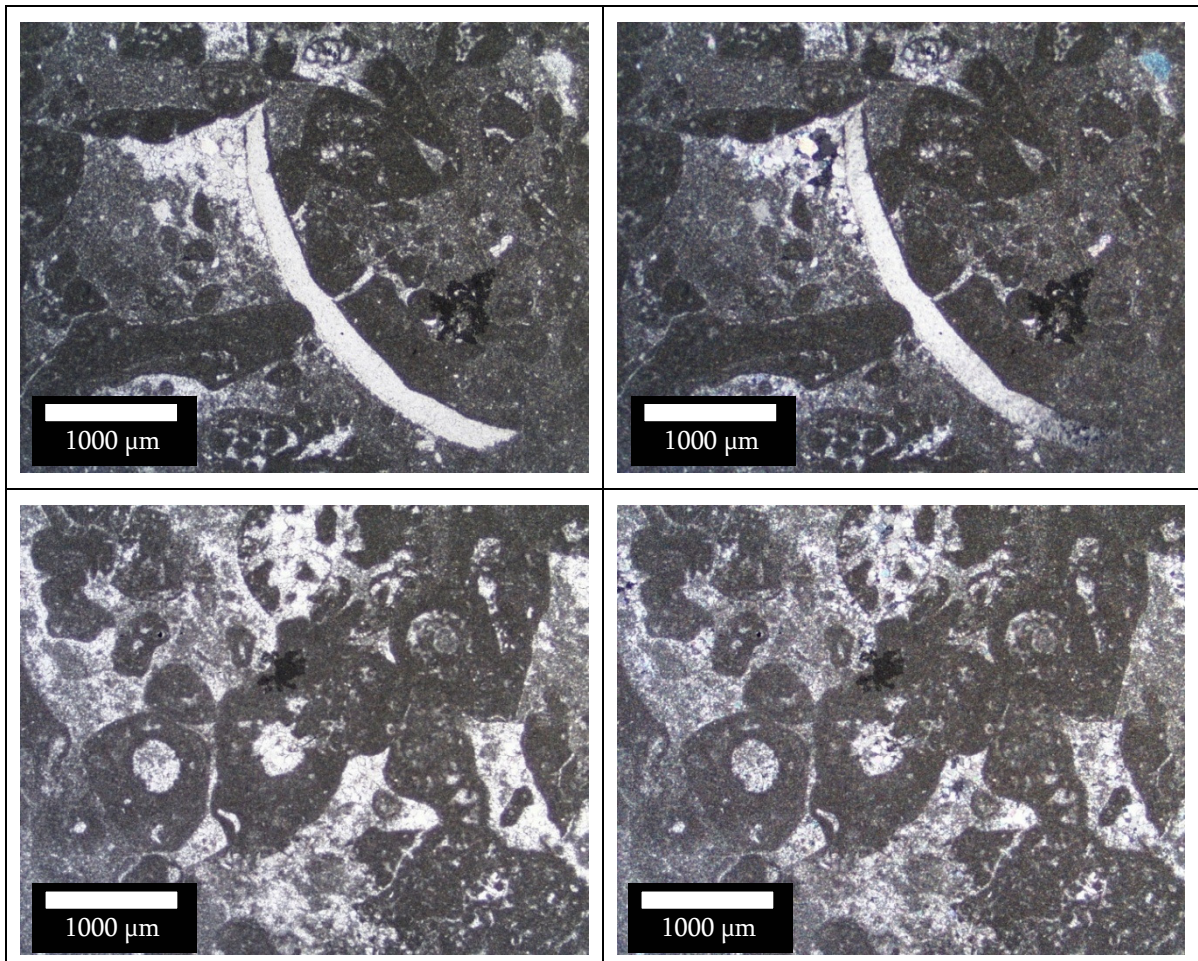
Tabelle 9.26: Dünnschliffabbildungen der Handstücke J1 (L: 4250  $\mu\text{m}$ , H: 3400  $\mu\text{m}$ )

*Tabelle 9.27: Dünnschliffabbildungen des Handstückes J2*

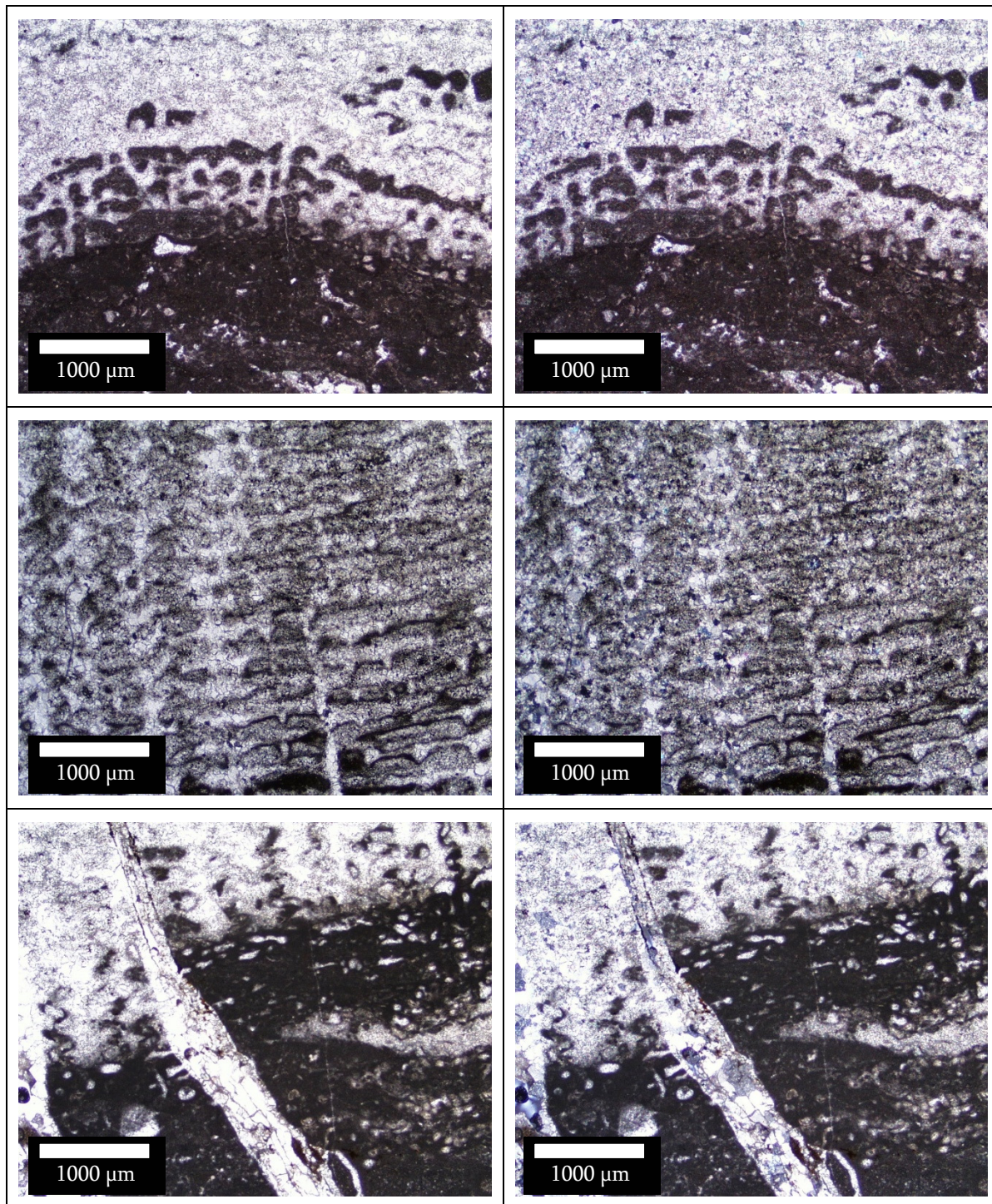


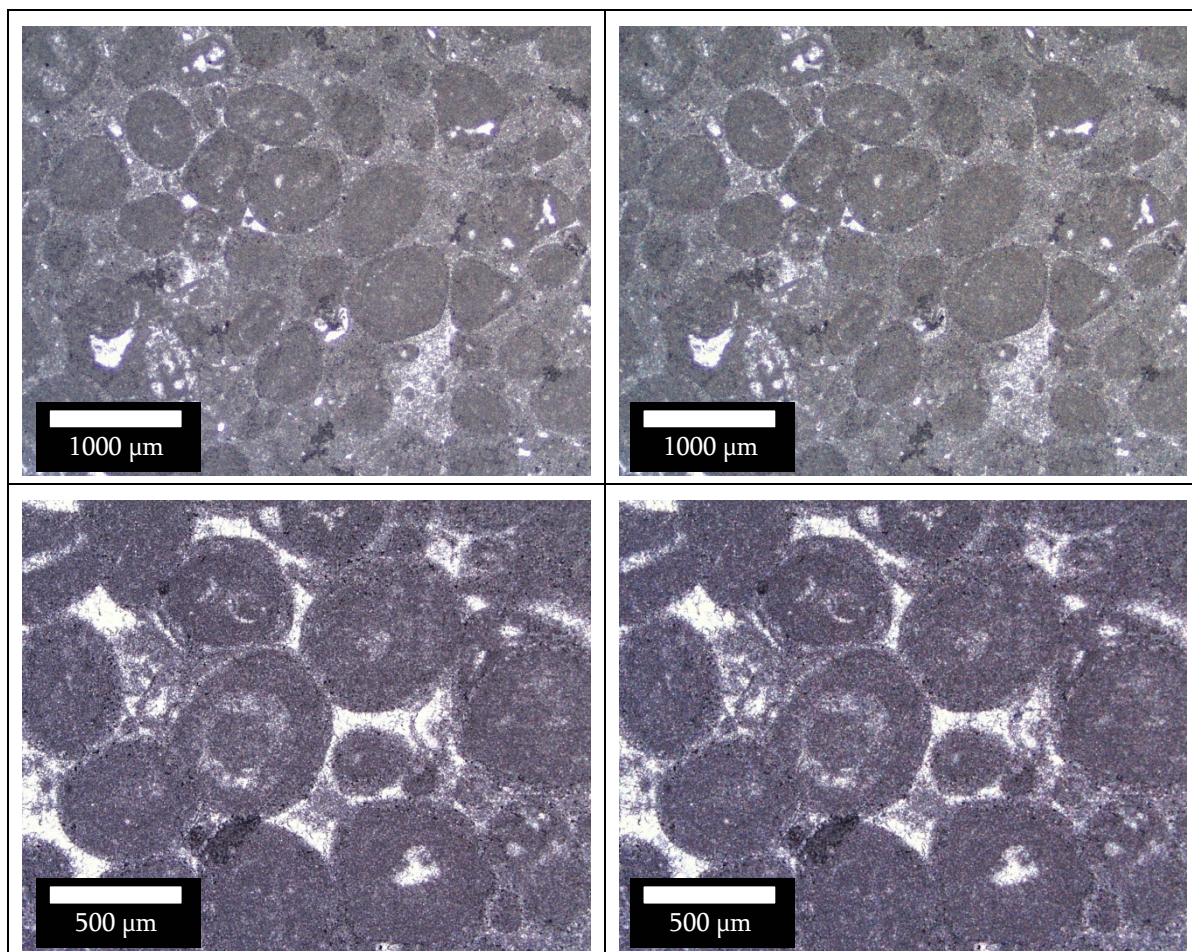
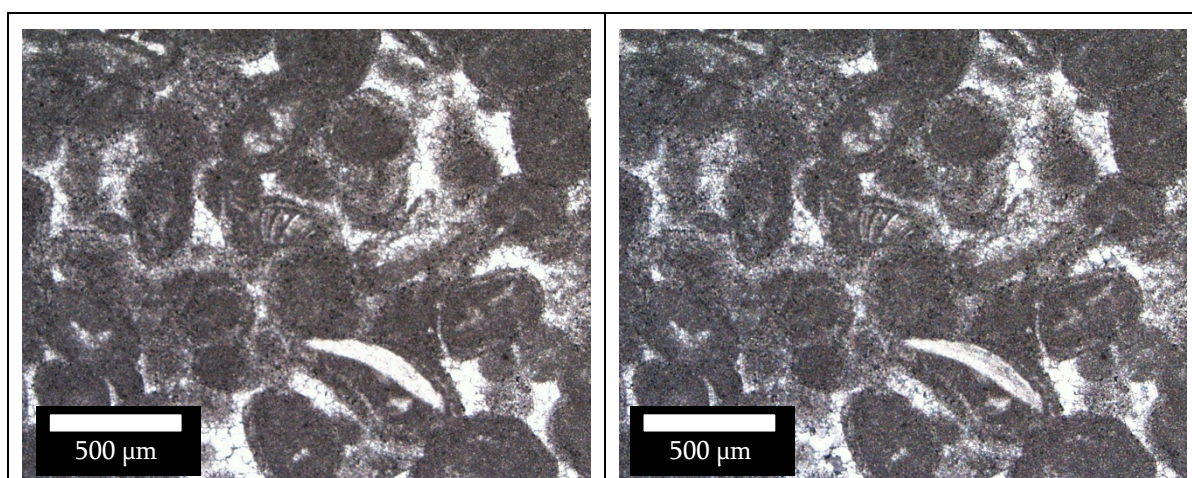


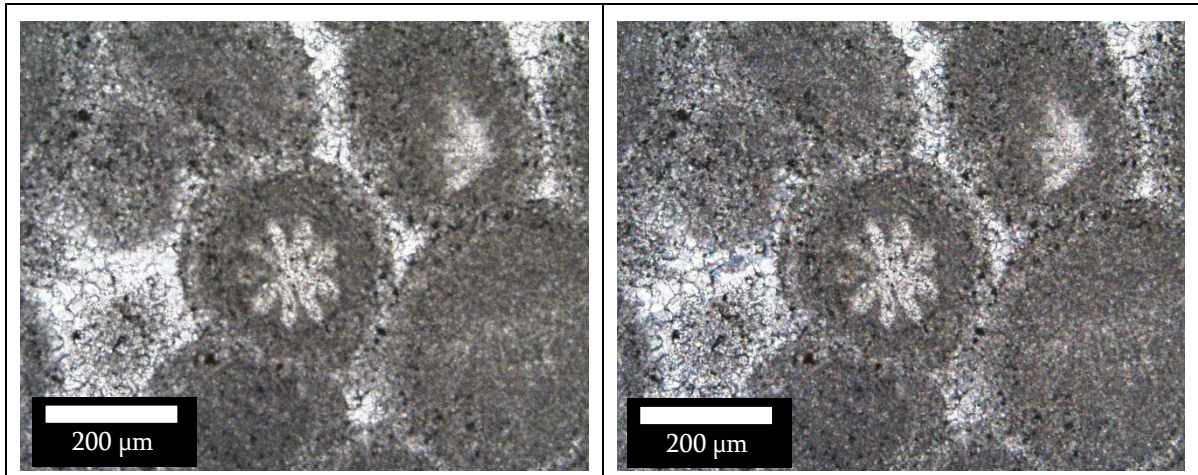
*Tabelle 9.28: Dünnschliffabbildungen des Handstückes J3*



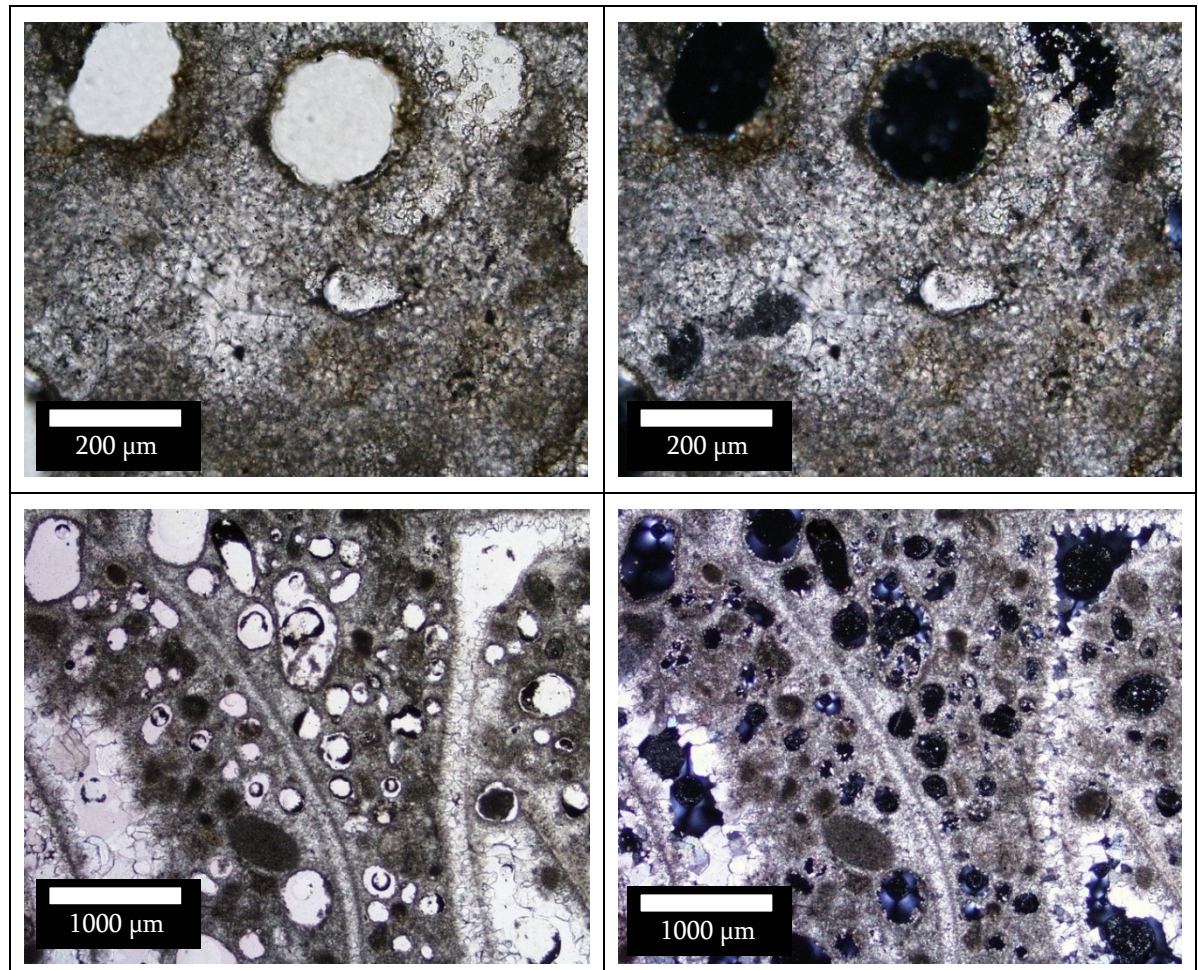
*Tabelle 9.29: Dünnschliffabbildungen des Handstückes J4*

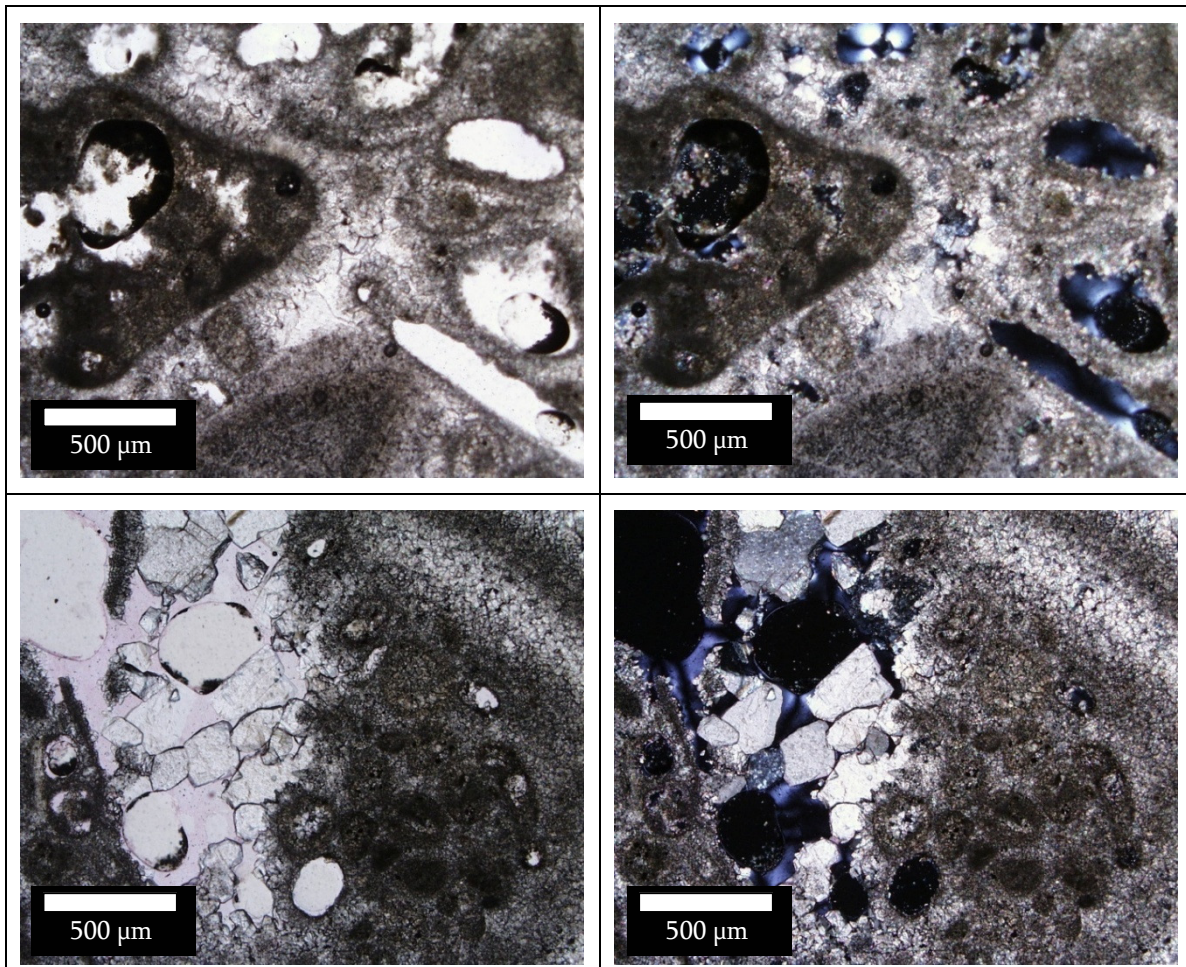


**Tabelle 9.30: Dünnschliffabbildungen des Handstückes J5****Tabelle 9.31: Dünnschliffabbildungen des Handstückes J6**

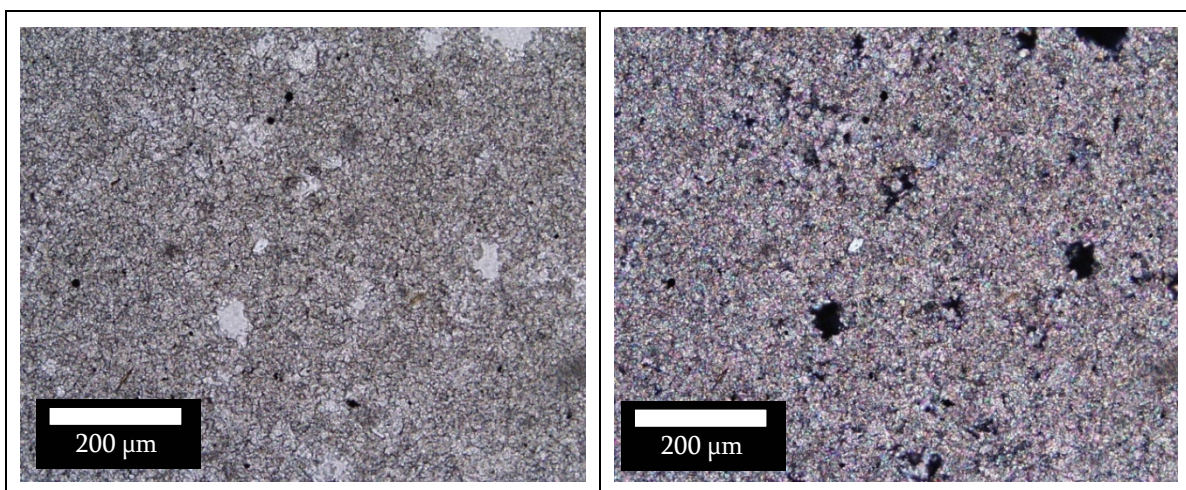


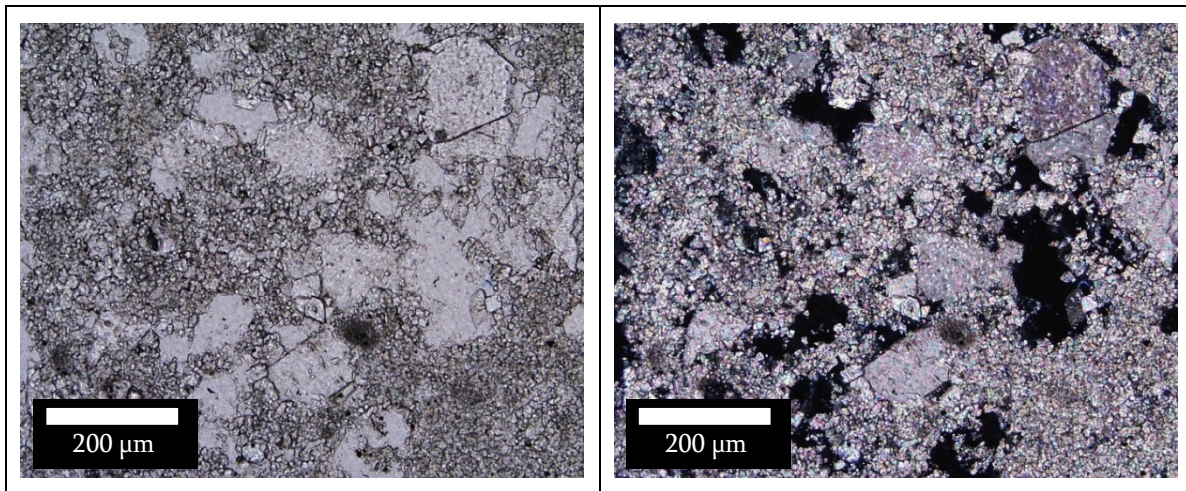
*Tabelle 9.32: Dünnschliffabbildungen des Handstückes Y1*



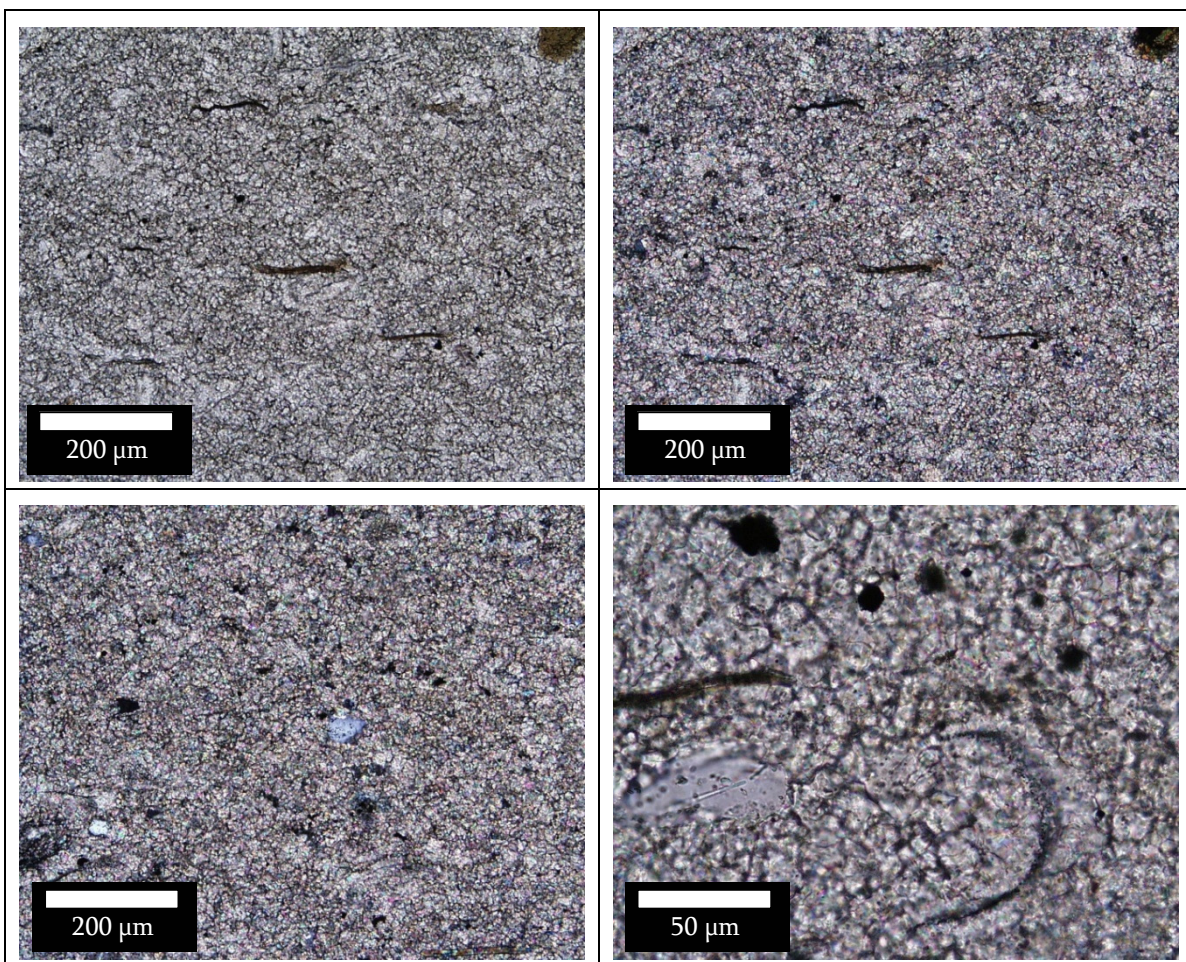


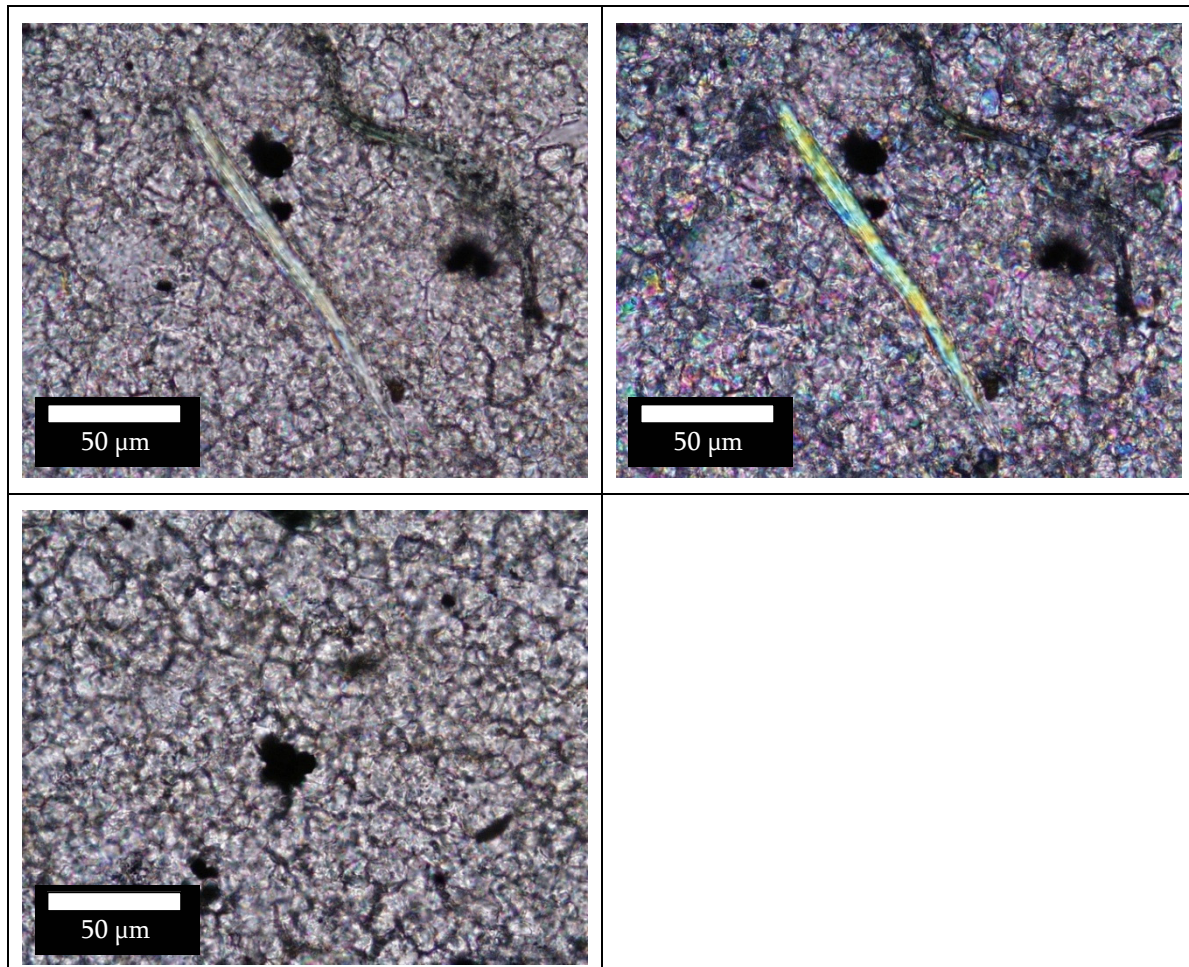
*Tabelle 9.33: Dünnschliffabbildungen des Handstückes Y2*



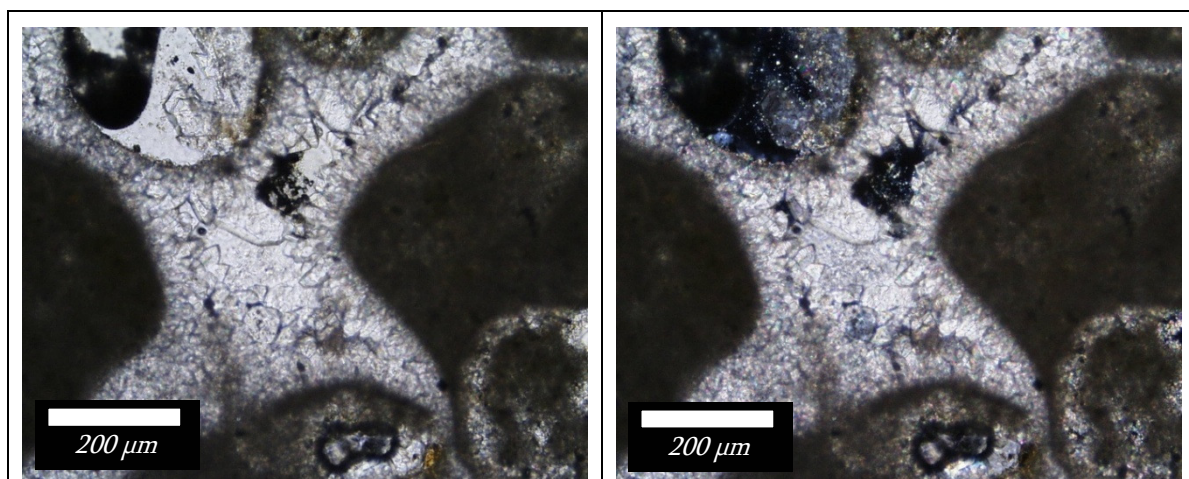


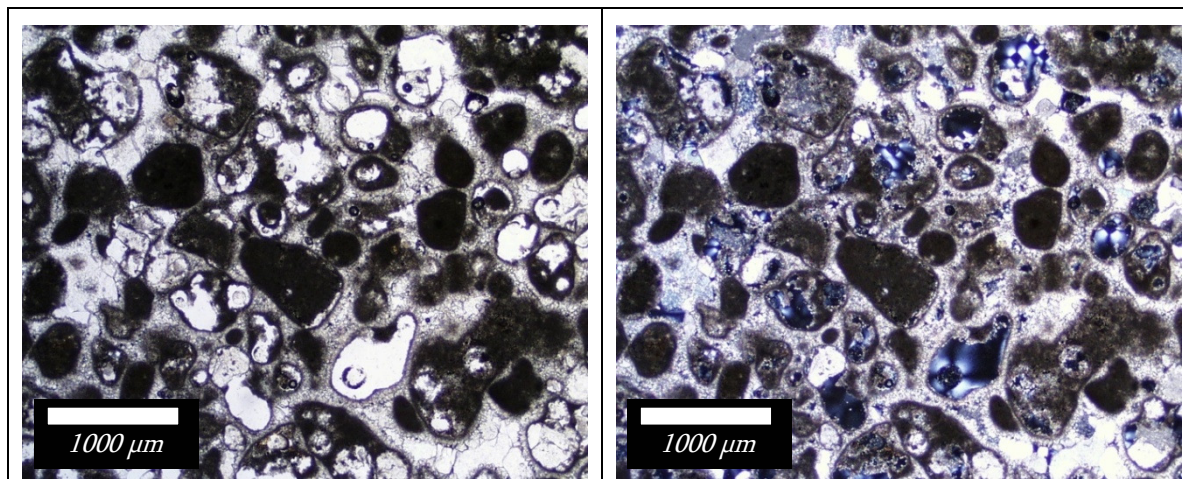
*Tabelle 9.34: Dünnschliffabbildungen des Handstückes Y3*





*Tabelle 9.35. Dünnschliffabbildungen des Handstückes Y4*





## 9.4 Dichten

## Rohdichten

| Kalkstein  | Rohdichten       | Mittlere Rohdichte | Kalkstein | Rohdichten       | Mittlere Rohdichte |
|------------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|
| A1         | 2,6777<br>2,7717 | 2,7247             | I1        | 2,6937<br>2,6618 | 2,6778             |
| A2         | 2,4936<br>2,7595 | 2,62655            | I2        | 2,6484<br>2,6646 | 2,6778             |
| B1         | 2,5874<br>2,6971 | 2,64225            | H         | 2,6764<br>2,5662 | 2,6213             |
| B2         | 2,7229<br>2,5978 | 2,66035            | J1        | 2,7385<br>2,6082 | 2,67335            |
| B3 Probe 1 | 2,6915<br>2,7173 | 2,7044             | J2        | 2,6397<br>2,7362 | 2,6880             |
| B3 Probe 2 | 2,7422<br>2,6344 | 2,6883             | J3        | 2,6103<br>2,5905 | 2,6004             |
| B4 Probe 1 | 2,9009<br>2,7836 | 2,84225            | J4        | 2,7472<br>2,6116 | 2,6794             |
| B4 Probe 2 | 2,9081<br>2,6823 | 2,7952             | J5        | 2,6241<br>2,6709 | 2,6475             |
| B5 Probe 1 | 2,5317<br>2,8920 | 2,71185            | J6        | 2,6914<br>2,5651 | 2,6283             |
| B5 Probe 2 | 2,7239<br>2,7645 | 2,7442             | P1        | 2,2327<br>2,5028 | 2,54125            |
| B6         | 2,5625<br>2,5860 | 2,57425            | P2        | 2,4114<br>2,5141 | 2,46275            |
| D1         | 2,6074<br>2,6788 | 2,6431             | Y1        | 1,8418<br>1,8465 | 1,84415            |
| D2         | 2,6634<br>2,6812 | 2,6723             | Y2        | 2,4746<br>2,4509 | 2,46275            |
| G1         | 2,4991<br>2,4822 | 2,49065            | Y3        | 2,6848<br>2,7514 | 2,7181             |
| G2         | 2,7700<br>2,6628 | 2,7164             | Y4        | 2,0465<br>1,9352 | 1,9909             |

## Reindichten

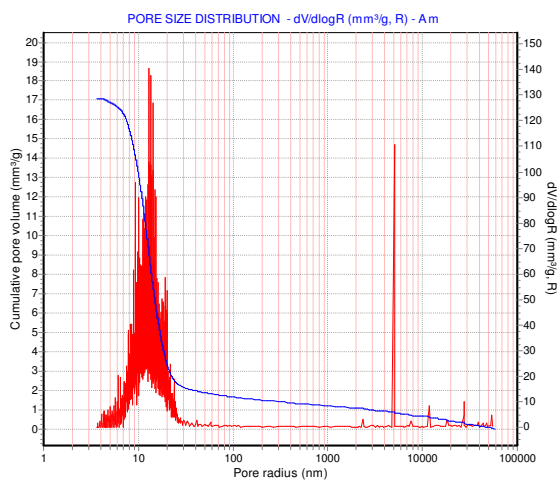
| Kalkstein  | Reindichten      | Mittlere Reindichte | Kalkstein | Reindichten      | Mittlere Reindichte |
|------------|------------------|---------------------|-----------|------------------|---------------------|
| A1         | 2,6859<br>2,6842 | 2,6851              | I1        | 2,8337<br>2,8306 | <b>2,8322</b>       |
| A2         | 2,692<br>2,6887  | 2,6904              | I2        | 2,7528<br>2,7544 | <b>2,7536</b>       |
| B1         | 2,715<br>2,7143  | 2,7147              | H         | 2,7053<br>2,7006 | <b>2,703</b>        |
| B2         | 2,7246<br>2,723  | 2,7238              | J1        | 2,7202<br>2,7221 | 2,7212              |
| B3 Probe 1 | 2,7836<br>2,7879 | 2,7858              | J2        | 2,7108<br>2,7117 | 2,7113              |
| B3 Probe 2 | 2,7395<br>2,74   | 2,7398              | J3        | 2,7120<br>2,7113 | 2,7117              |
| B4 Probe 1 | 2,7249<br>2,7236 | 2,7243              | J4        | 2,7256<br>2,7224 | 2,724               |
| B4 Probe 2 | 2,717<br>2,7137  | 2,7154              | J5        | 2,712<br>2,7101  | 2,7111              |
| B5 Probe 1 | 2,7965<br>2,8037 | 2,8001              | J6        | 2,7157<br>2,7156 | 2,7157              |
| B5 Probe 2 | 2,7942<br>2,797  | 2,7956              | P1        | 2,7463<br>2,7468 | <b>2,7466</b>       |
| B6         | 2,3445<br>2,3449 | <b>2,3447</b>       | P2        | 2,8717<br>2,8707 | <b>2,8712</b>       |
| D1         | 2,7152<br>2,7148 | <b>2,715</b>        | Y1        | 2,6707<br>2,6684 | 2,6696              |
| D2         | 2,7136<br>2,7164 | <b>2,715</b>        | Y2        | 2,7059<br>2,7064 | 2,7062              |
| G1         | 2,7123<br>2,7116 | <b>2,712</b>        | Y3        | 2,7136<br>2,7134 | 2,7135              |
| G2         | 2,7875<br>2,7886 | <b>2,7881</b>       | Y4        | 2,7088<br>2,7092 | 2,7090              |

## 9.5 Porositäten und Porengrößenverteilungen

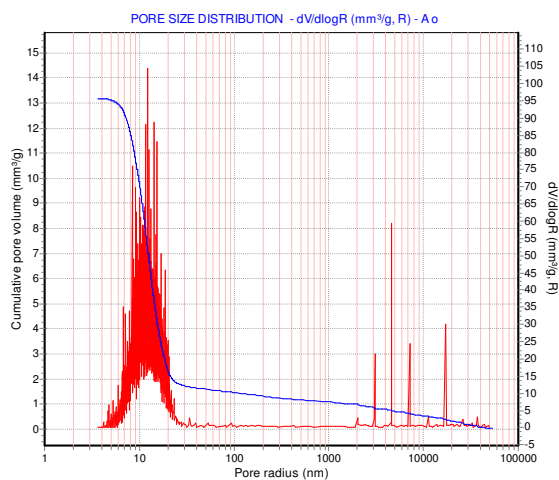
### Porositäten

| <b>Kalkstein</b> | <b>Porositäten</b> | <b>Kalkstein</b> | <b>Porositäten</b> | <b>Kalkstein</b> | <b>Porositäten</b> |
|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| A1               | 4,38               | B6               | 2,03               | J1               | 3,13               |
| A2               | 3,42               | D1               | 0,39               | J2               | 1,29               |
| B1               | 1,76               | D2               | 0,6                | J3               | 3,71               |
| B2               | 0,53               | G1               | 9,34               | J4               | 1,33               |
| B3 Probe 1       | 1,19               | G2               | 2,56               | J5               | 4,12               |
| B3 Probe 2       | 1,52               | H                | 2,84               | J6               | 5,12               |
| B4 Probe 1       | 0,68               | I1               | 3,49               | Y1               | 21,98              |
| B4 Probe 2       | 0,52               | I2               | 0,58               | Y2               | 7,99               |
| B5 Probe 1       | 0,5                | P1               | 2,76               | Y3               | 1,43               |
| B5 Probe 2       | 0,45               | P2               | 15,27              | Y4               | 21,74              |

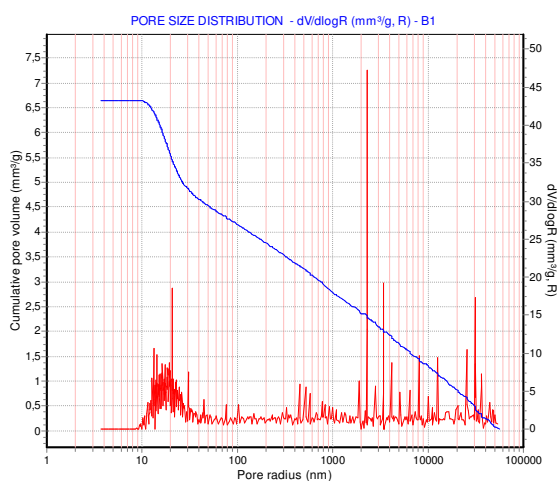
## Porengrößenverteilungen



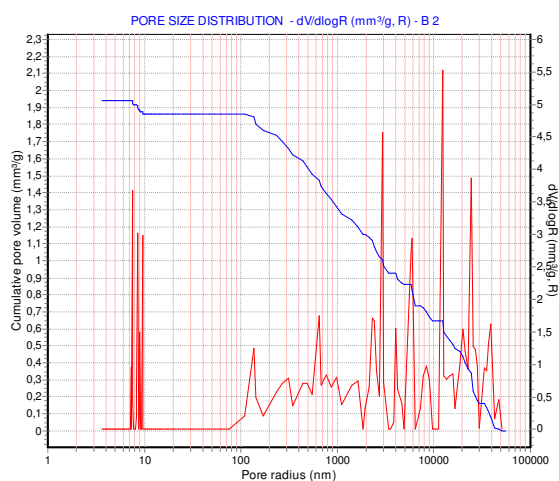
9.59: Porengrößenverteilung des Handstückes A1



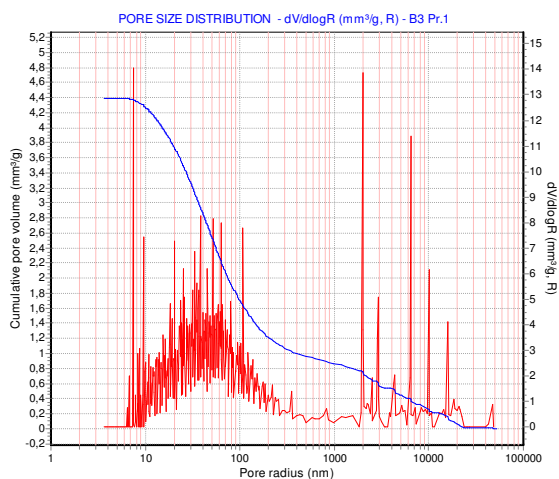
9.60: Porengrößenverteilung des Handstückes A2



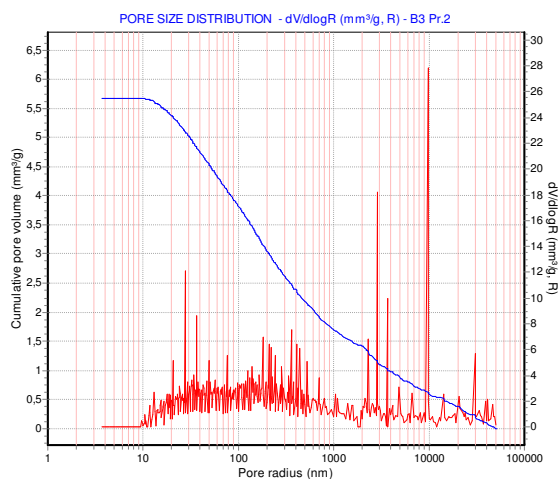
9.61: Porengrößenverteilung des Handstückes B1



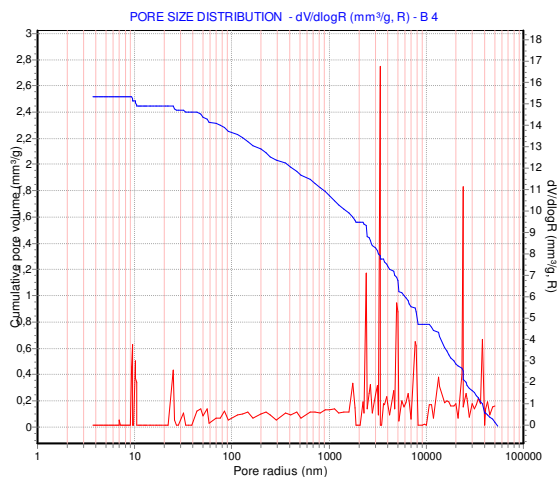
9.62: Porengrößenverteilung des Handstückes B2



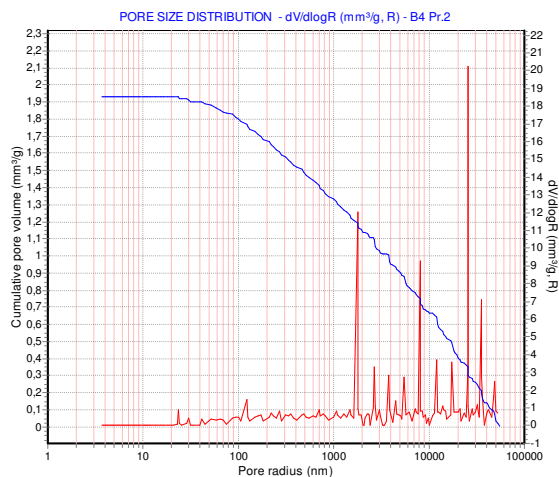
9.63: Porengrößenverteilung des Handstückes B3Pr.1



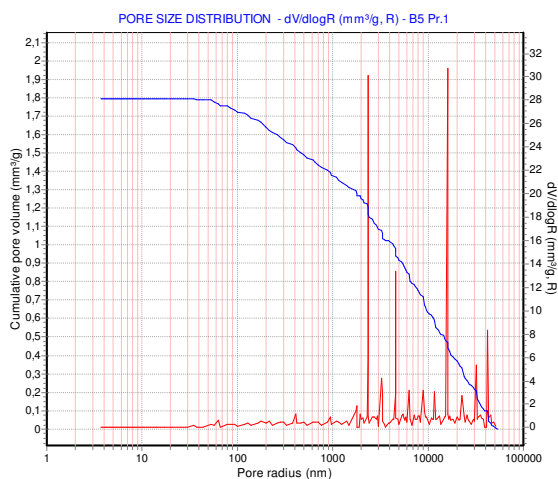
9.64: Porengrößenverteilung des Handstückes B3Pr.2



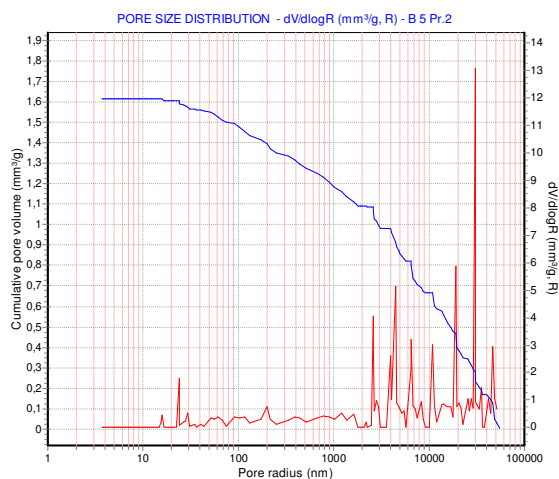
9.65: Porengrößenverteilung des Handstückes B4Pr.1



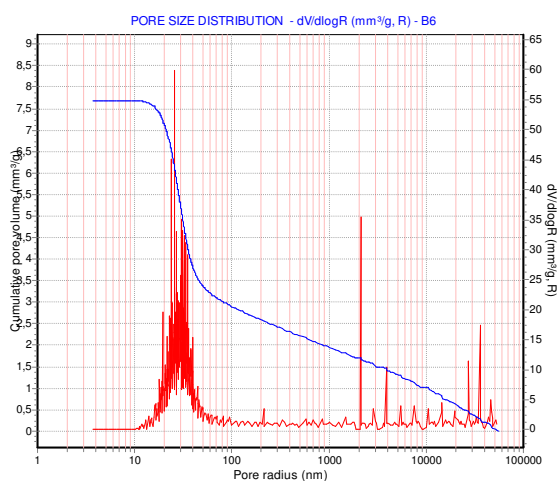
9.66: Porengrößenverteilung des Handstückes B4Pr.2



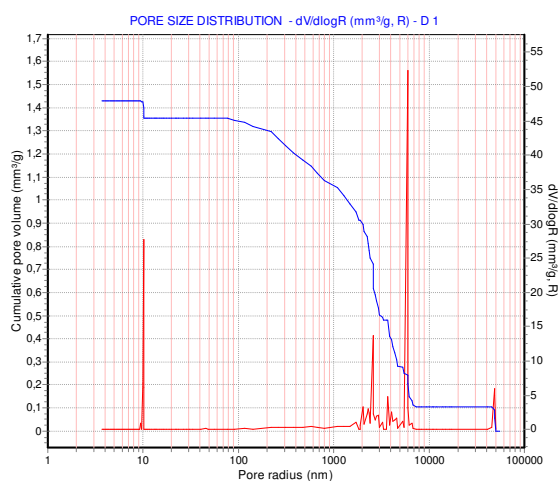
9.67: Porengrößenverteilung des Handstückes B5Pr.1



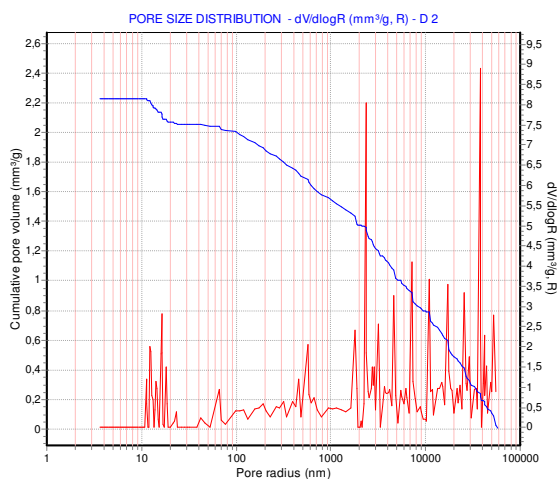
9.68: Porengrößenverteilung des Handstückes B5Pr.2



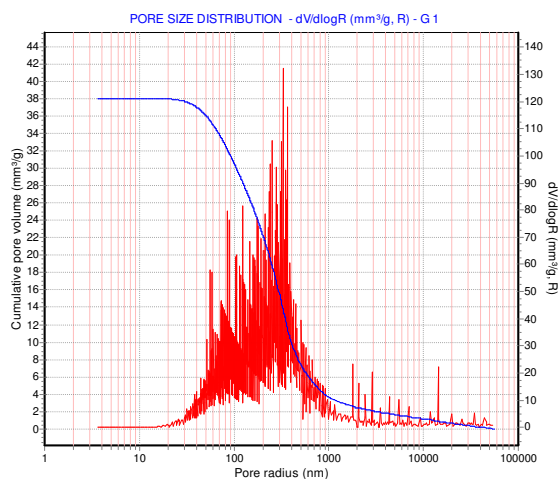
9.69: Porengrößenverteilung des Handstückes B6



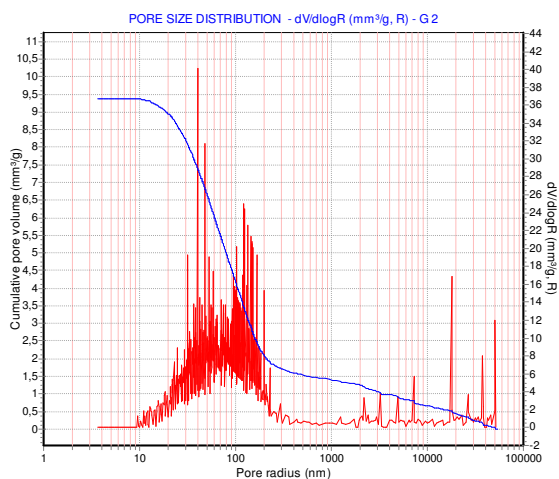
9.70: Porengrößenverteilung des Handstückes D1



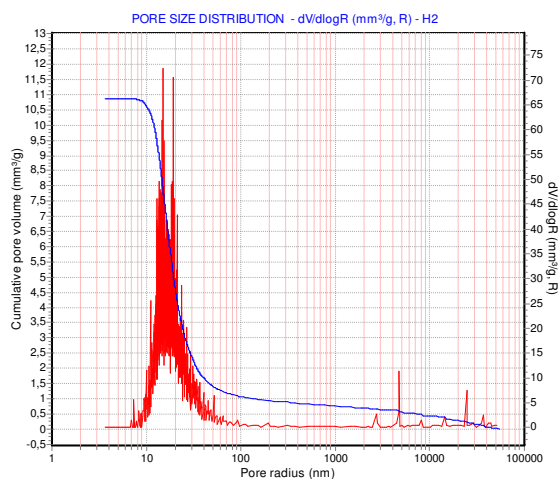
9.71: Porengrößenverteilung des Handstückes D2



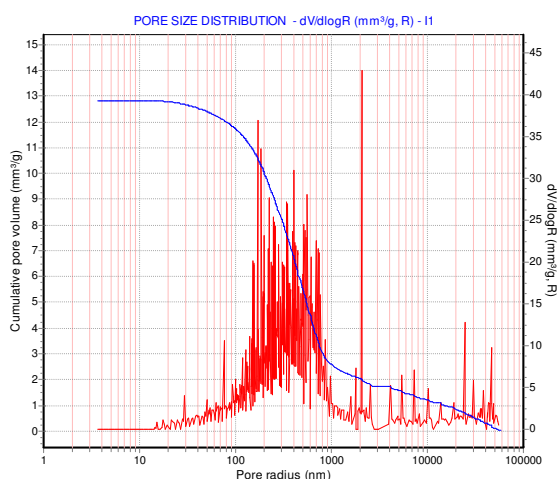
9.72: Porengrößenverteilung des Handstückes G1



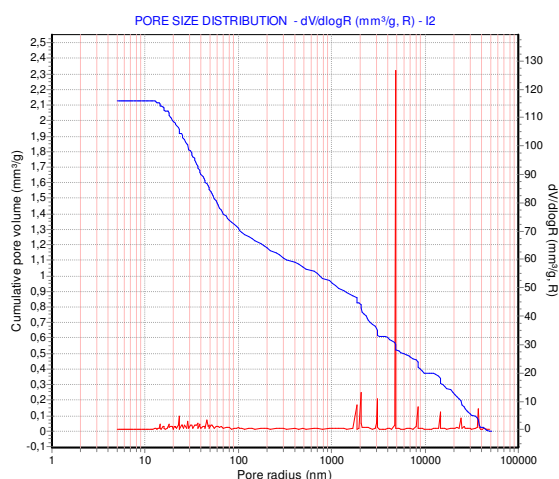
9.73: Porengrößenverteilung des Handstückes G2



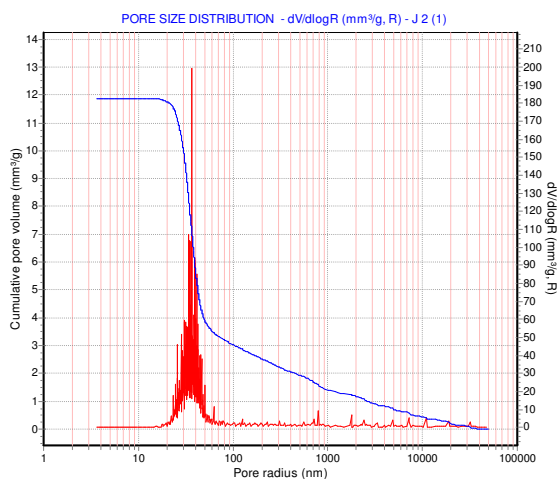
9.74: Porengrößenverteilung des Handstückes H



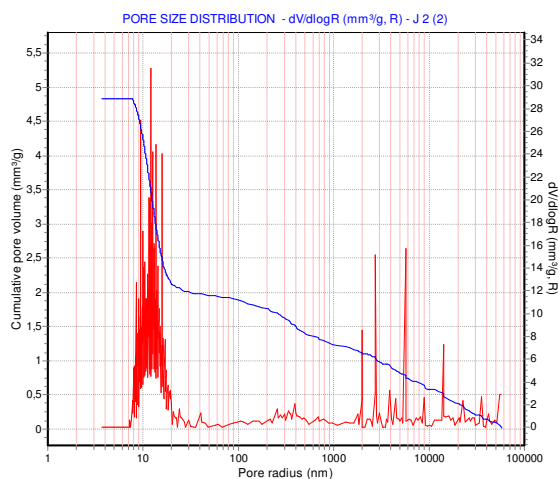
9.75: Porengrößenverteilung des Handstückes I1



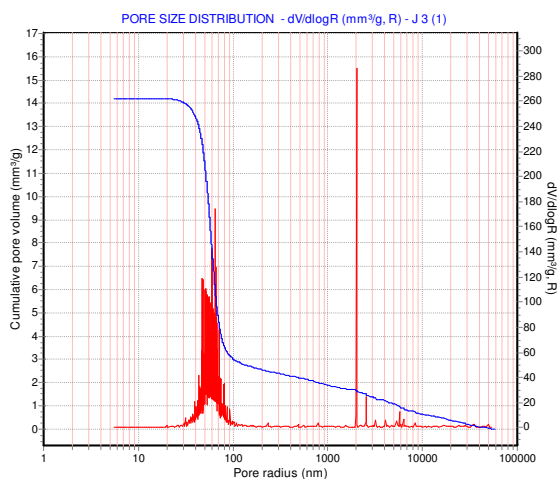
9.76: Porengrößenverteilung des Handstückes I2



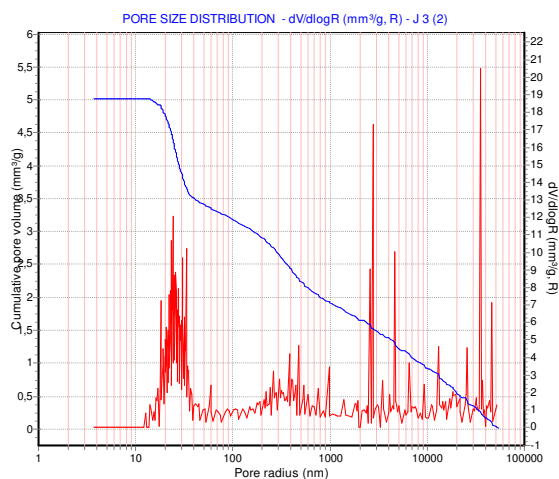
9.77: Porengrößenverteilung des Handstückes J1



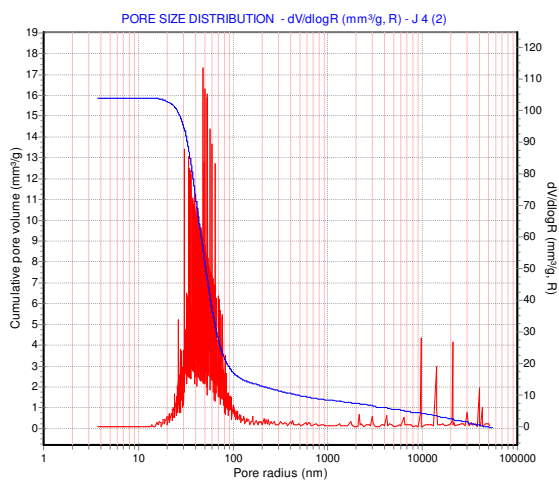
9.78: Porengrößenverteilung des Handstückes J2



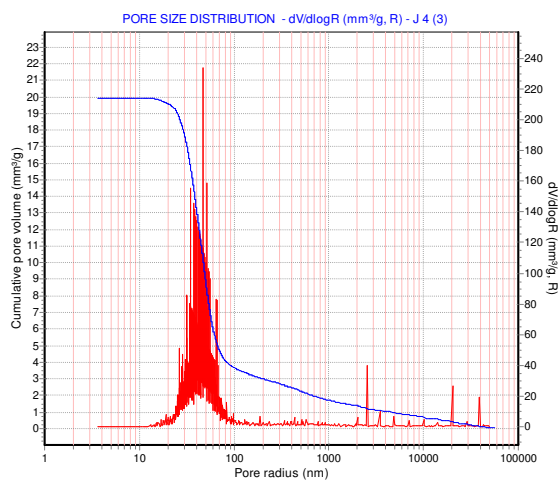
9.79: Porengrößenverteilung des Handstückes J3



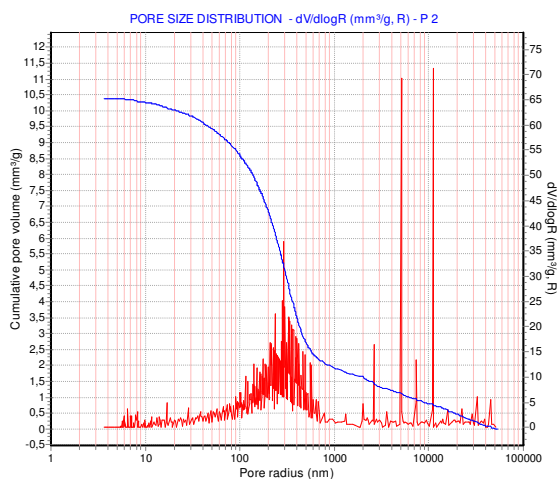
9.80: Porengrößenverteilung des Handstückes J4



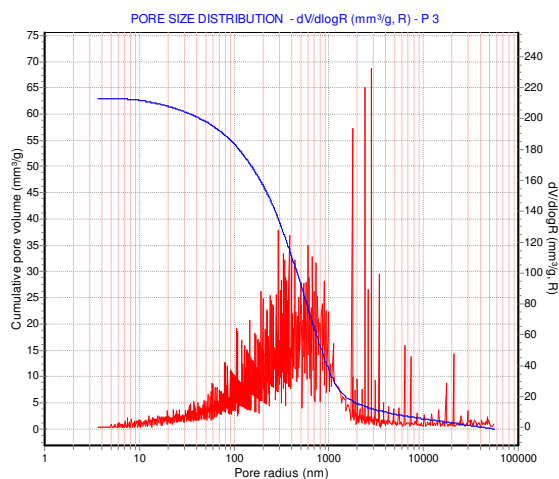
9.81: Porengrößenverteilung des Handstückes J5



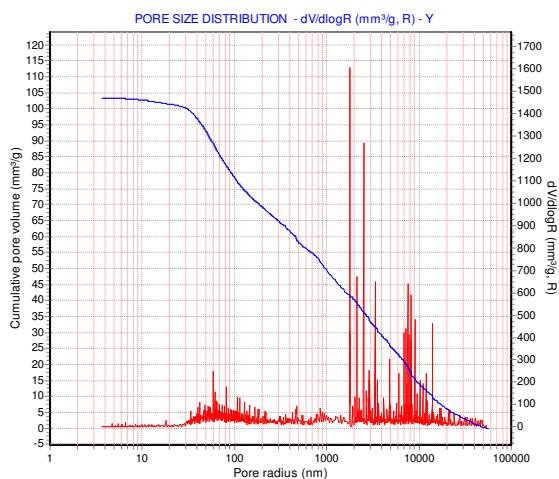
9.82: Porengrößenverteilung des Handstückes J6



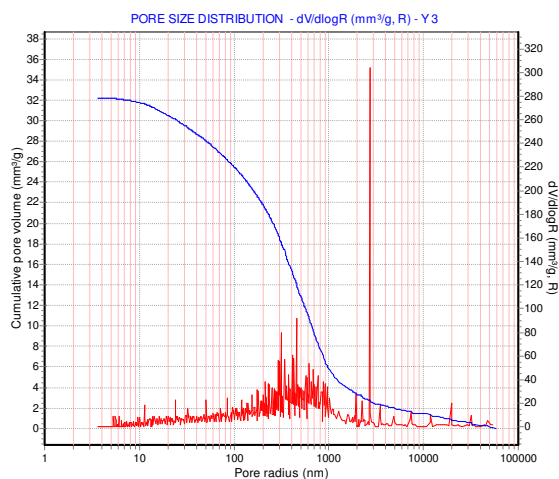
9.83: Porengrößenverteilung des Handstückes P1



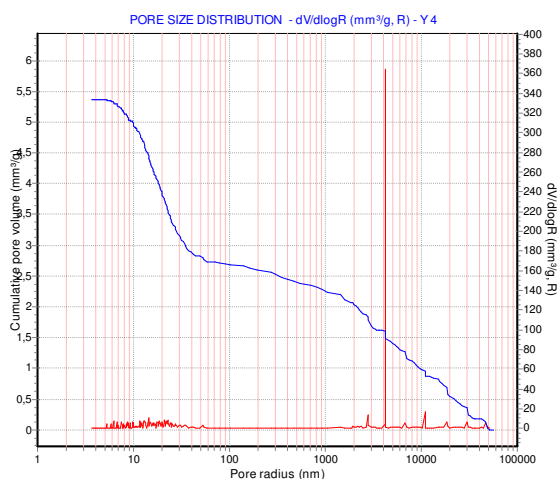
9.84: Porengrößenverteilung des Handstückes P2



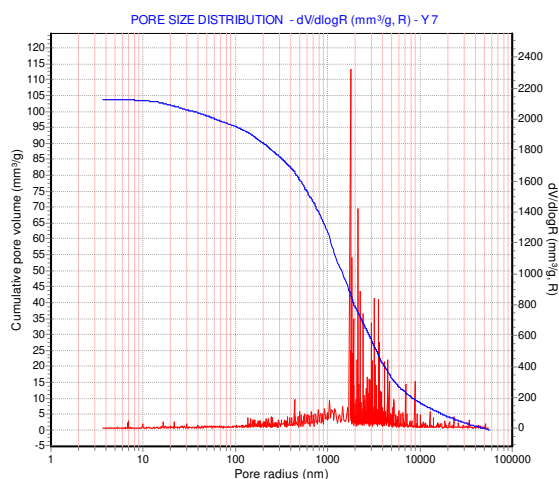
9.85: Porengrößenverteilung des Handstückes Y1



9.86: Porengrößenverteilung des Handstückes Y2



9.87: Porengrößenverteilung des Handstückes Y3



9.88: Porengrößenverteilung des Handstückes Y4

## 9.6 Dilatogramme

### Ausdehnungskurven der Vorversuche

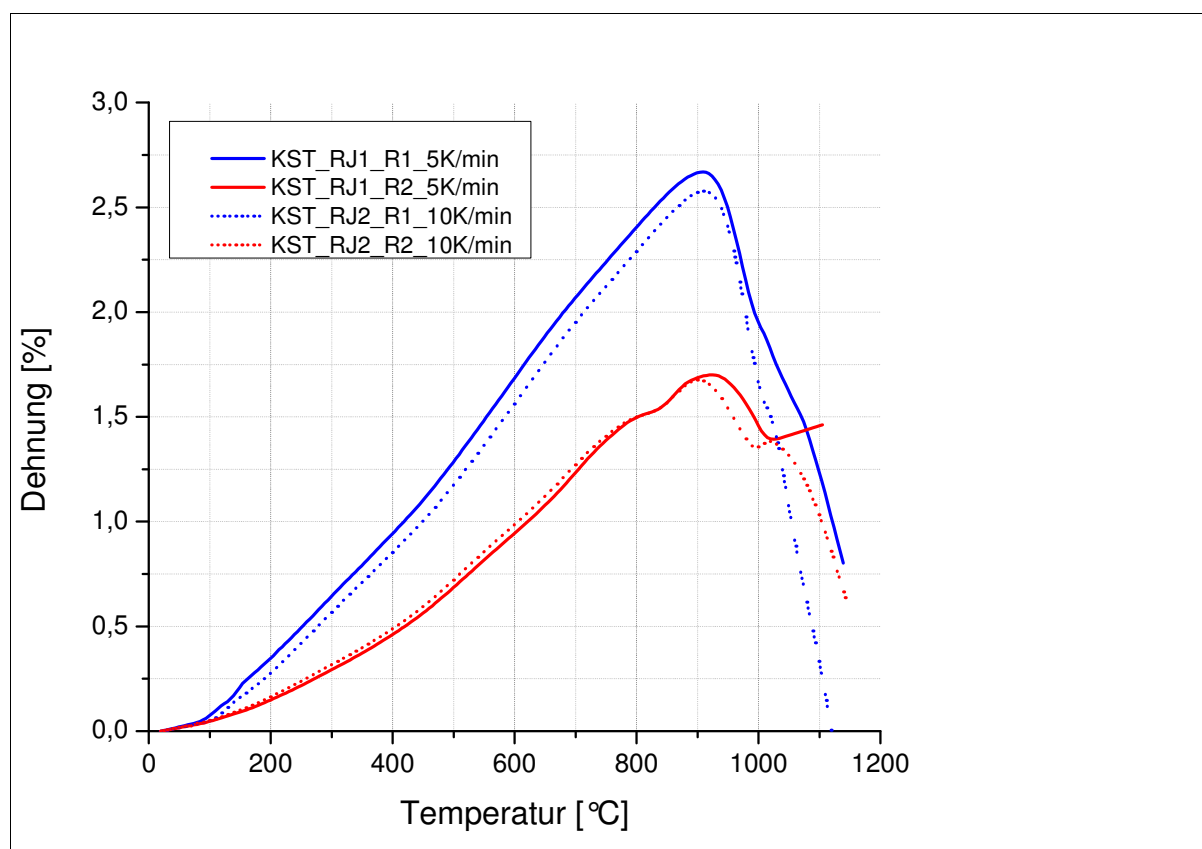


Abbildung 9.89: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke R1 und R2

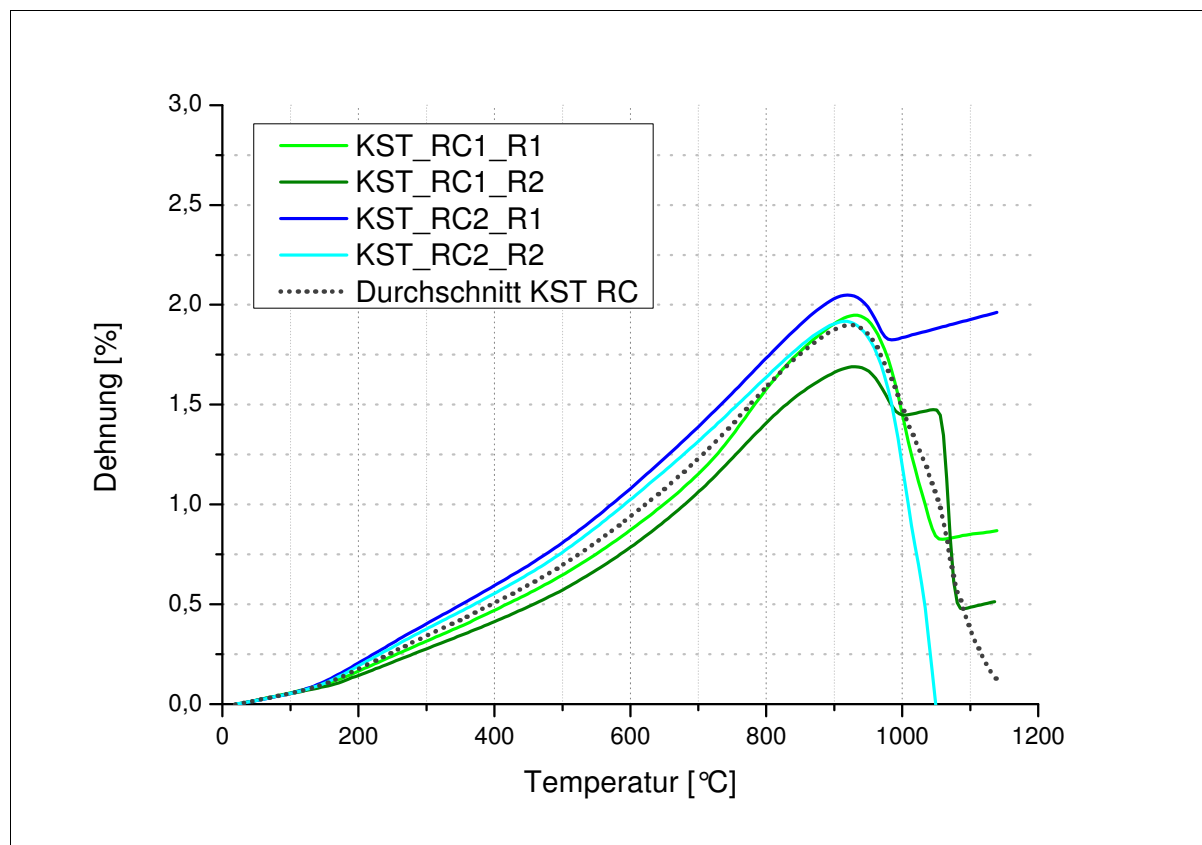


Abbildung 9.90: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RC1 und RC2

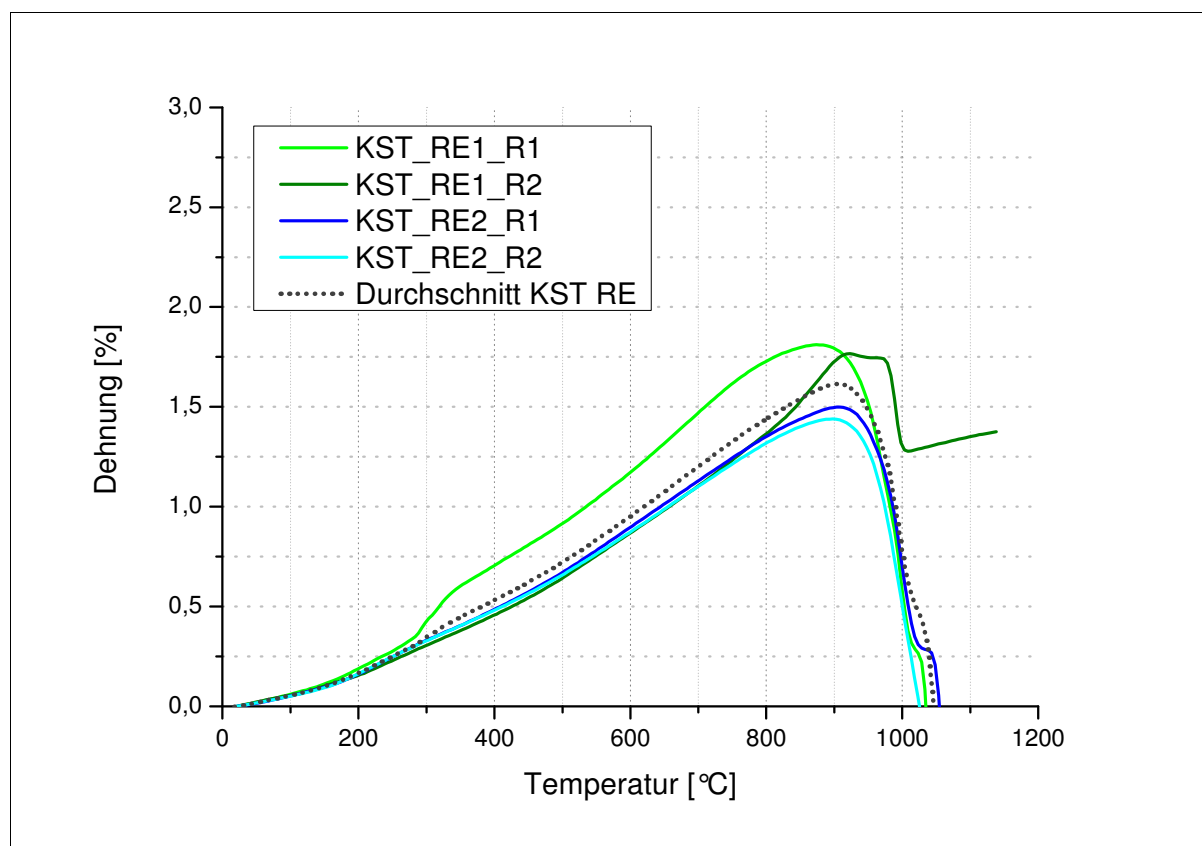


Abbildung 9.91: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RE1 und RE2

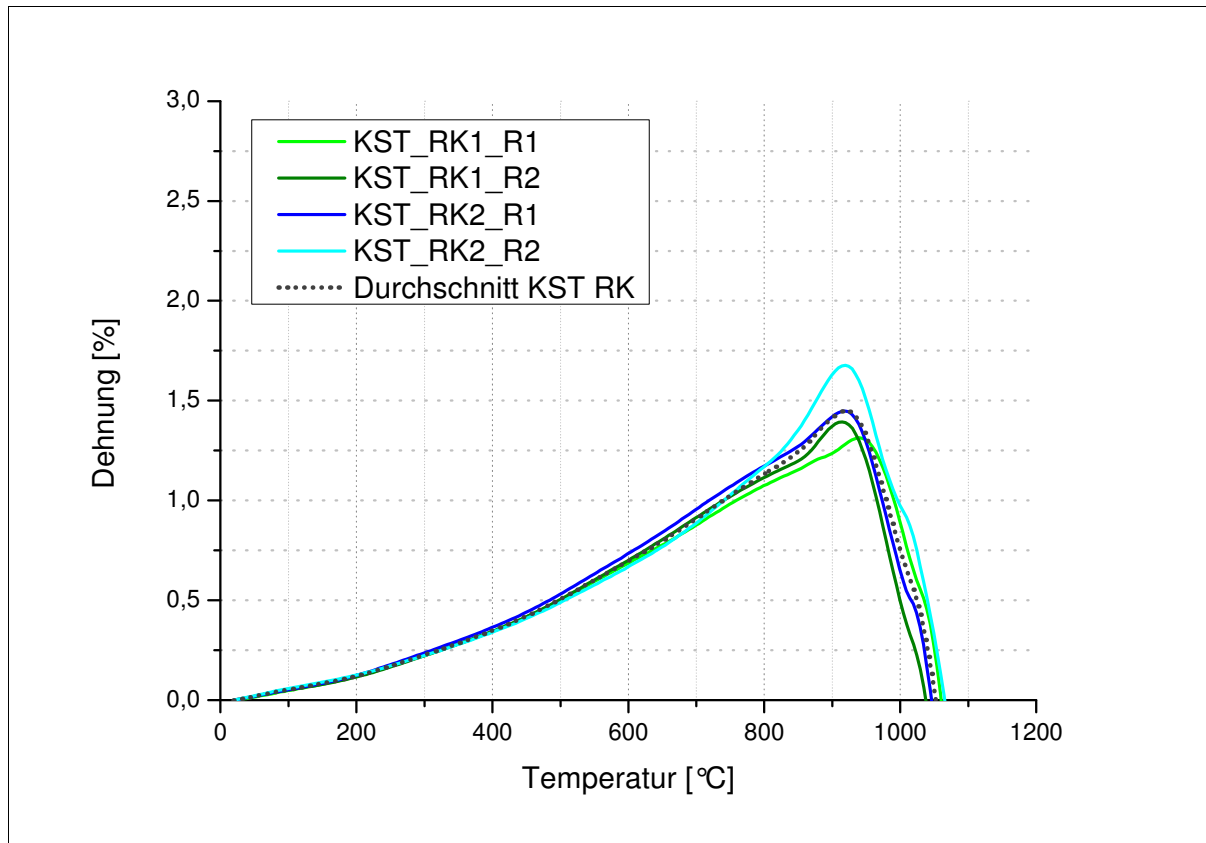


Abbildung 9.92: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RK1 und RK2

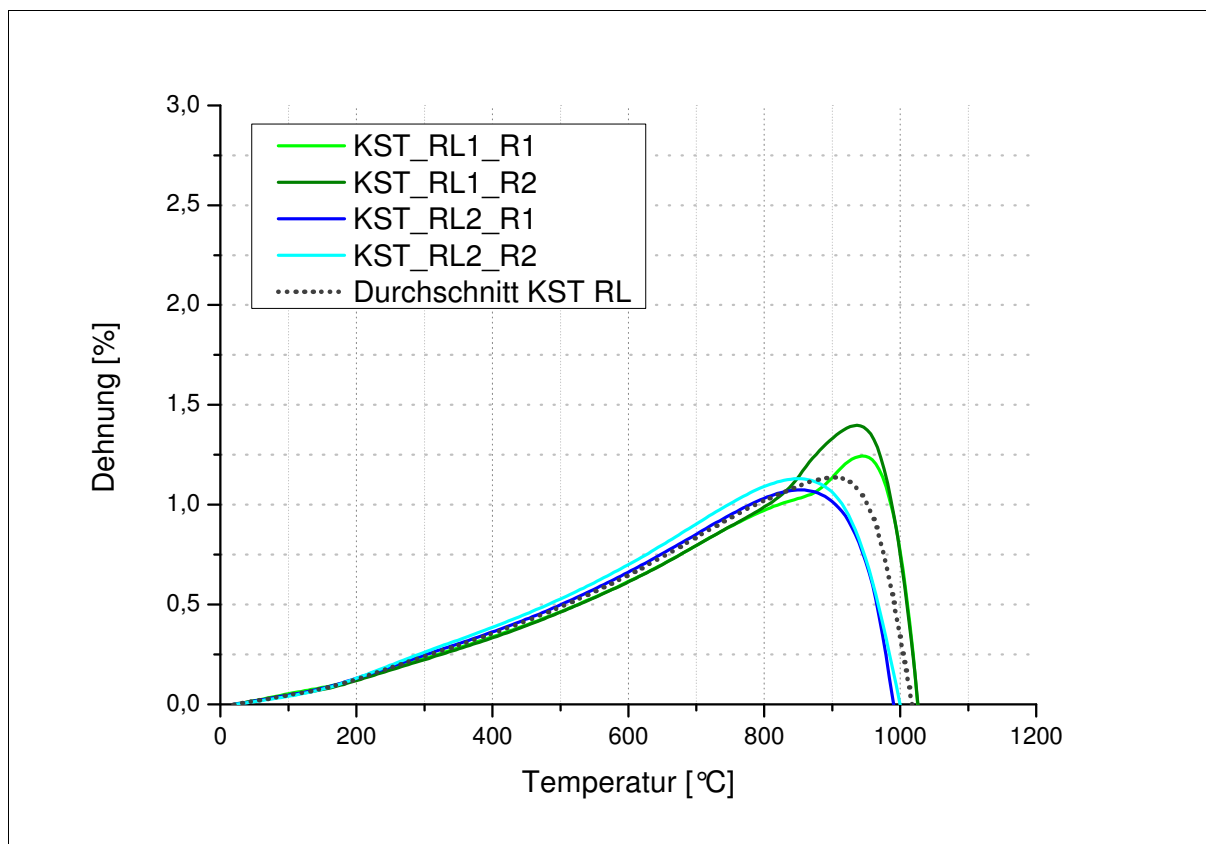


Abbildung 9.93: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RL1 und RL2

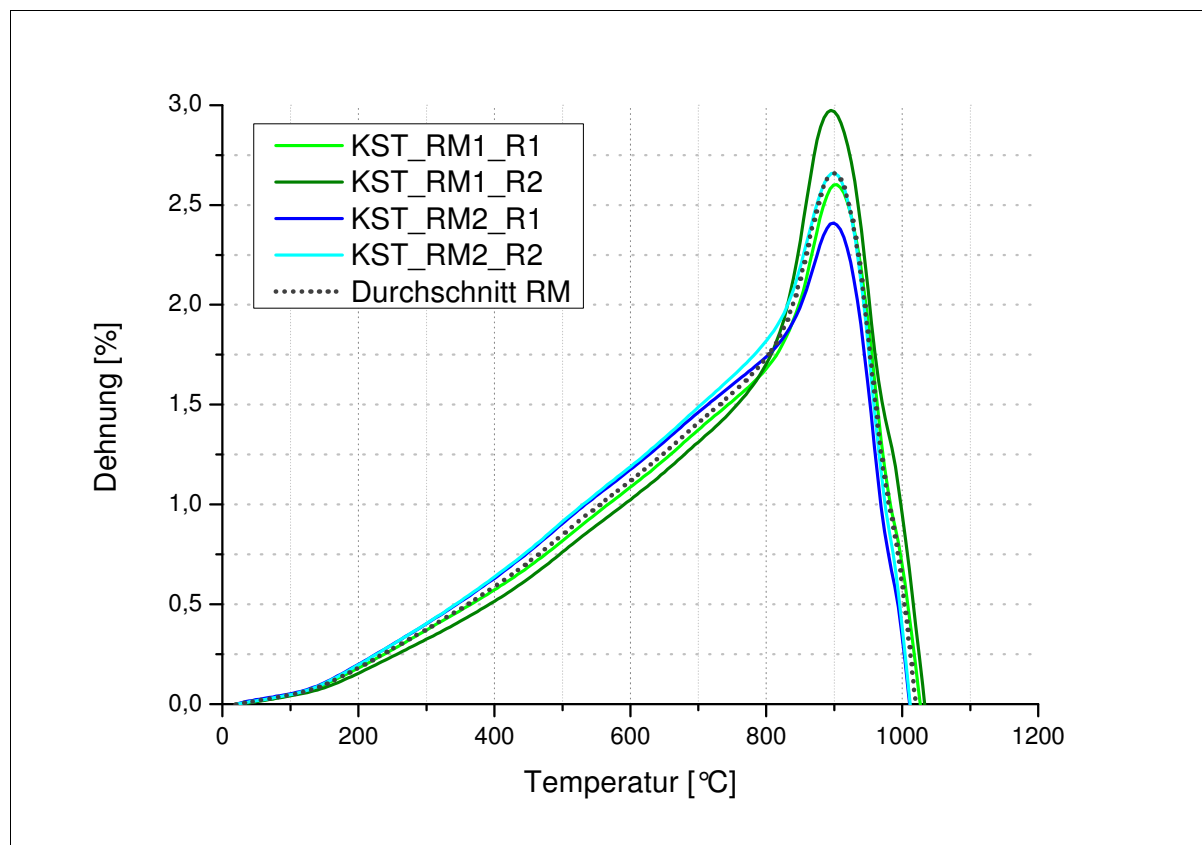


Abbildung 9.94: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RM1 und RM2

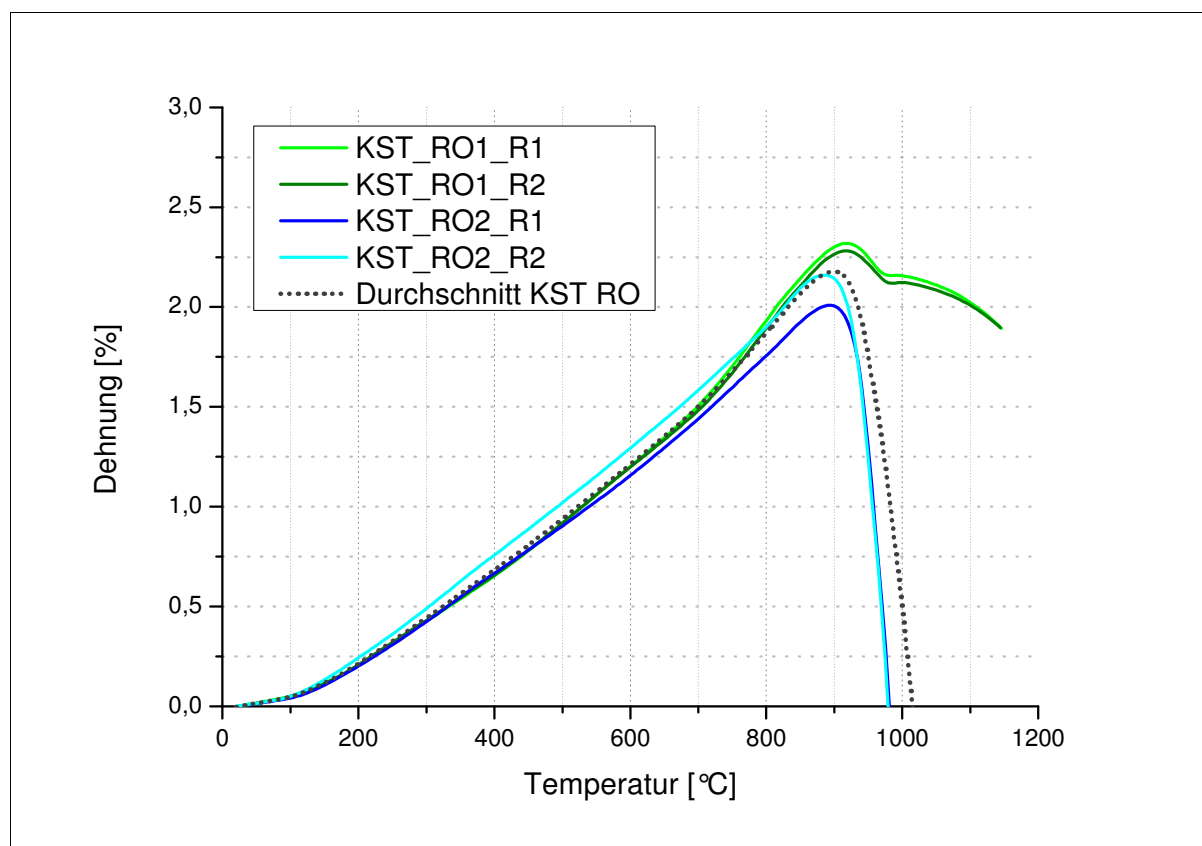


Abbildung 9.95: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RO1 und RO2

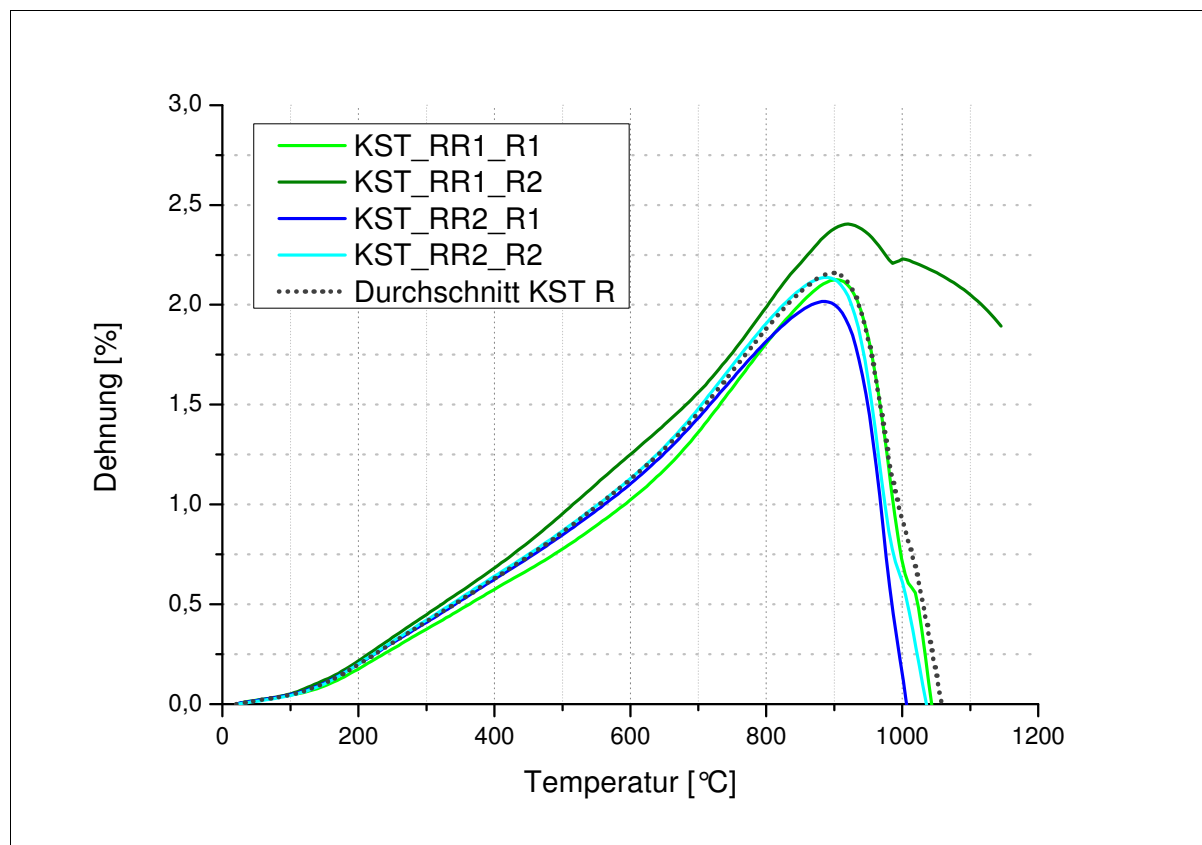


Abbildung 9.96: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RR1 und RR2

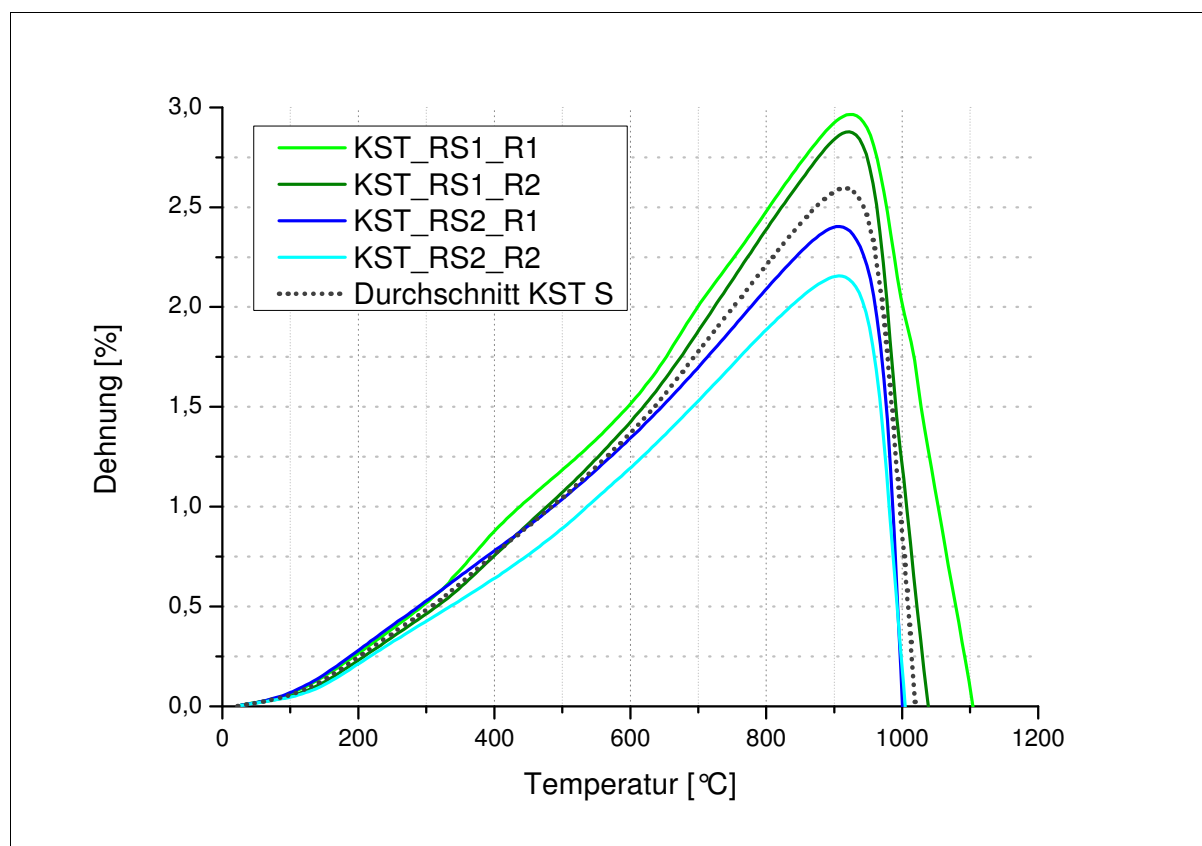


Abbildung 9.97: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RS1 und RS2

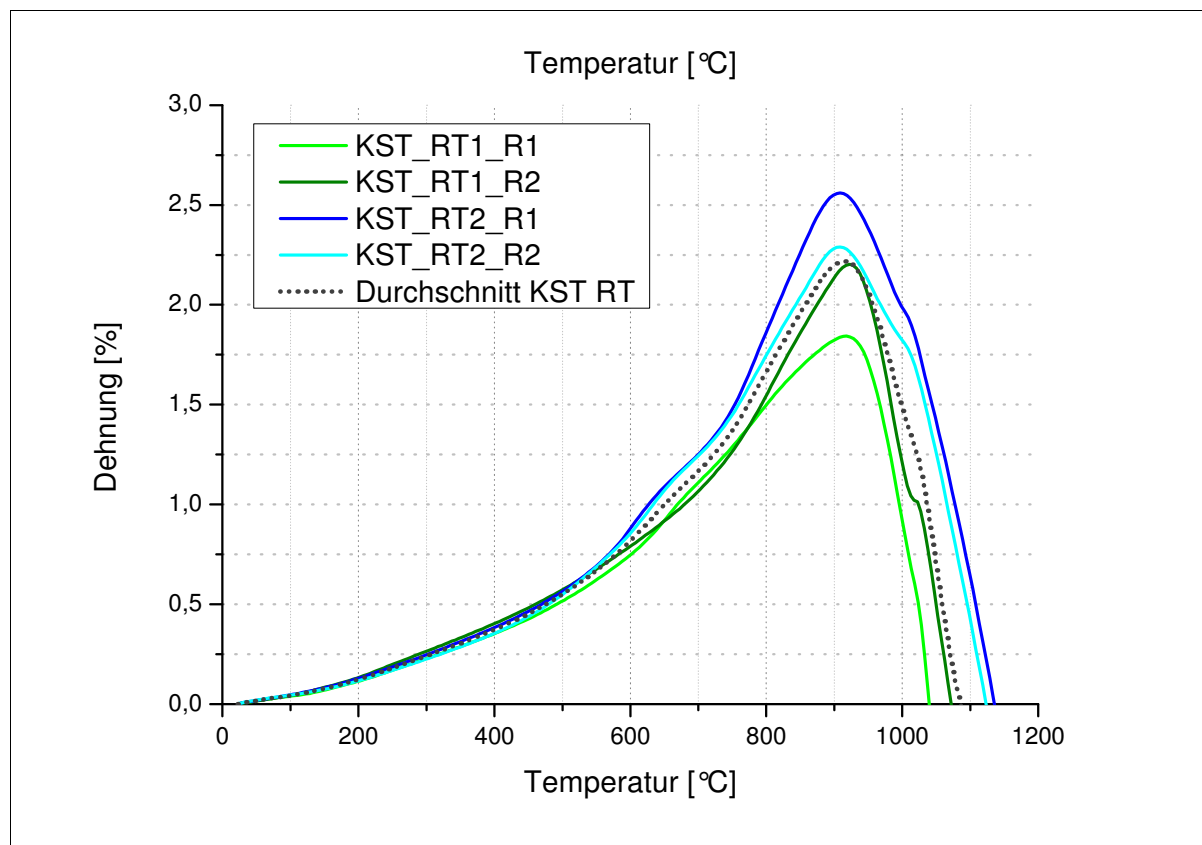


Abbildung 9.98: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RT1 und RT2

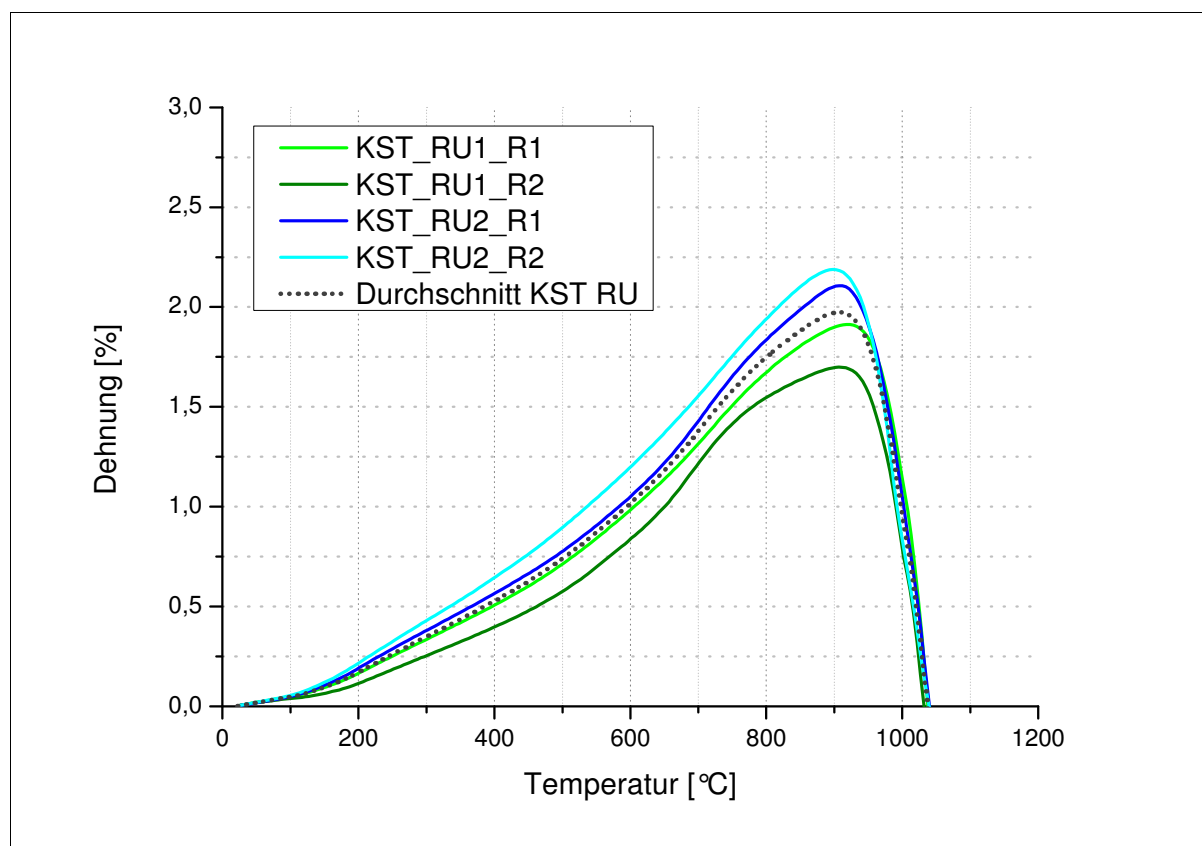


Abbildung 9.99: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RU1 und RU2

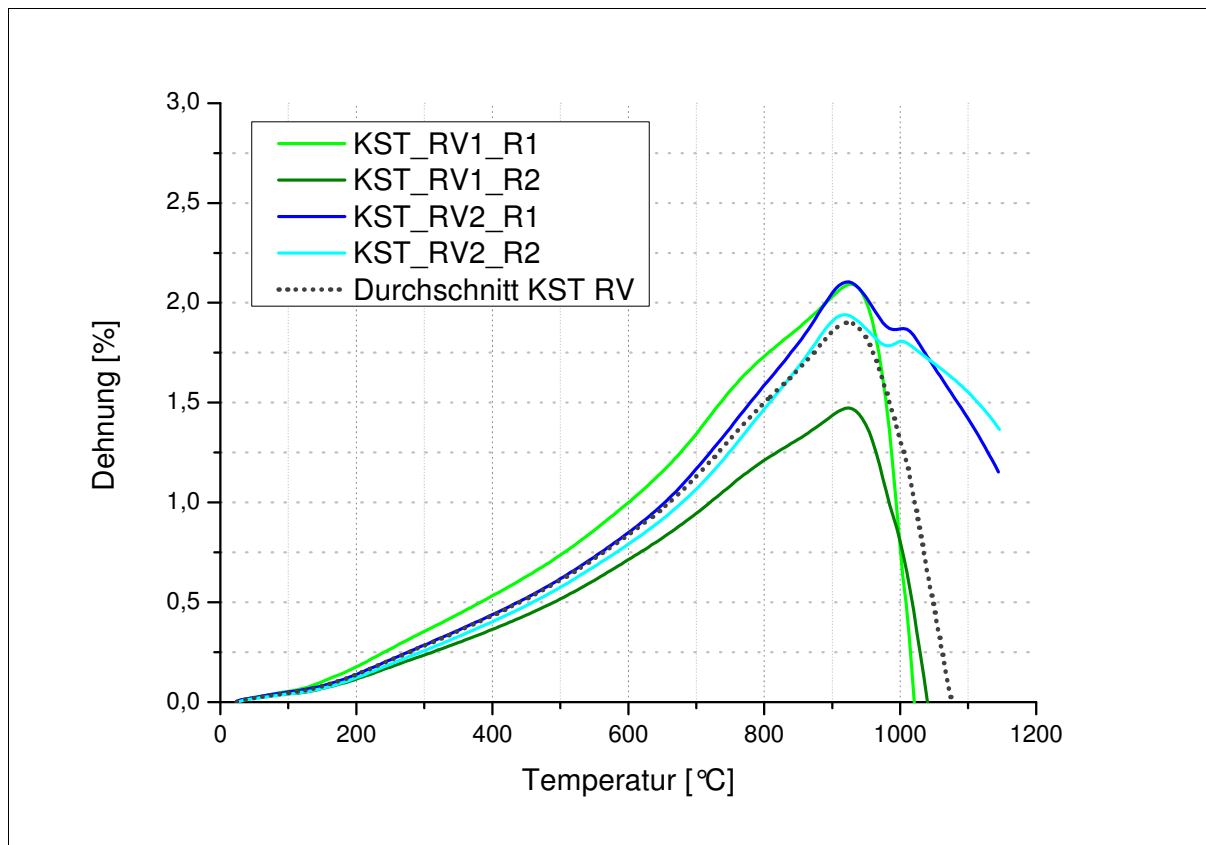


Abbildung 9.100: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RV1 und RV2

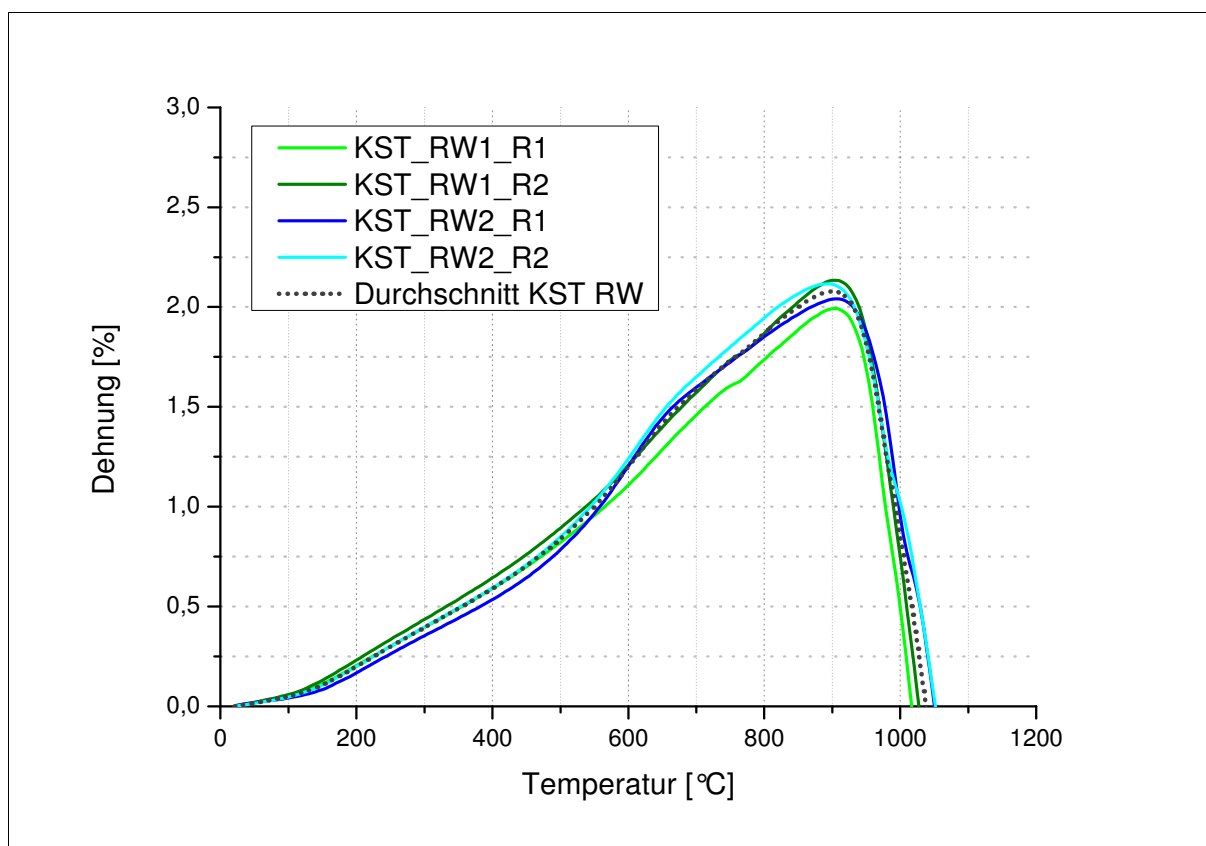


Abbildung 9.101: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke RW1 und RW2

## Ausdehnungskurven der neu beprobten Lagerstätten

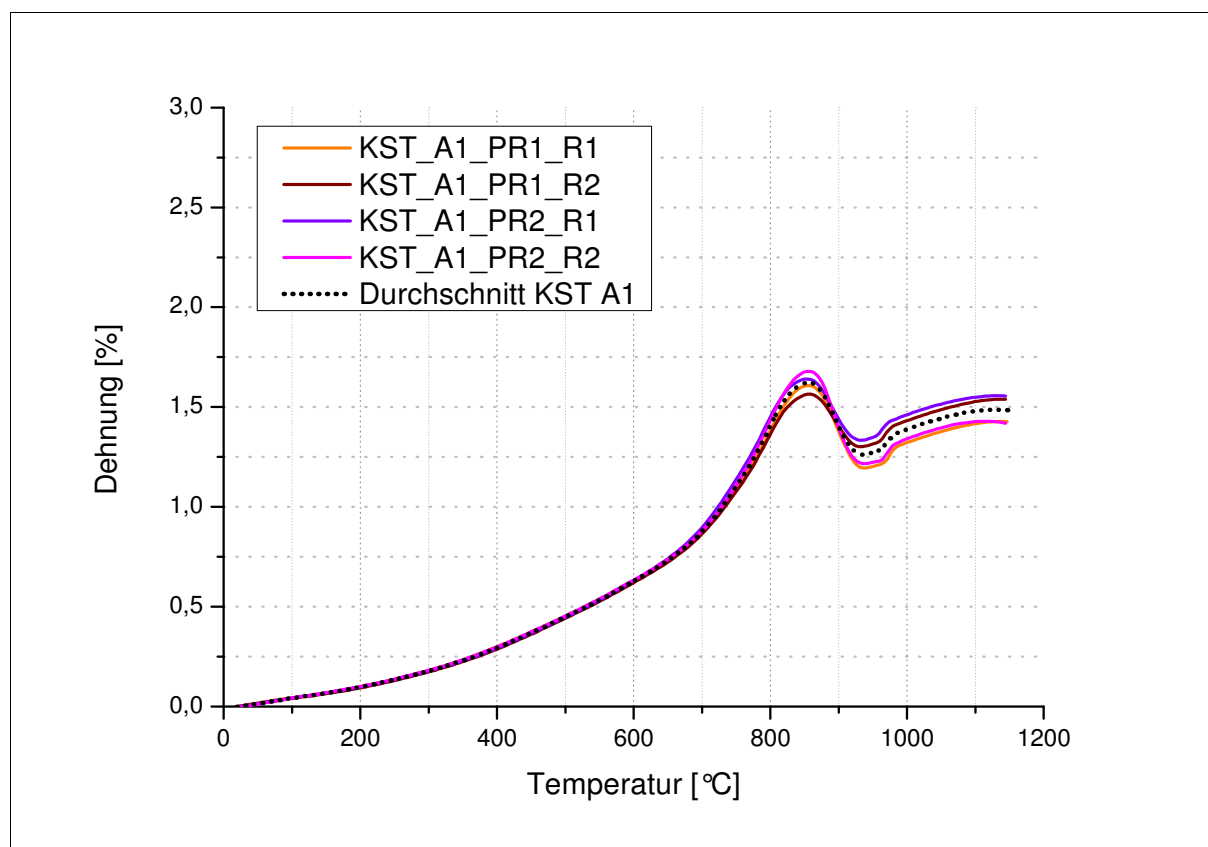


Abbildung 9.102: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke A1

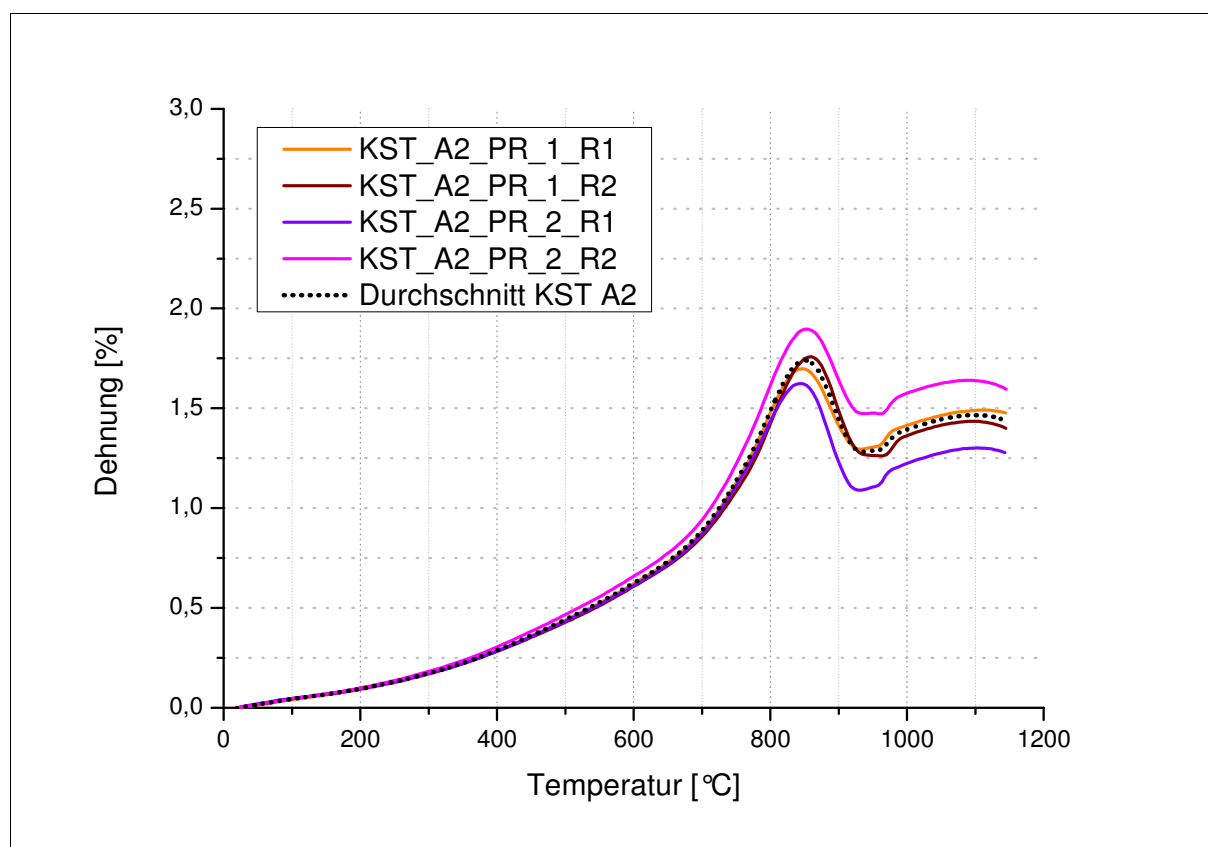


Abbildung 9.103: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke A2

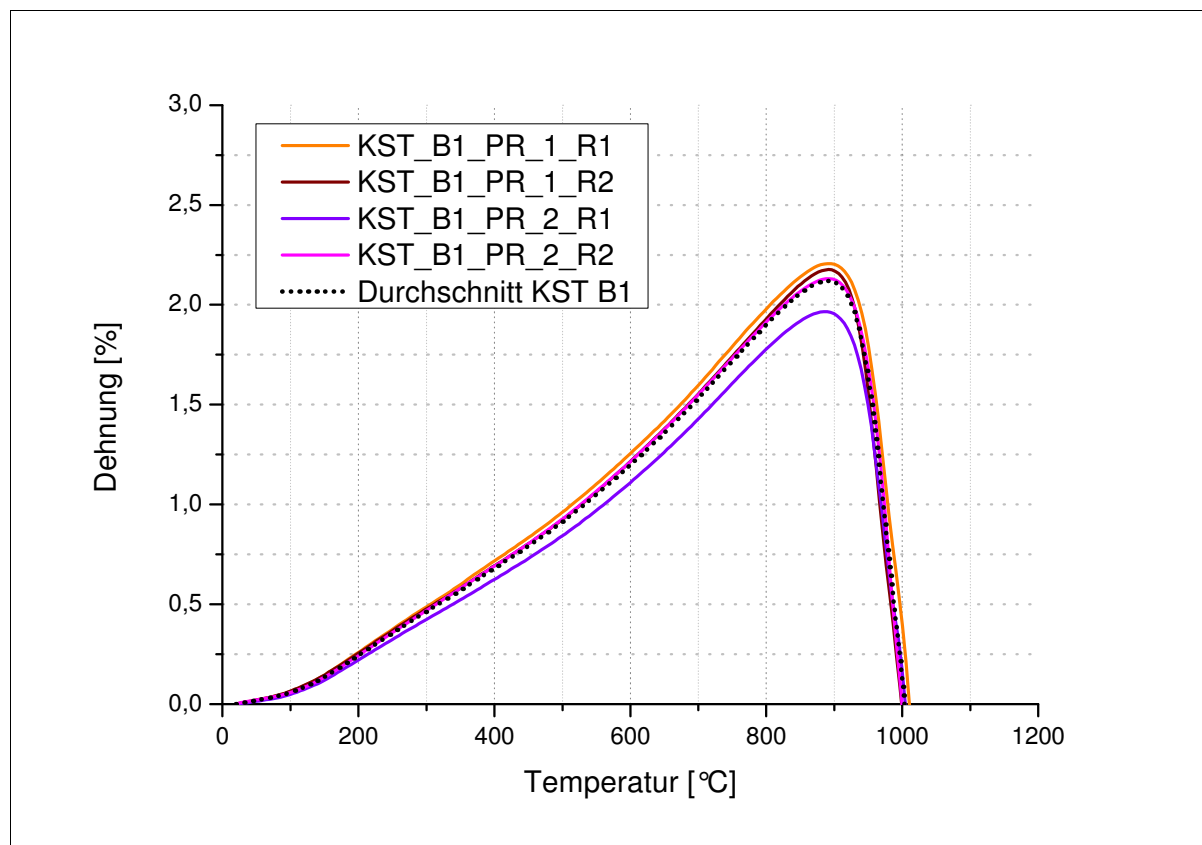


Abbildung 9.104: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B1

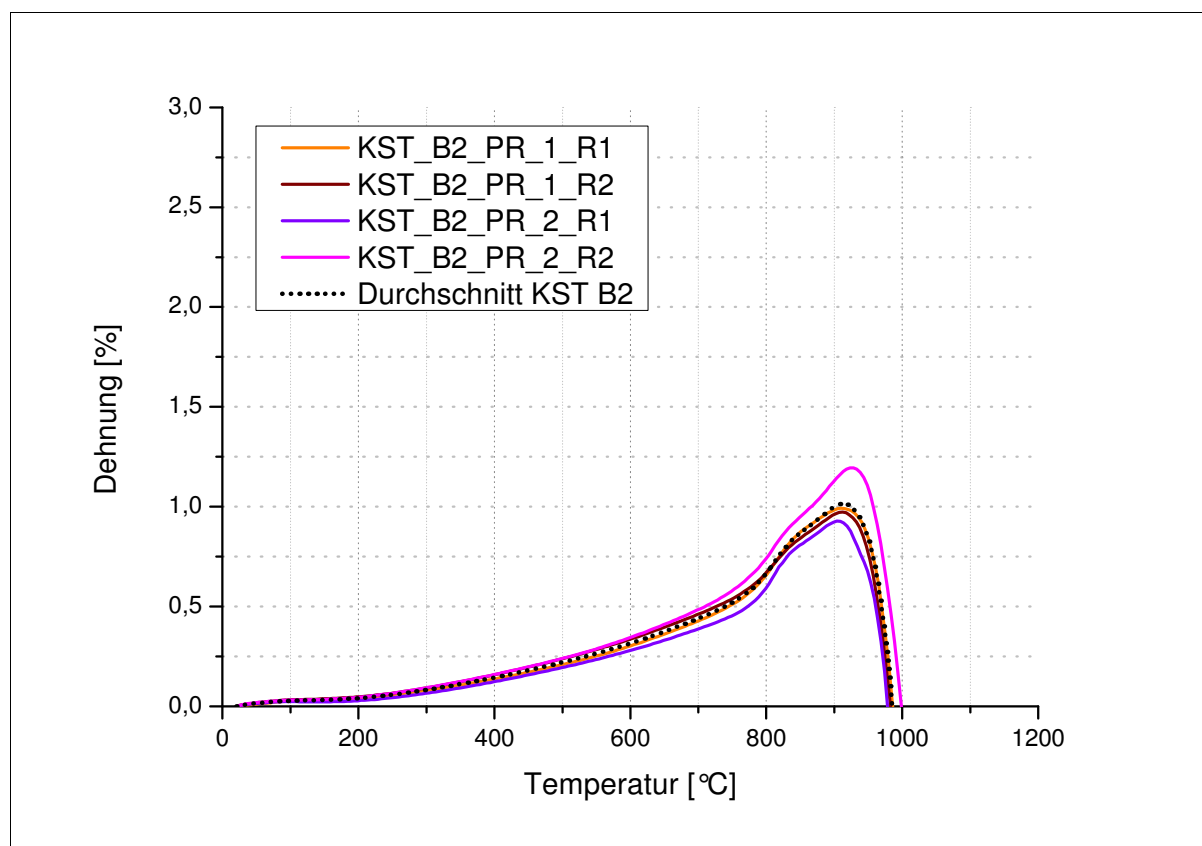


Abbildung 9.105: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B2

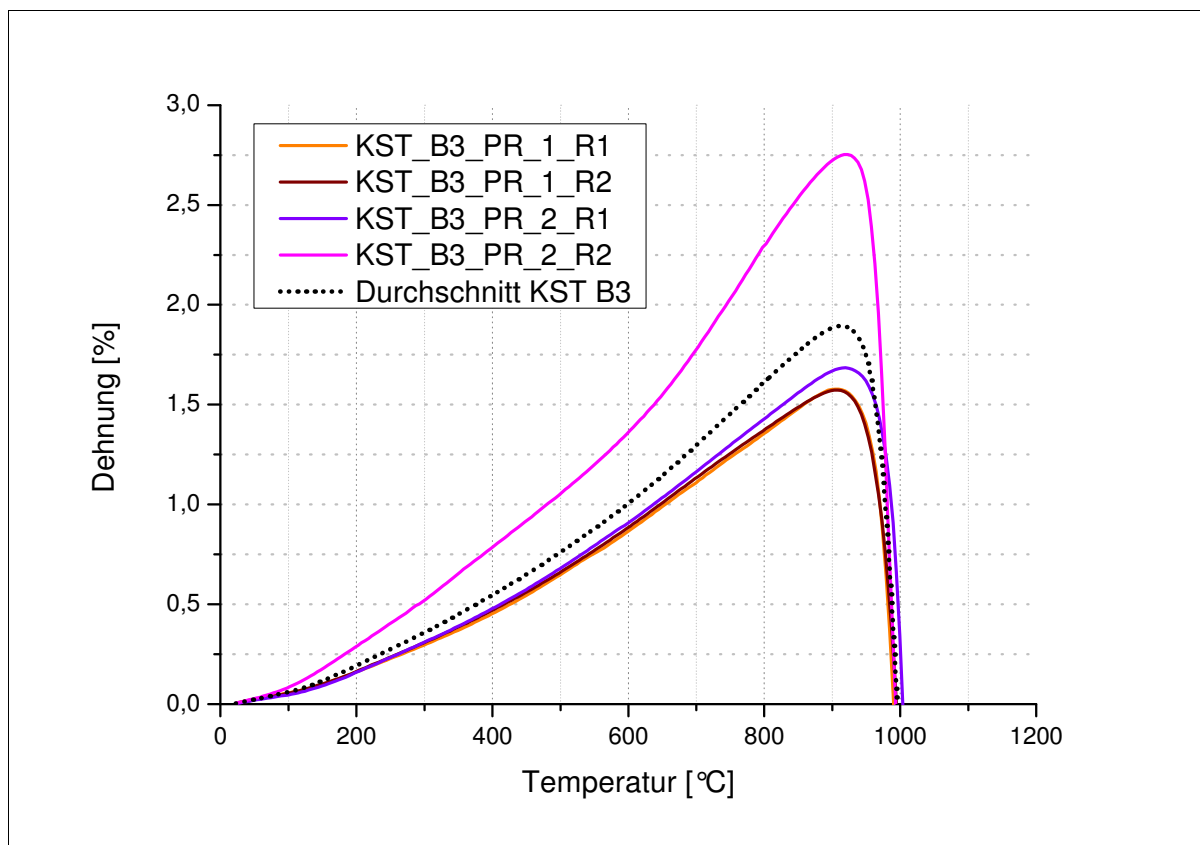


Abbildung 9.106: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B3

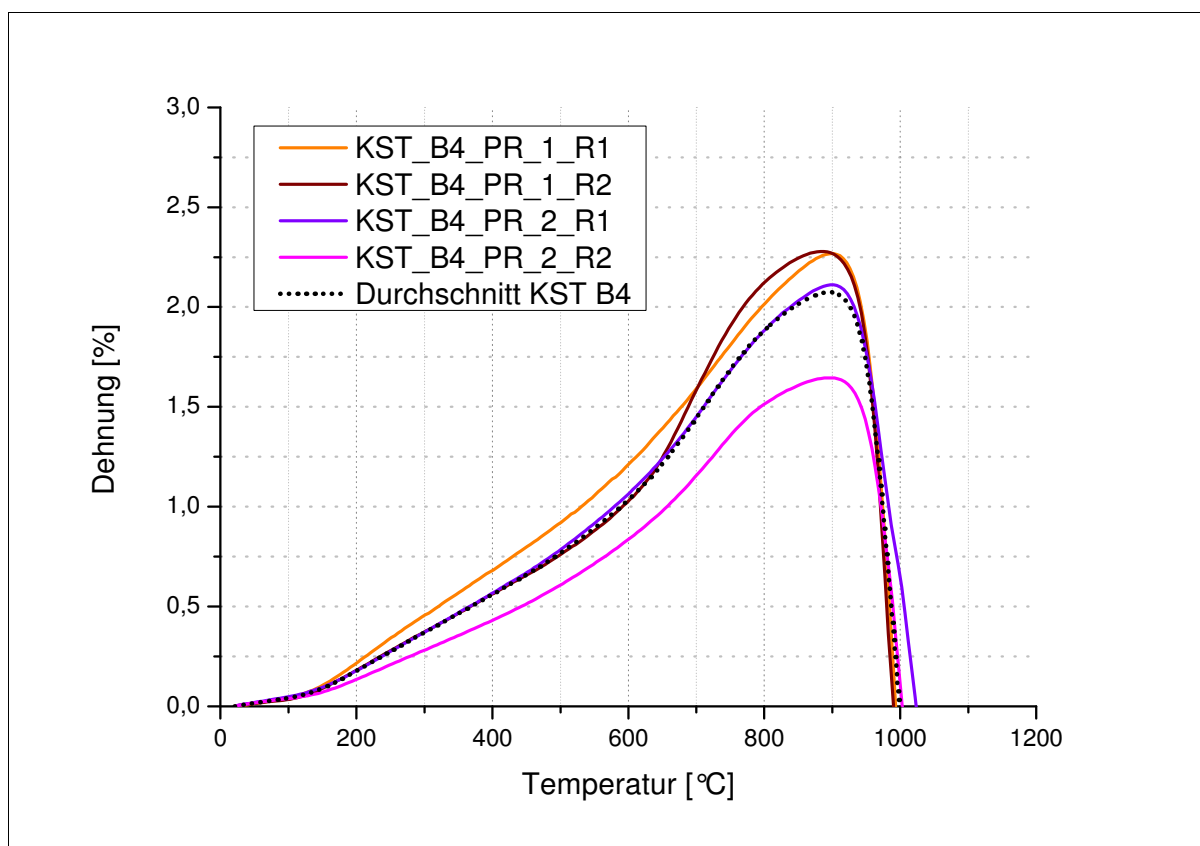


Abbildung 9.107: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B4

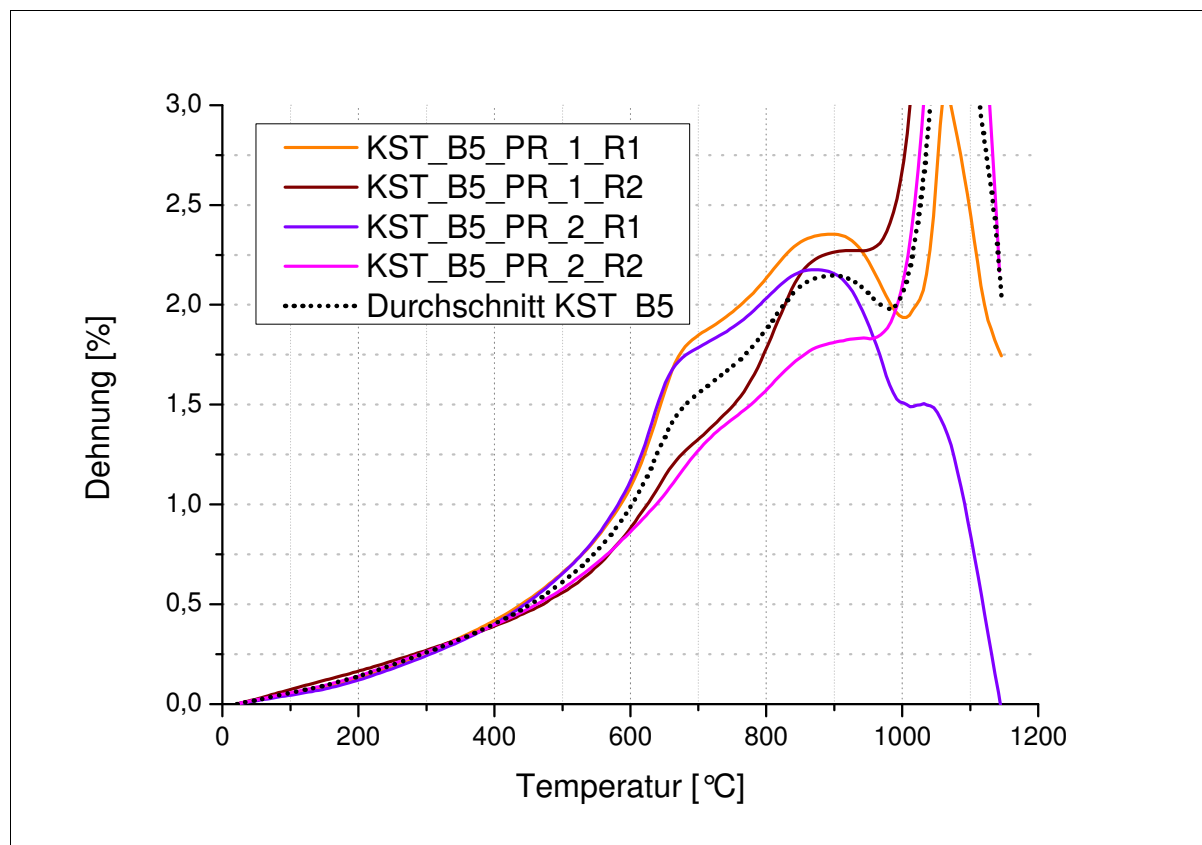


Abbildung 9.108: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B5

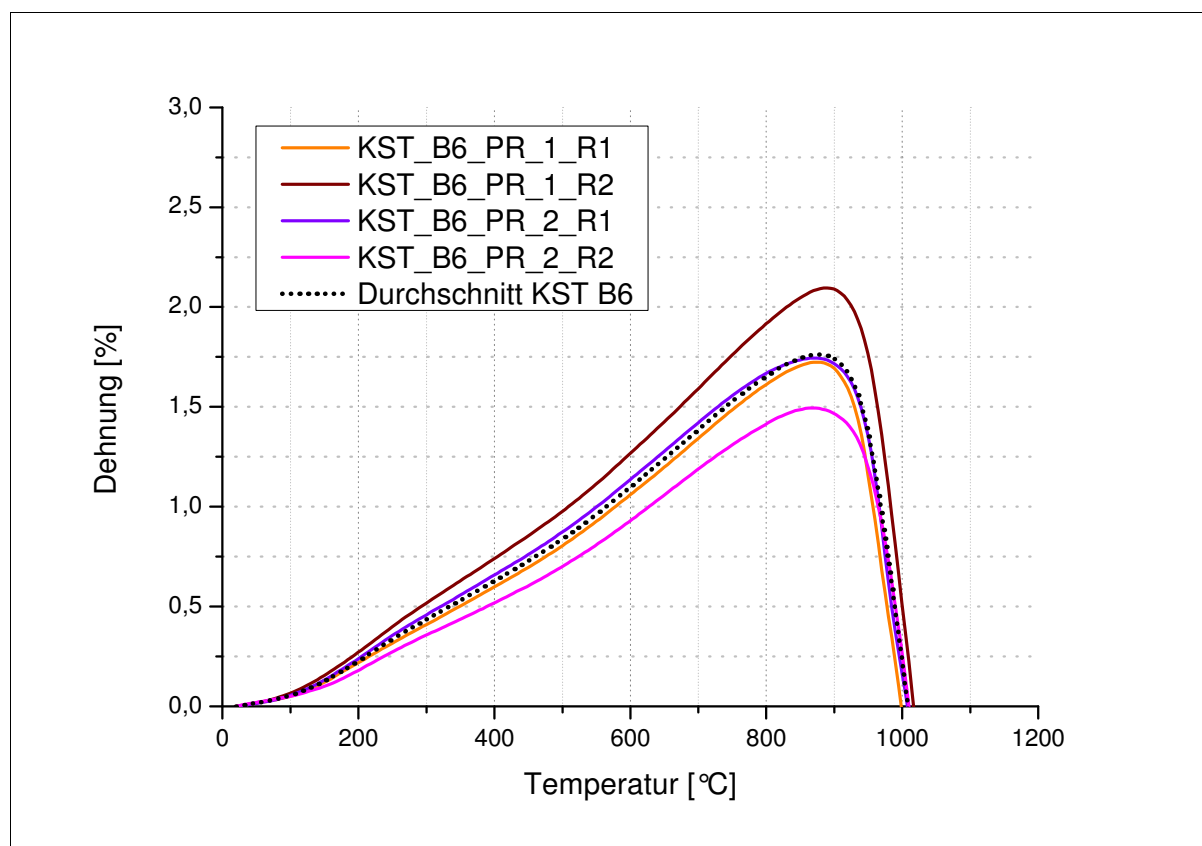


Abbildung 9.109: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke B6

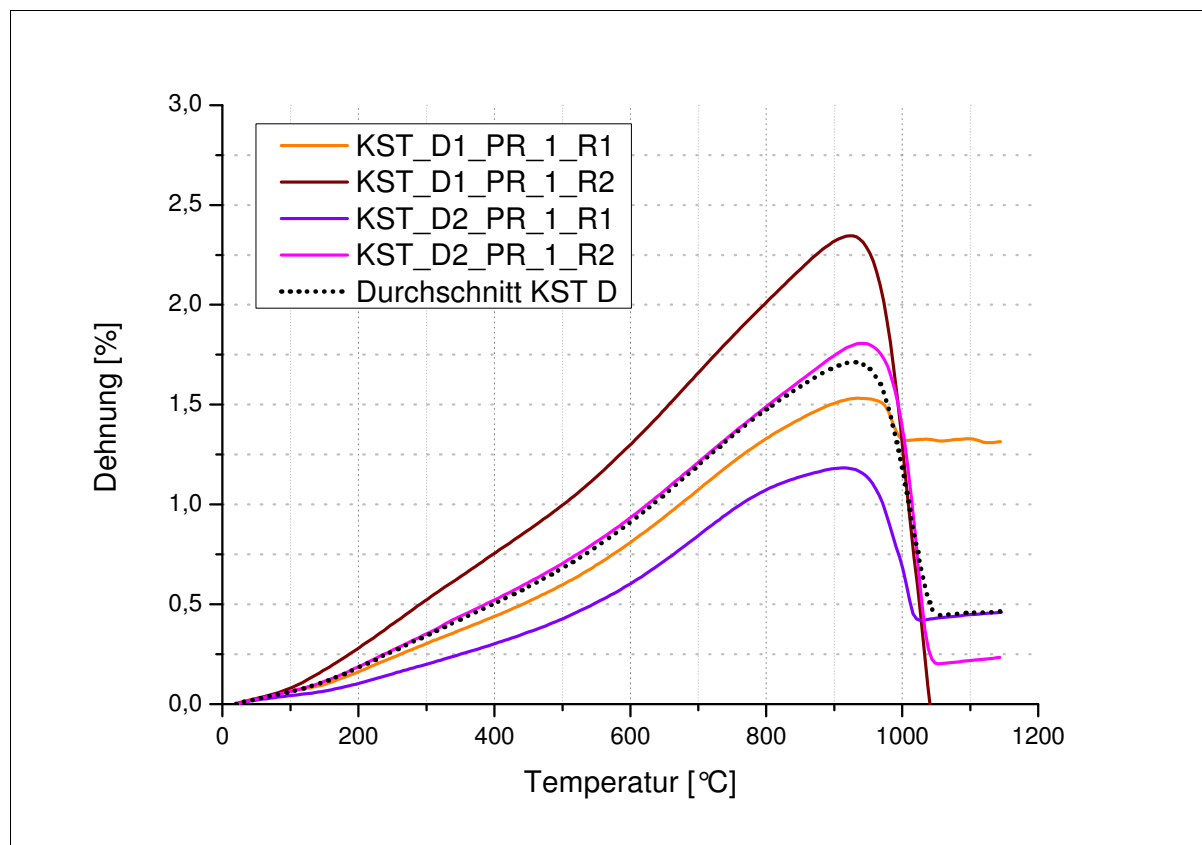


Abbildung 9.110: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke D1 und D2

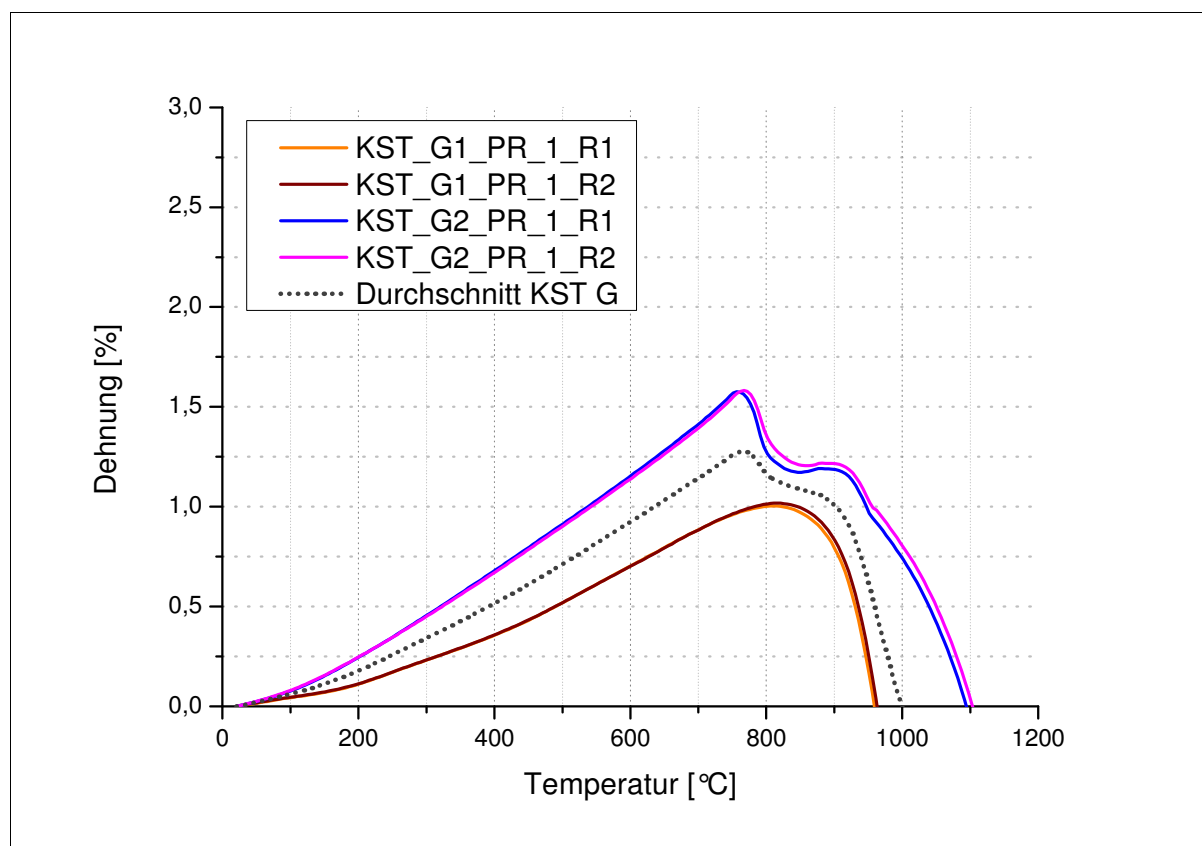


Abbildung 9.111: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke G1 und G2

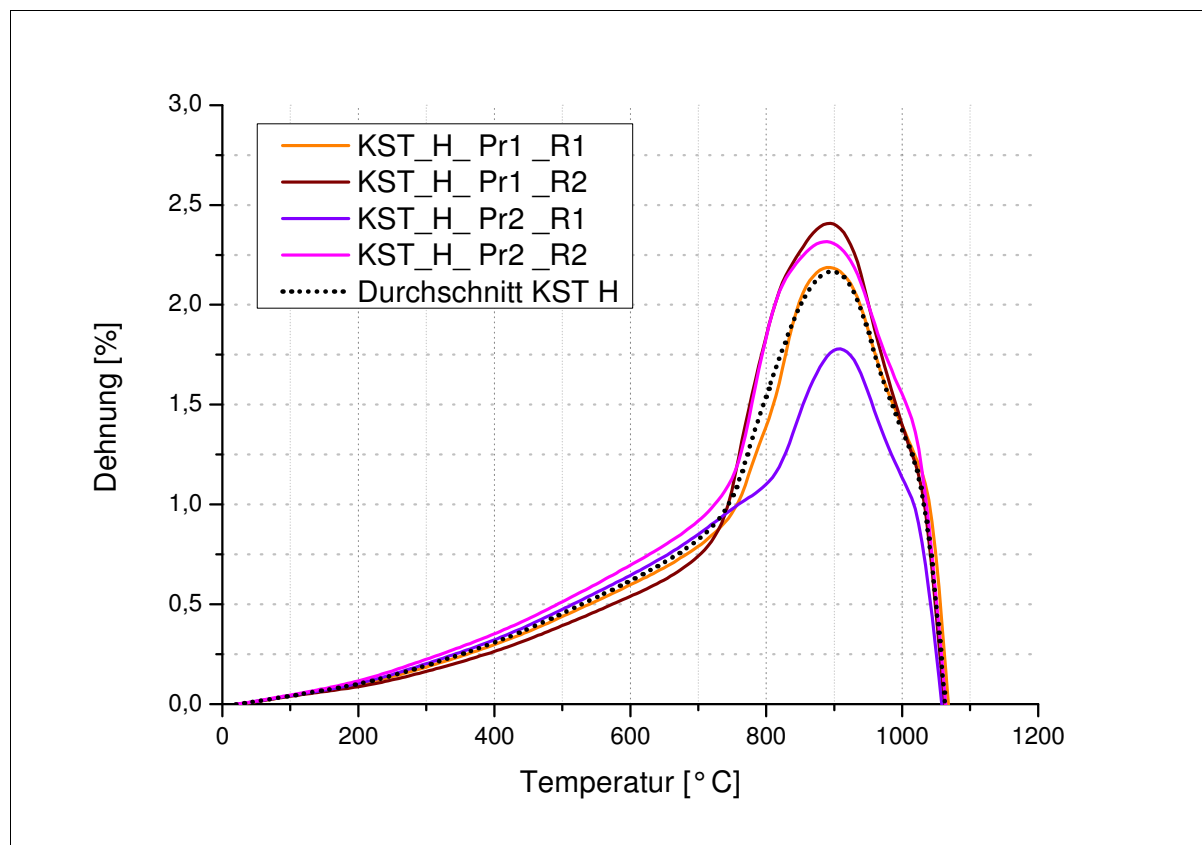


Abbildung 9.112: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke H

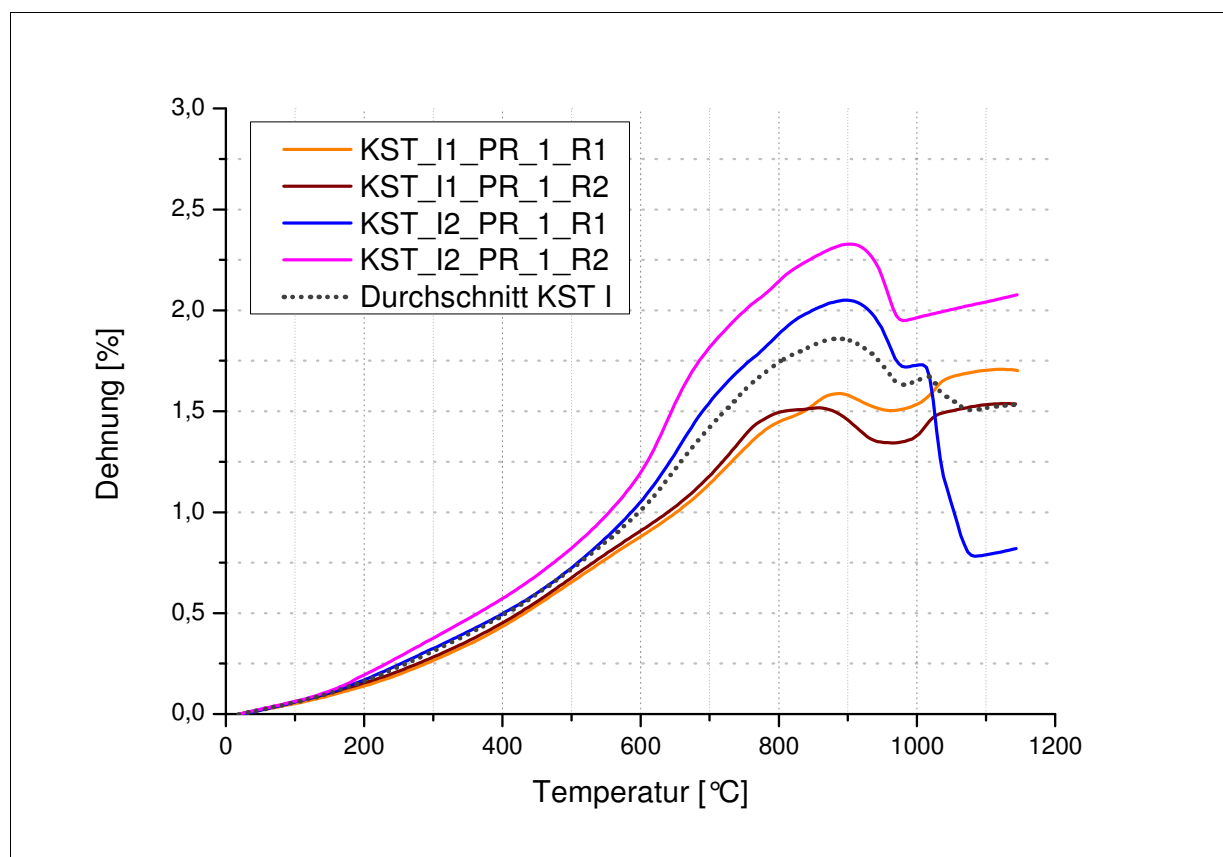


Abbildung 9.113: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke I1 und I2

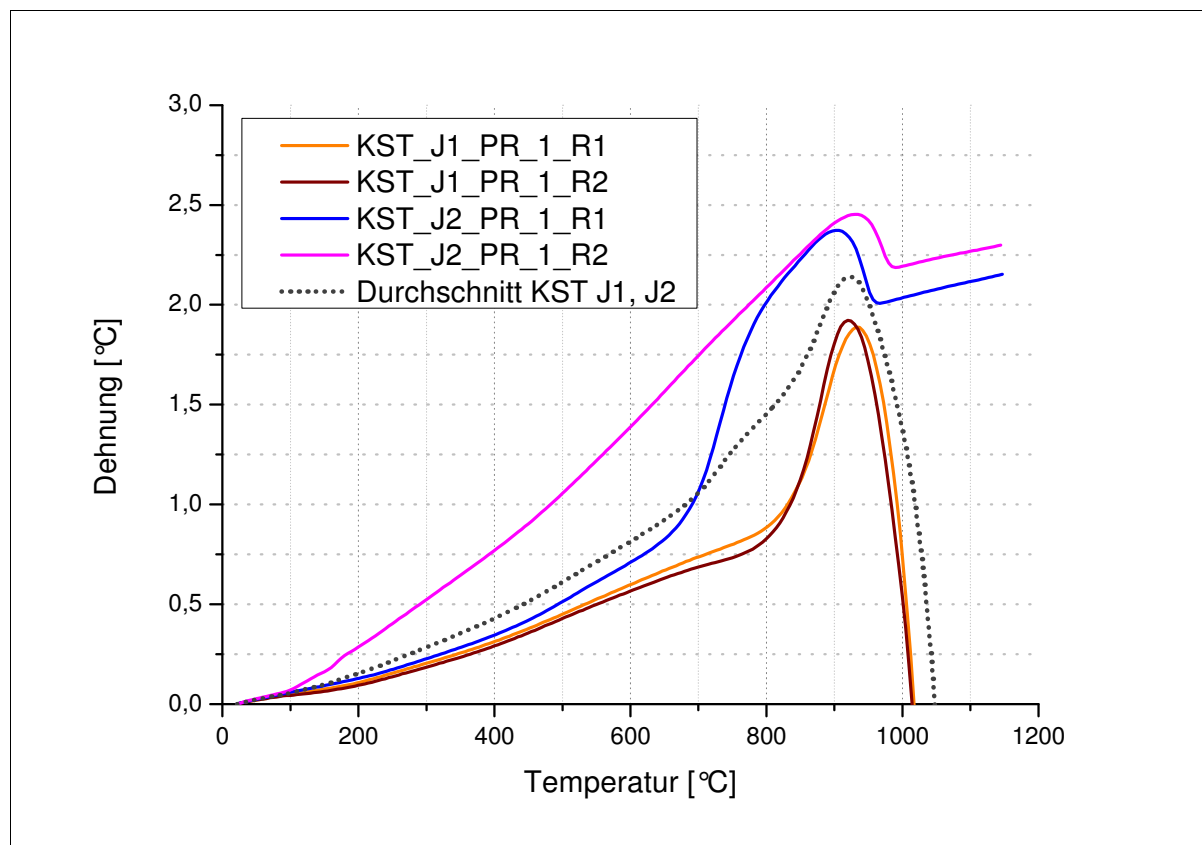


Abbildung 9.114: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke J1 und J2

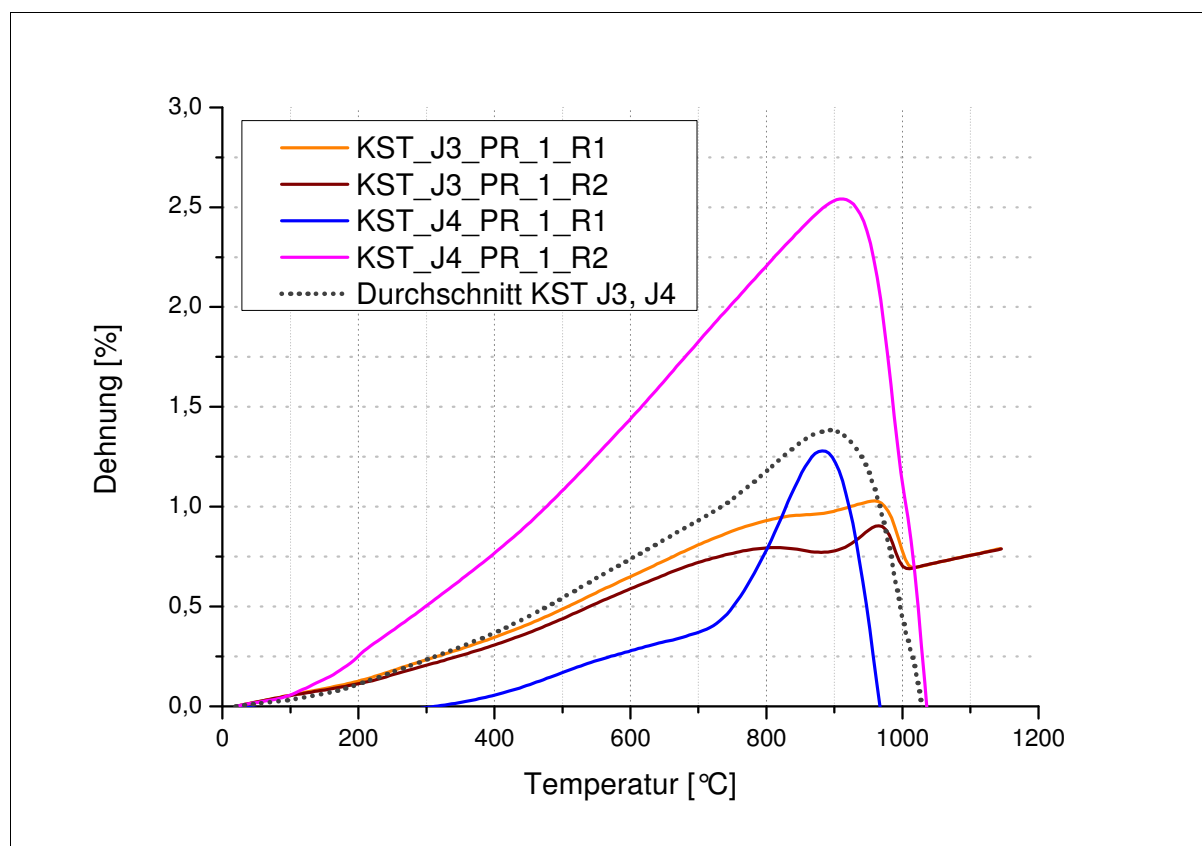


Abbildung 9.115: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke J3 und J4

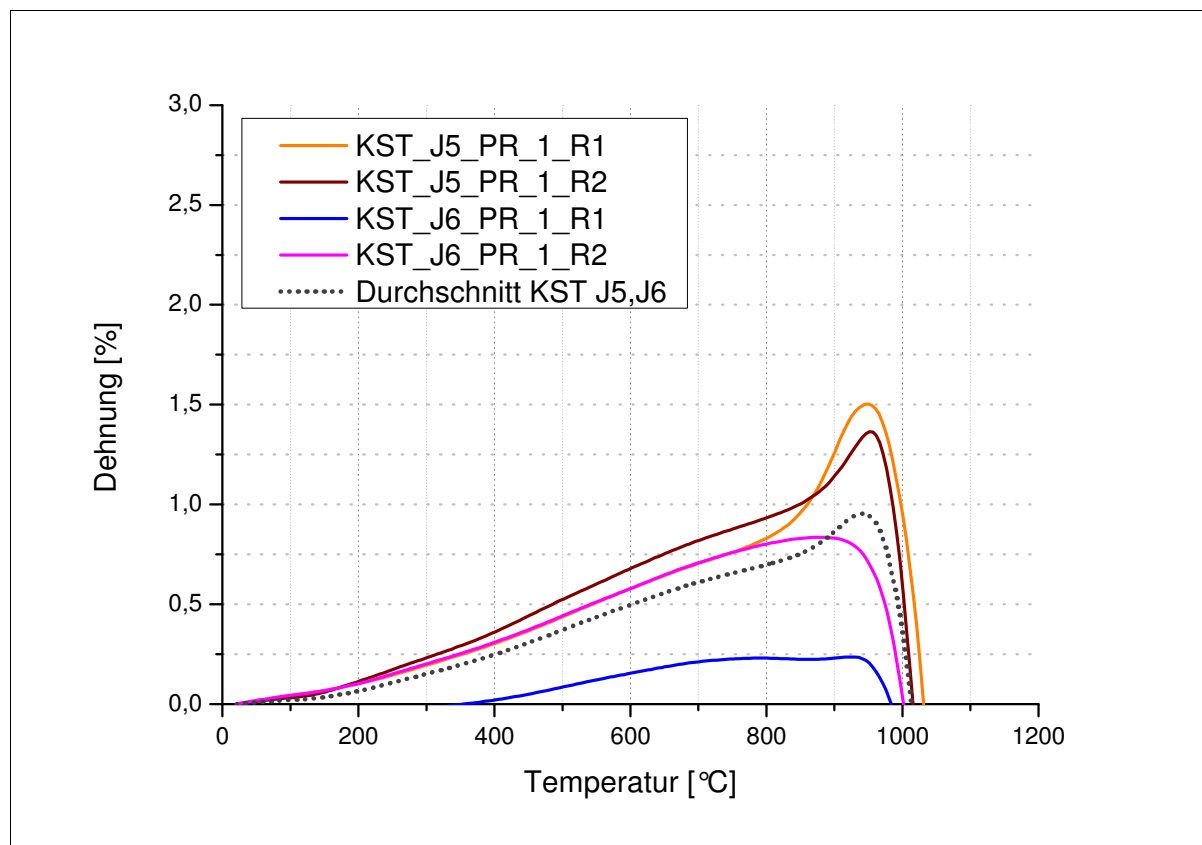


Abbildung 9.116: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke J5 und J6

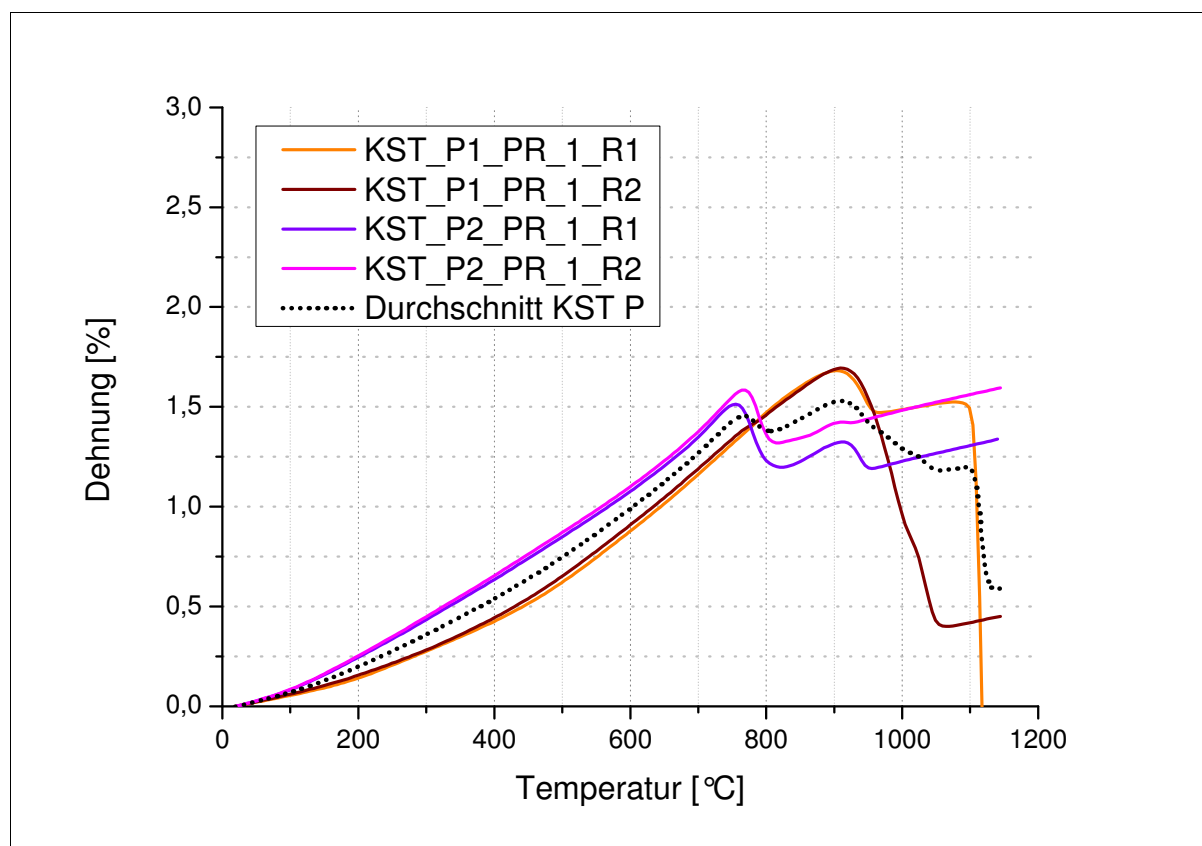


Abbildung 9.117: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke P1 und P2

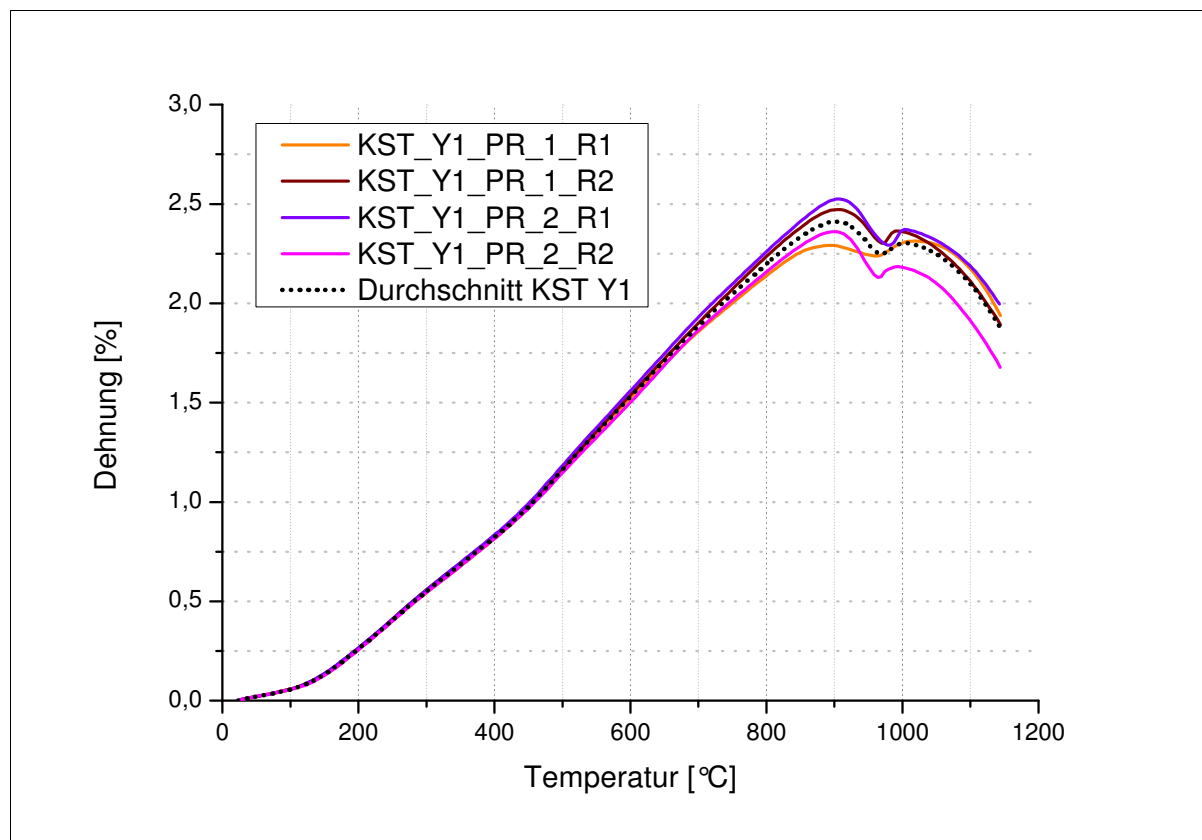


Abbildung 9.118: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke Y1

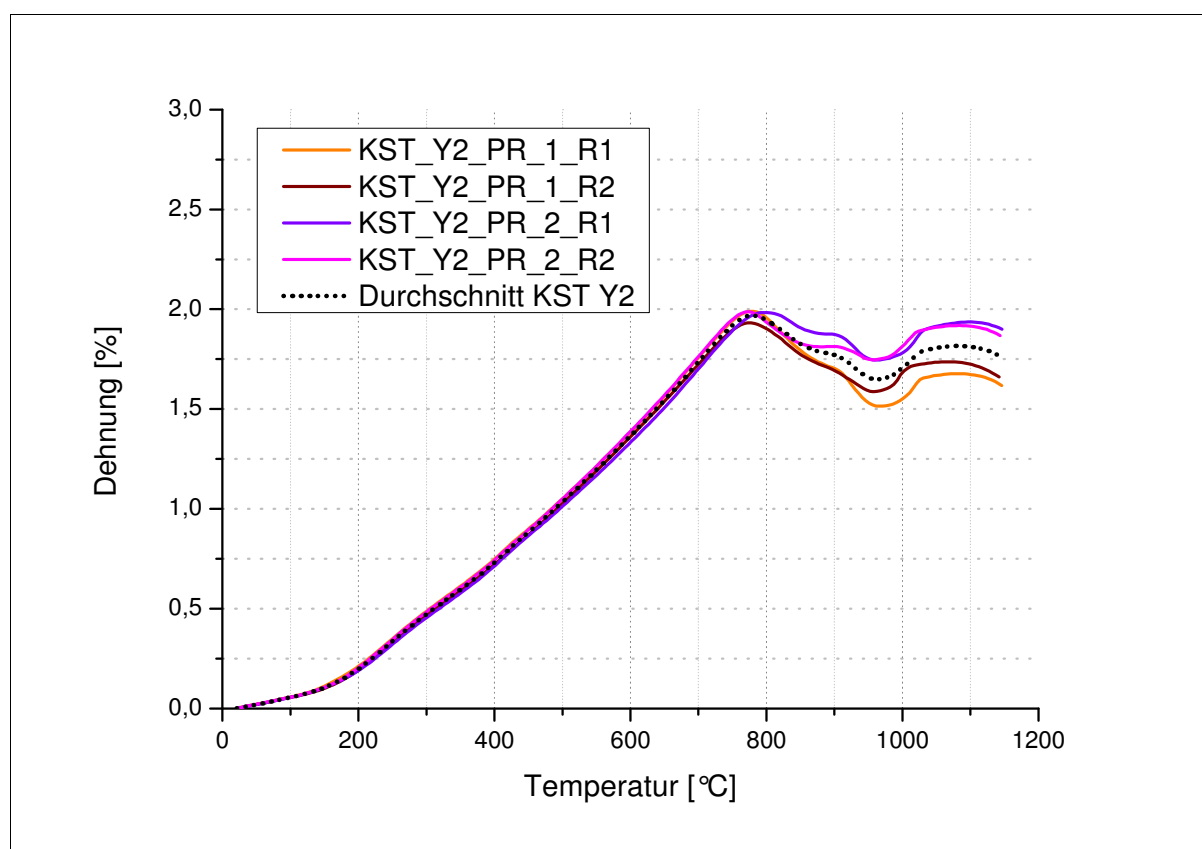


Abbildung 9.119: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke Y2

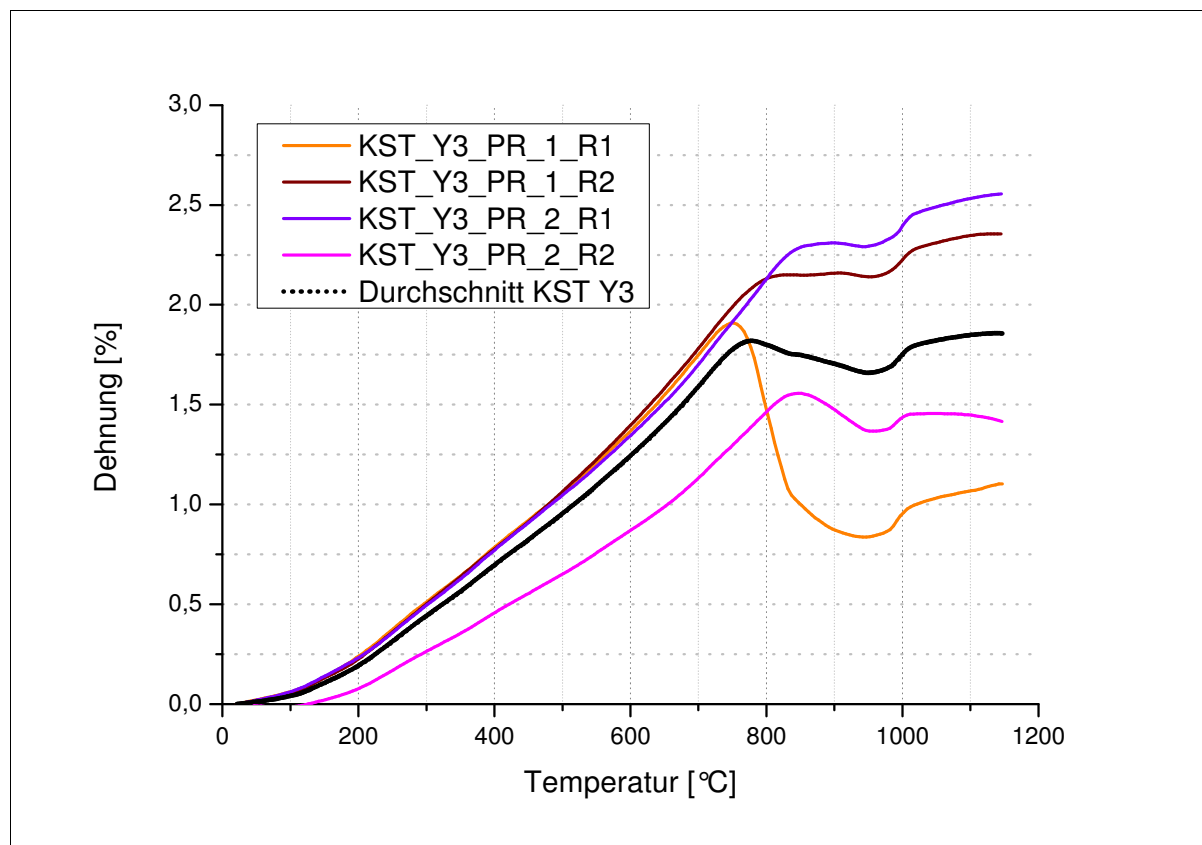


Abbildung 9.120: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke Y3

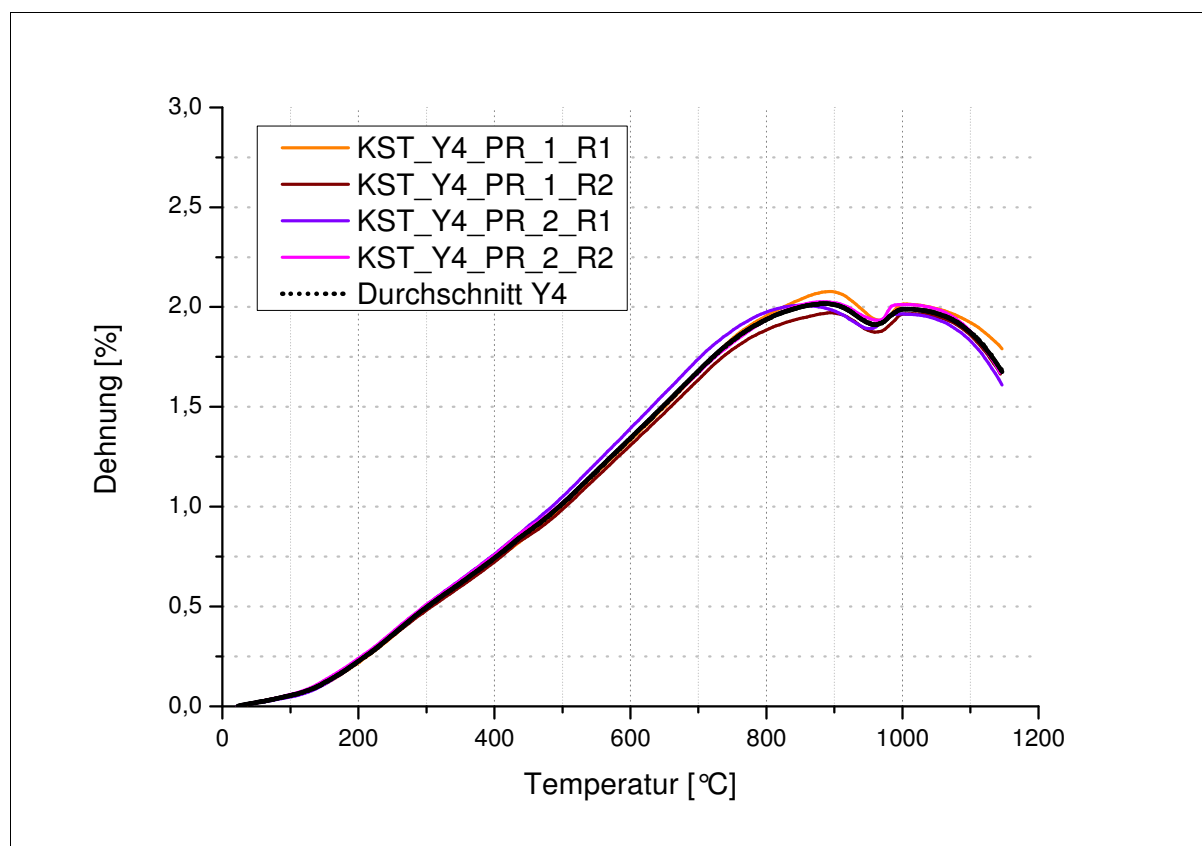


Abbildung 9.121: Ausdehnungskurven der Probenstäbchen der Handstücke Y4

## Dehnungsraten der Vorversuche

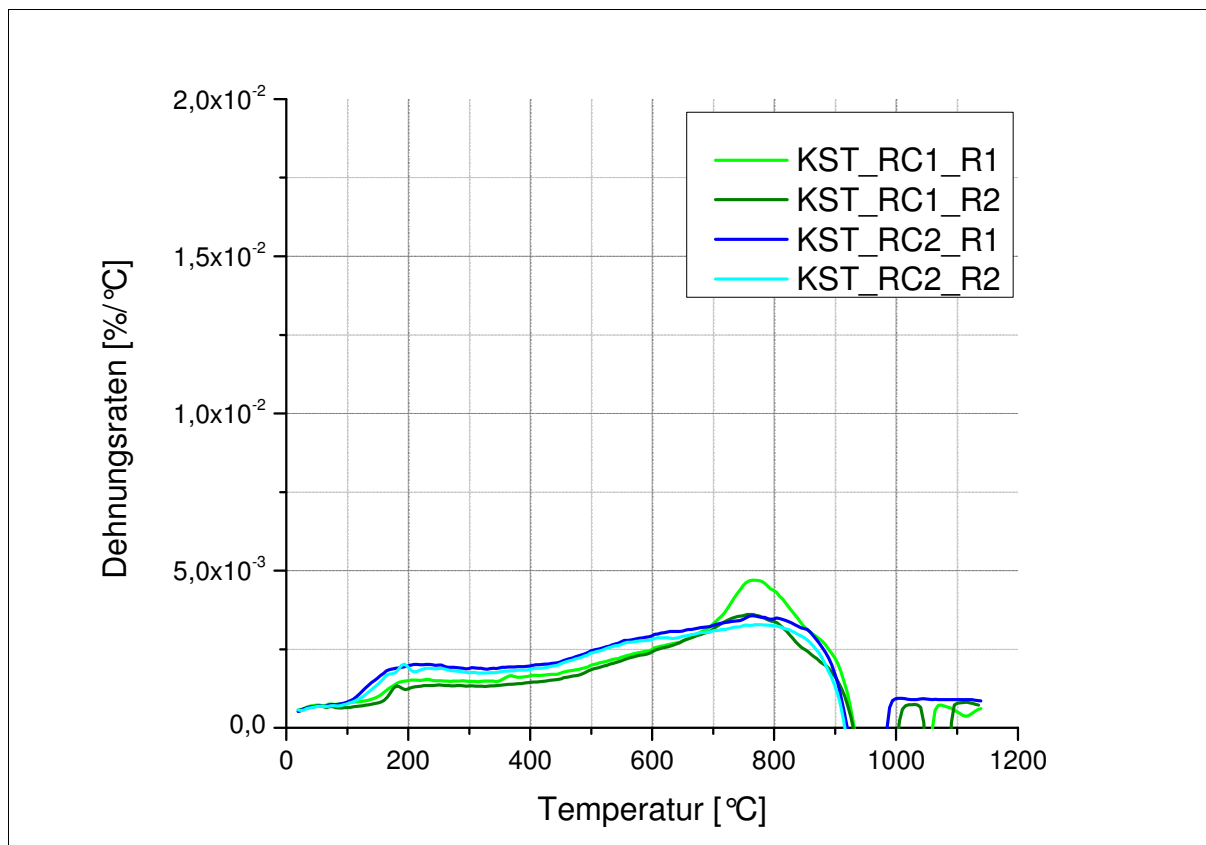


Abbildung 9.122: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RC1 und RC2

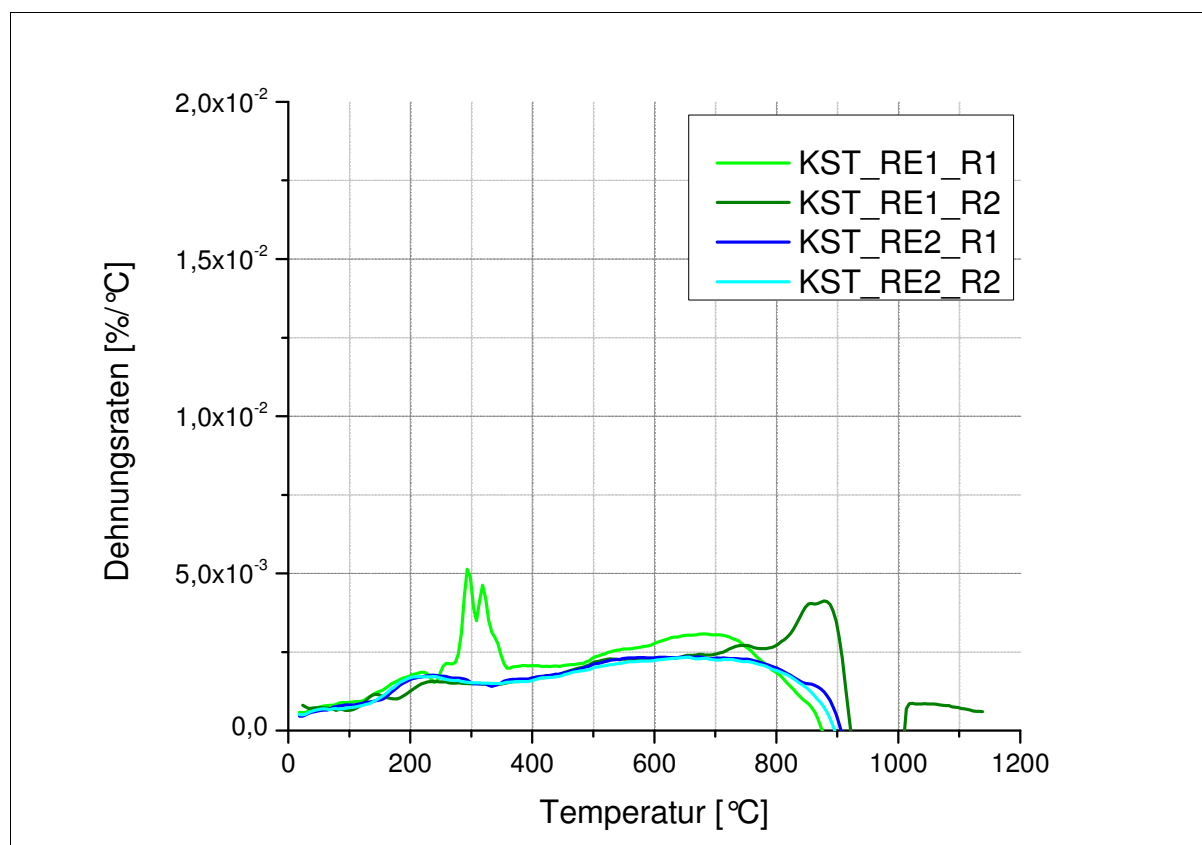


Abbildung 9.123: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RE1 und RE2

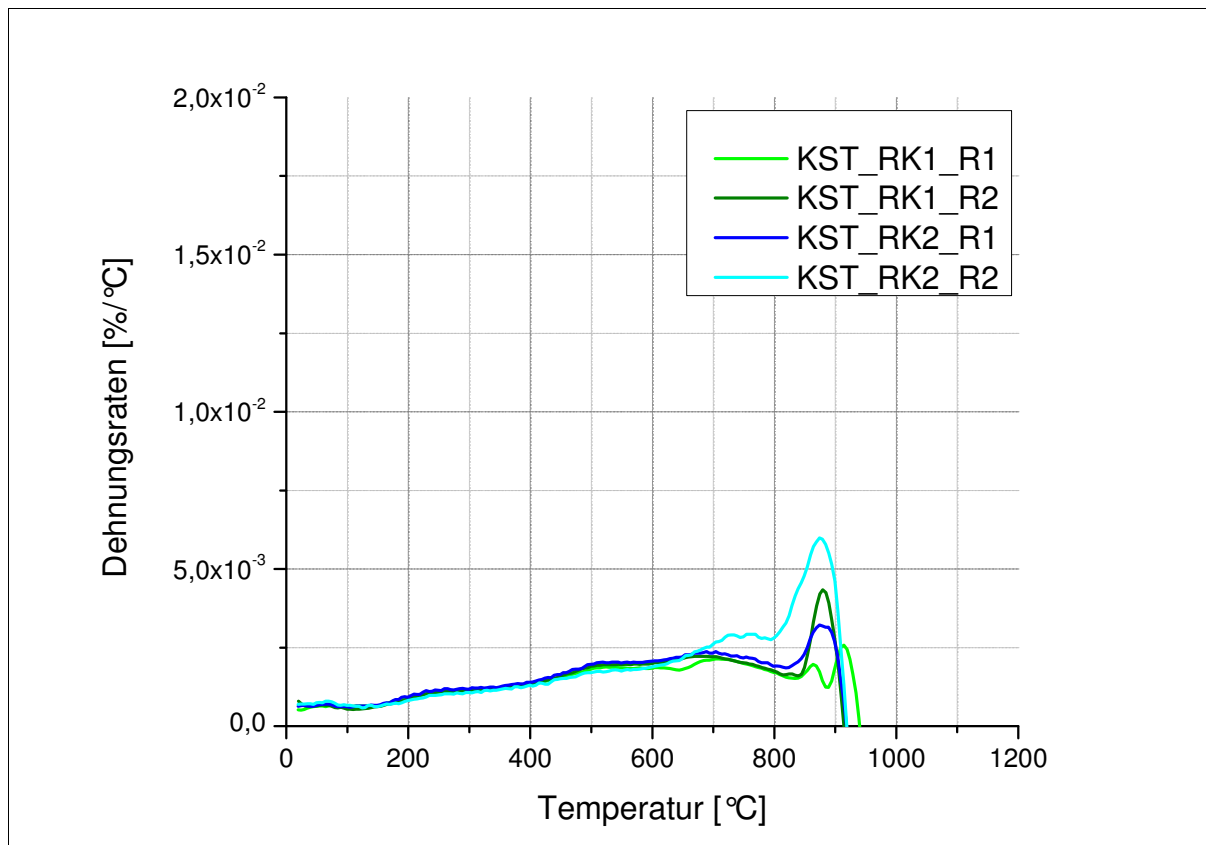


Abbildung 9.124: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RK1 und RK2

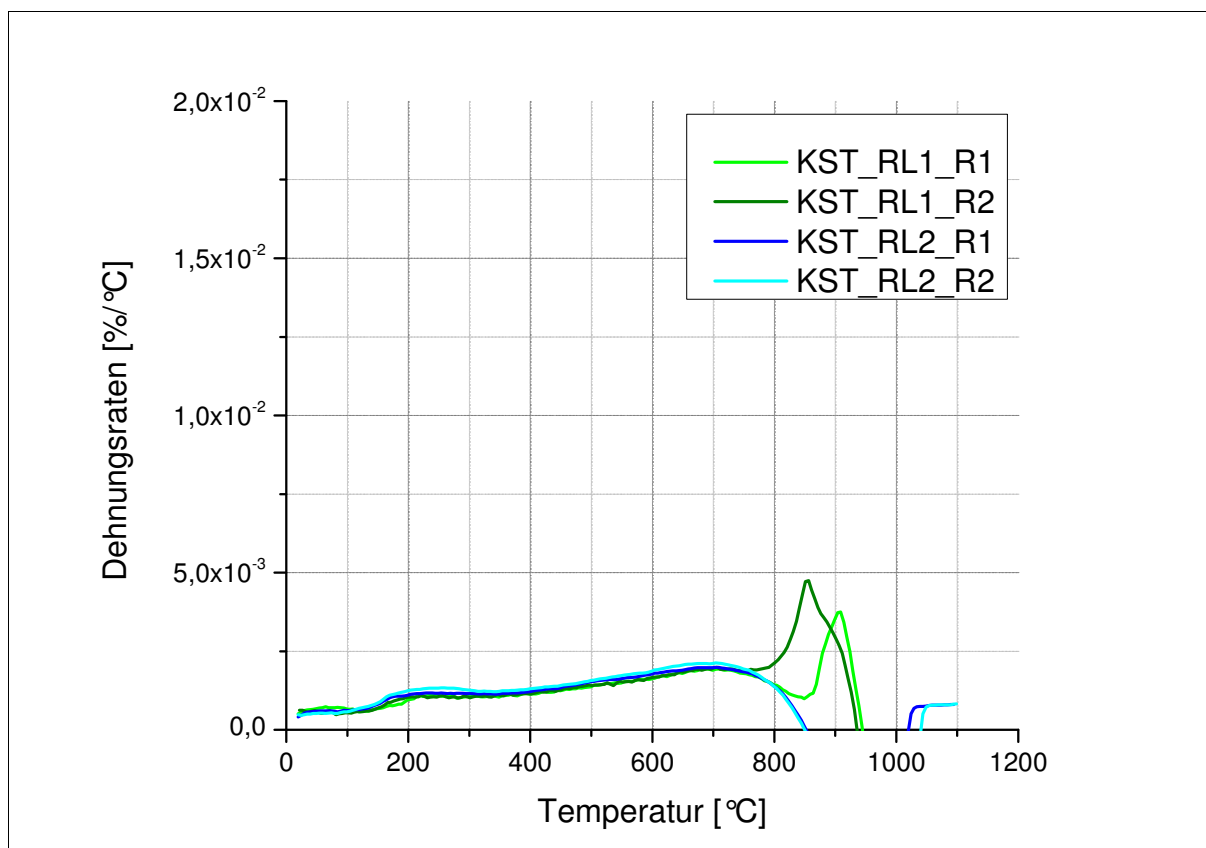


Abbildung 9.125: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RL1 und RL2

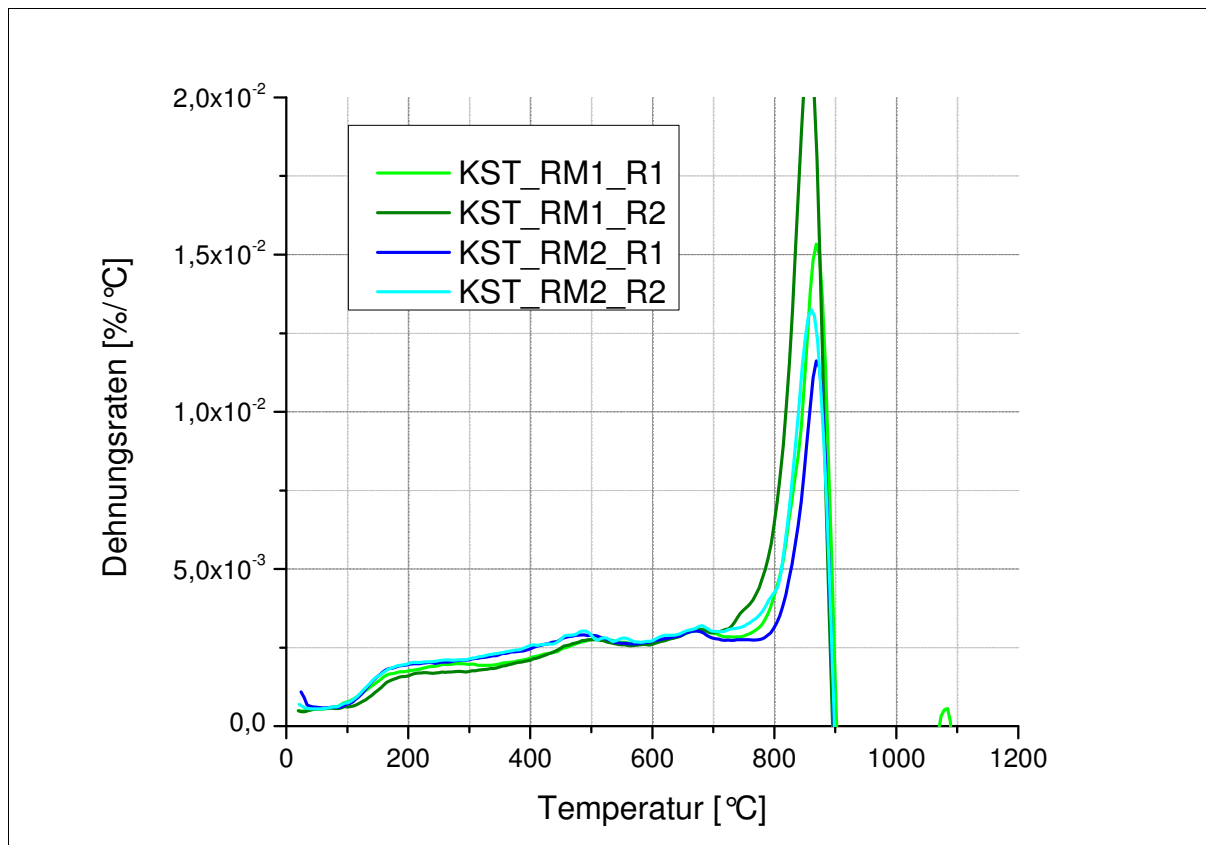


Abbildung 9.126: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RM1 und RM2

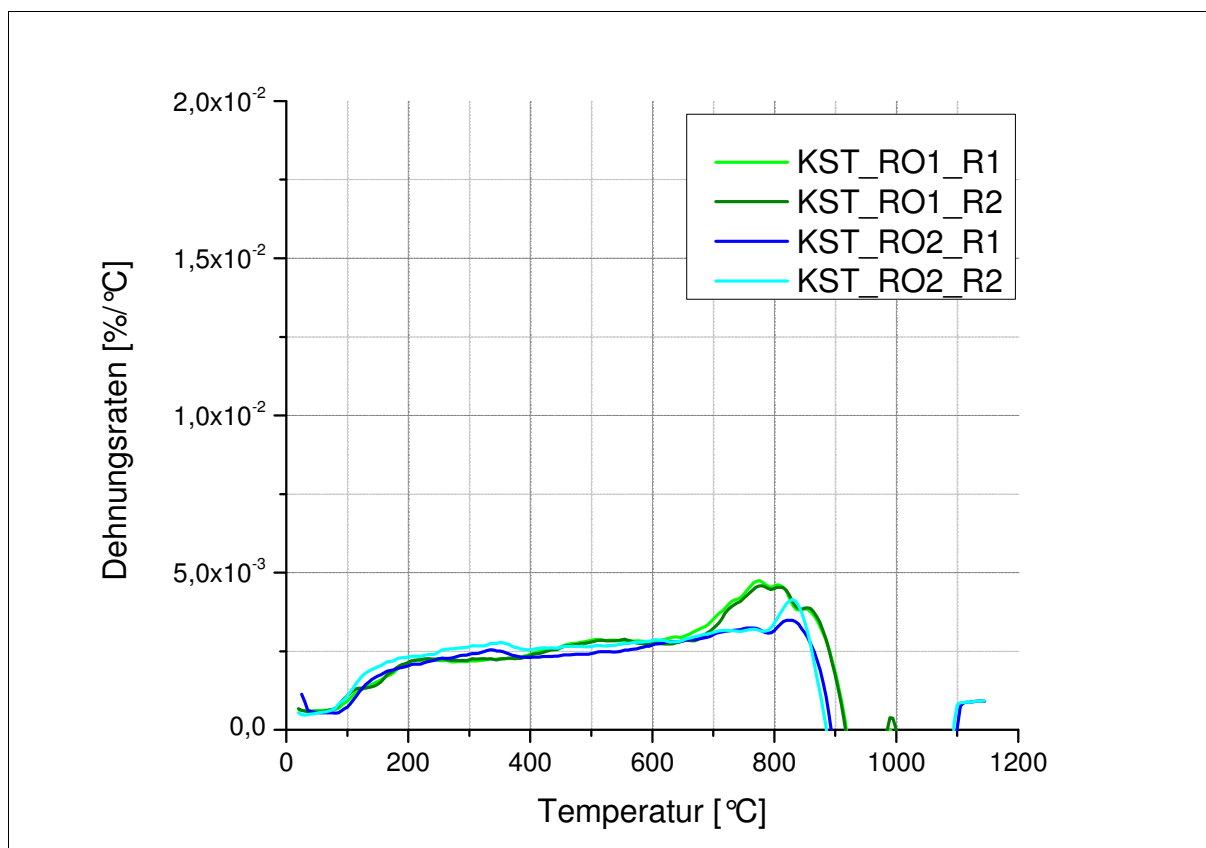


Abbildung 9.127: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RO1 und RO2

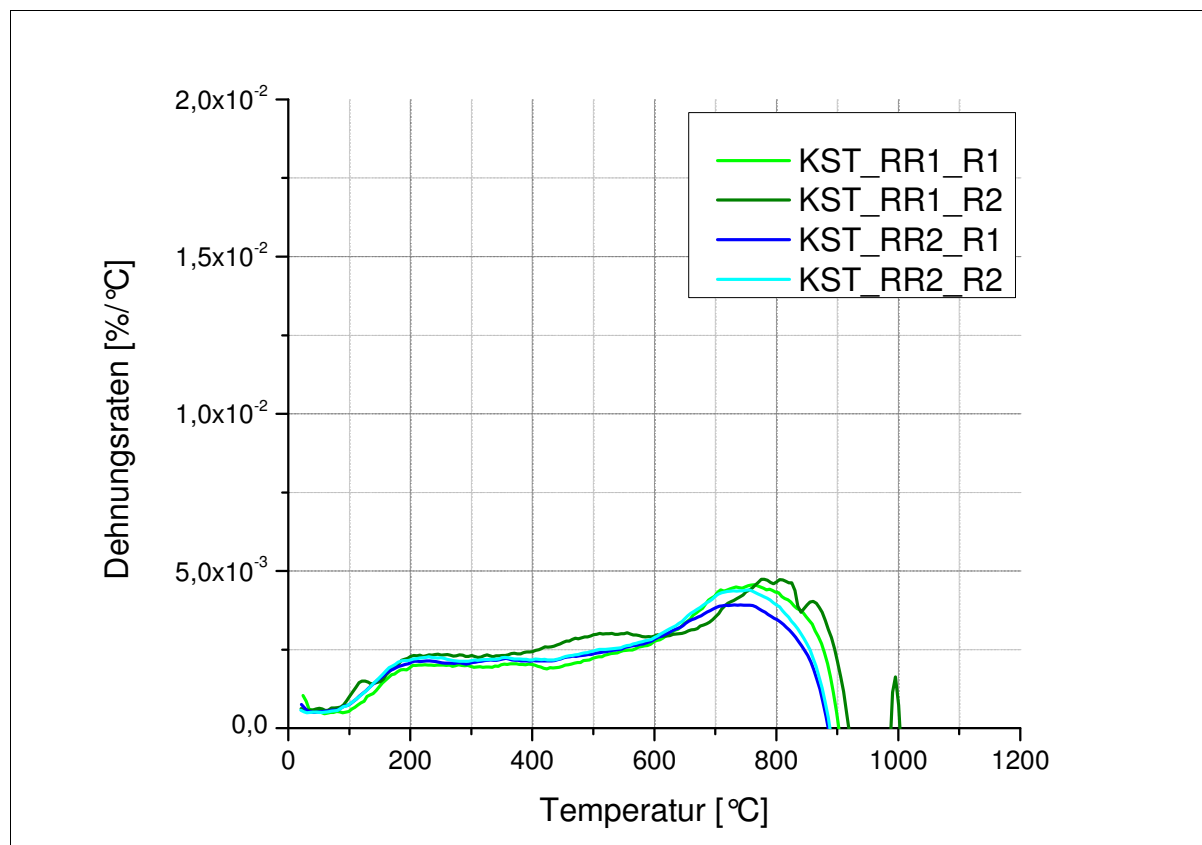


Abbildung 9.128: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RR1 und RR2

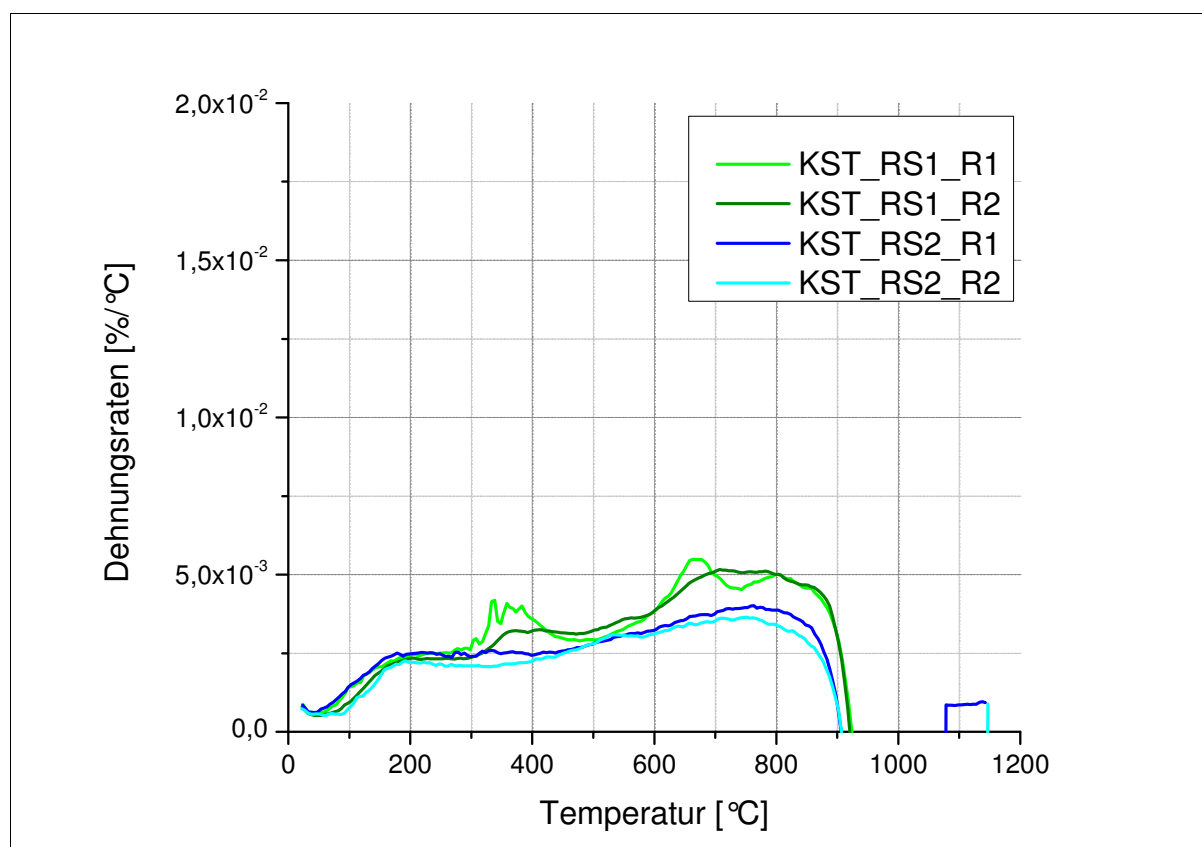


Abbildung 9.129: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RS1 und RS2

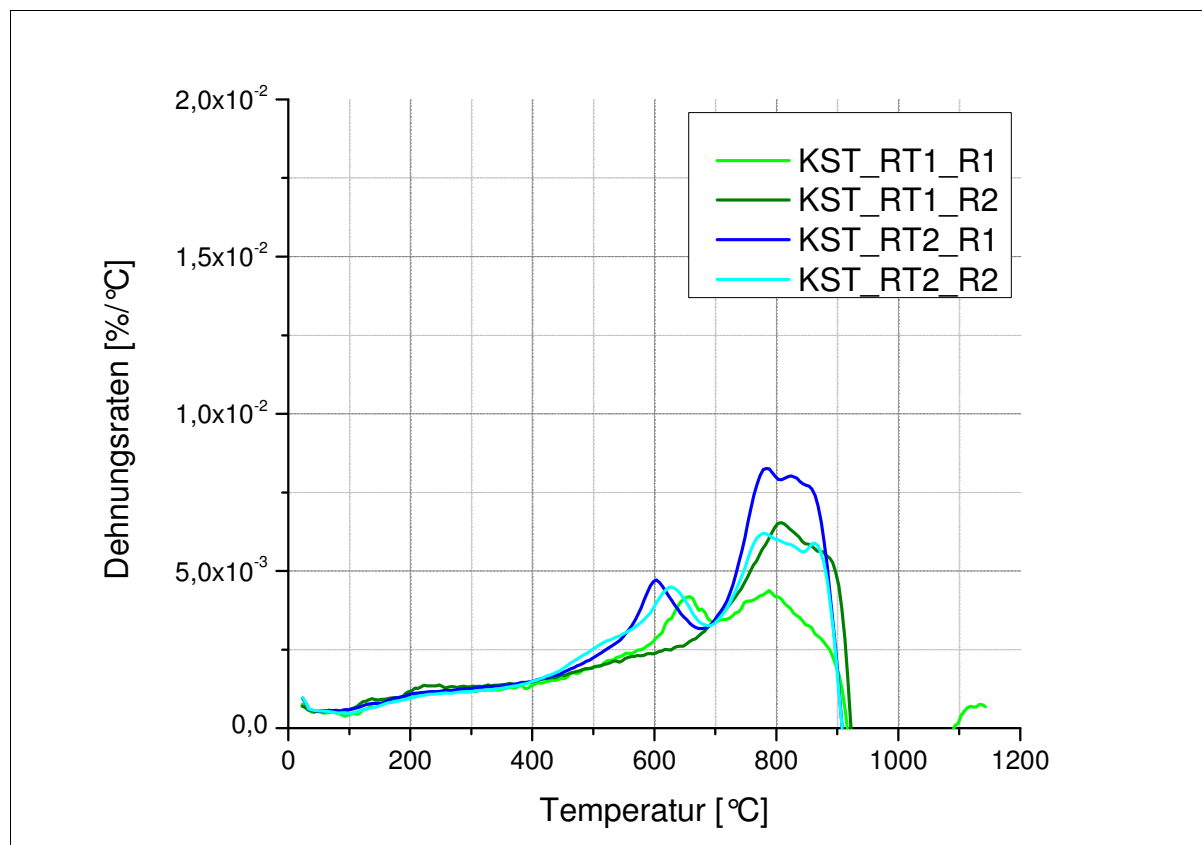


Abbildung 9.130: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RT1 und RT2

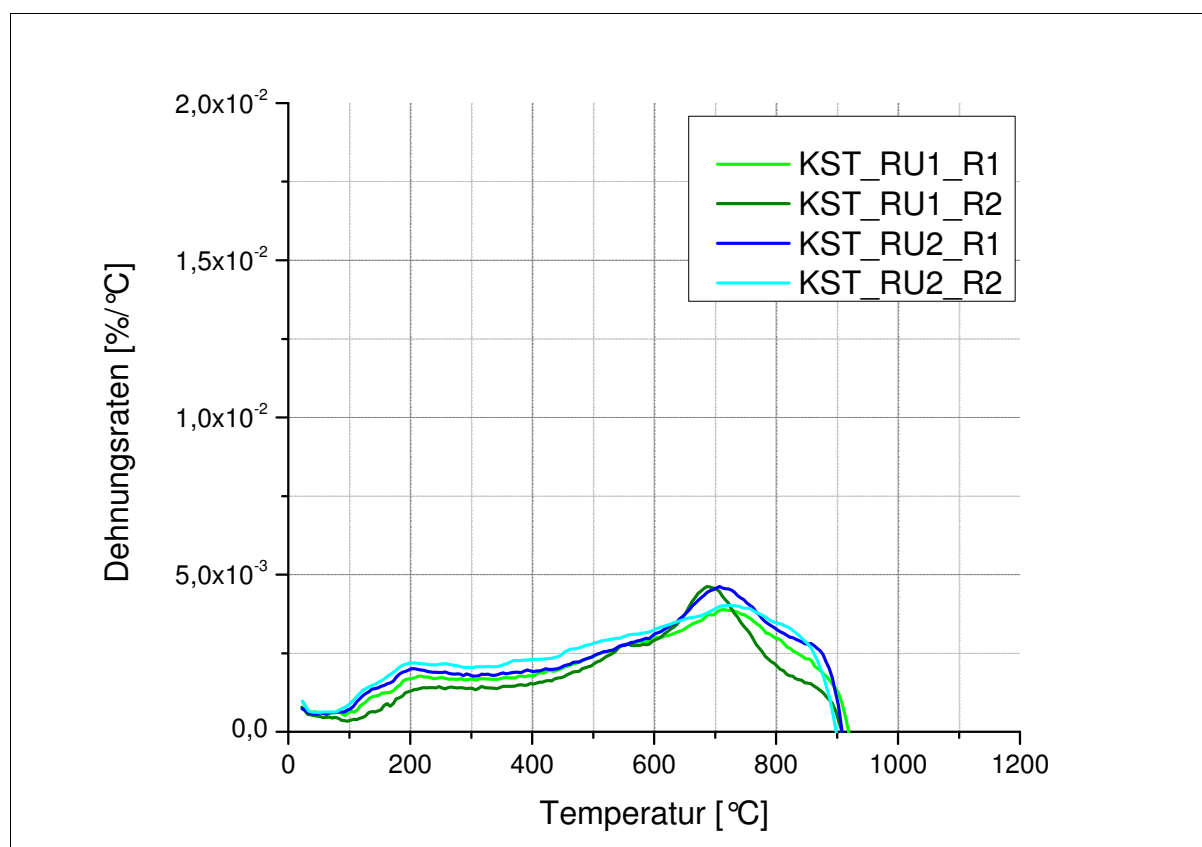


Abbildung 9.131: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RU1 und RU2

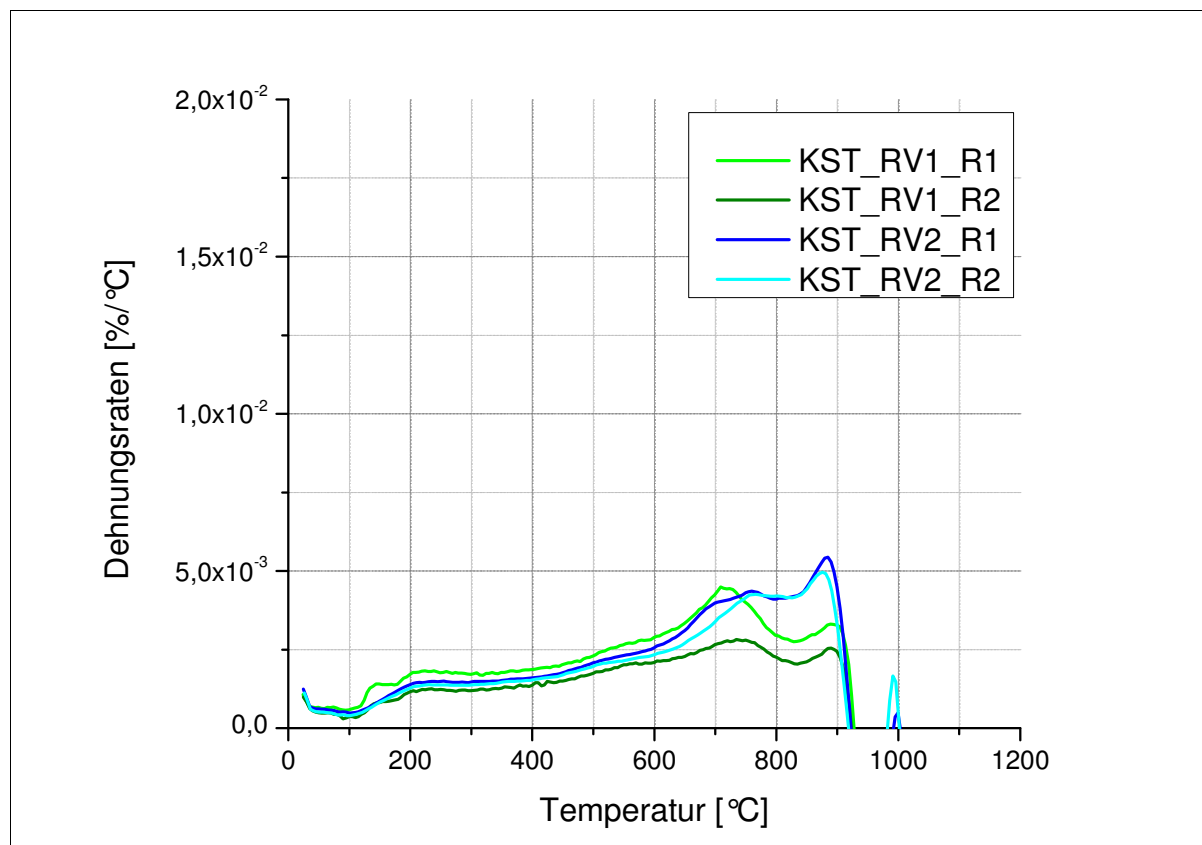


Abbildung 9.132: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RV1 und RV2

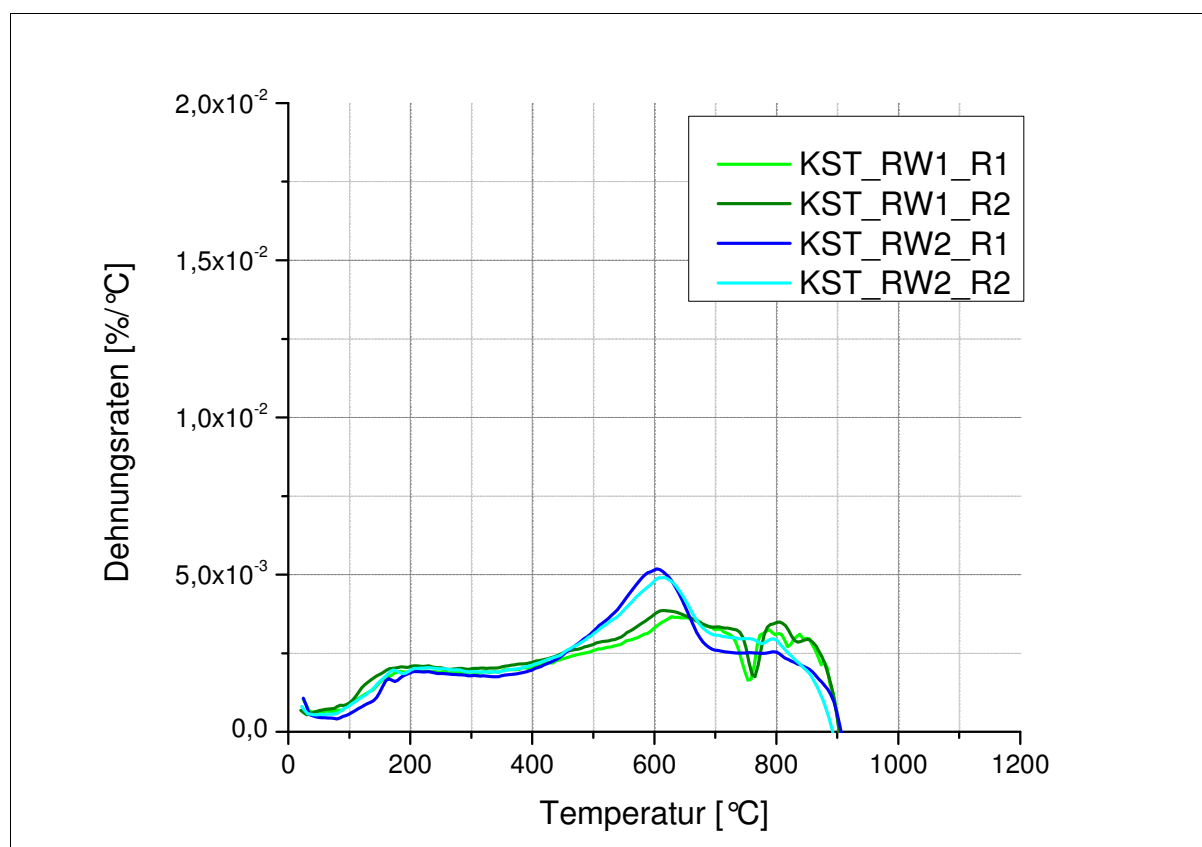


Abbildung 9.133: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke RW1 und RW2



## Dehnungsraten der neu beprobten Lagerstätten

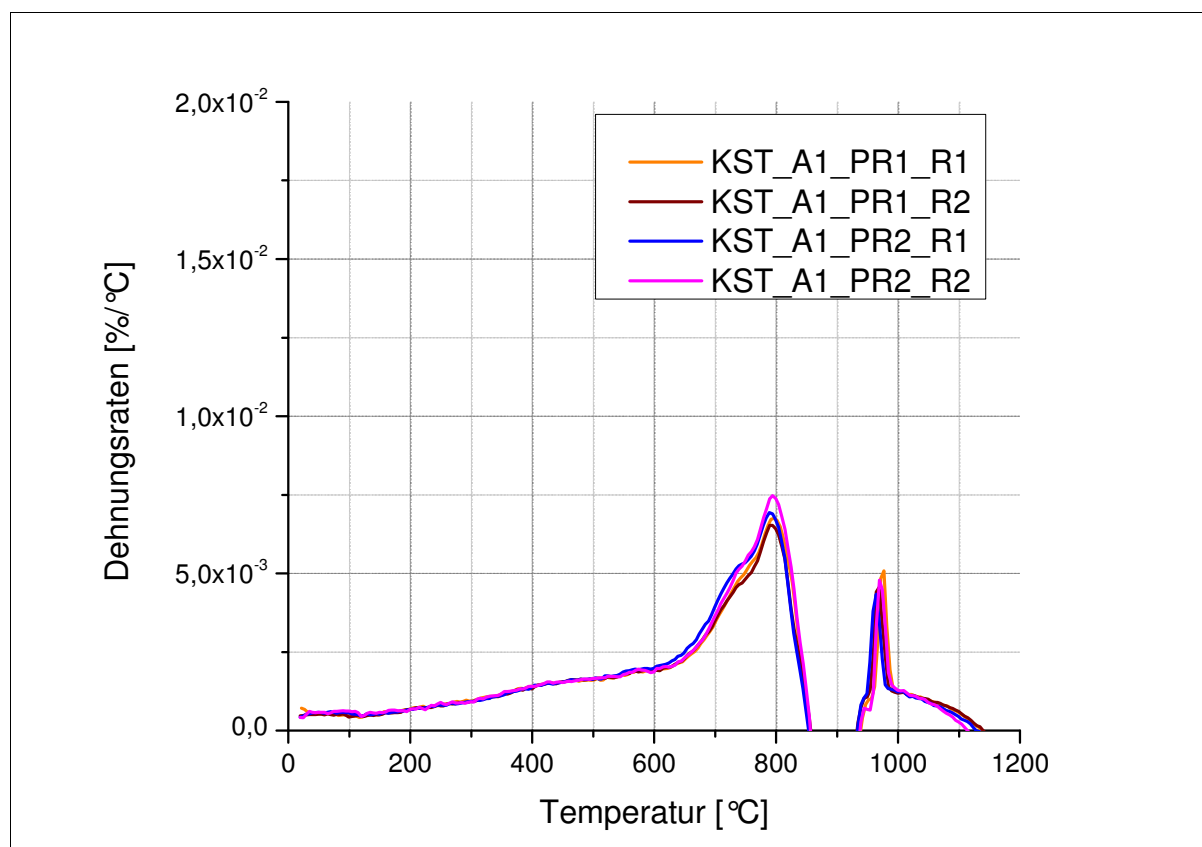


Abbildung 9.134: Dehnungsraten der Porbenstäbchen des Handstückes A1

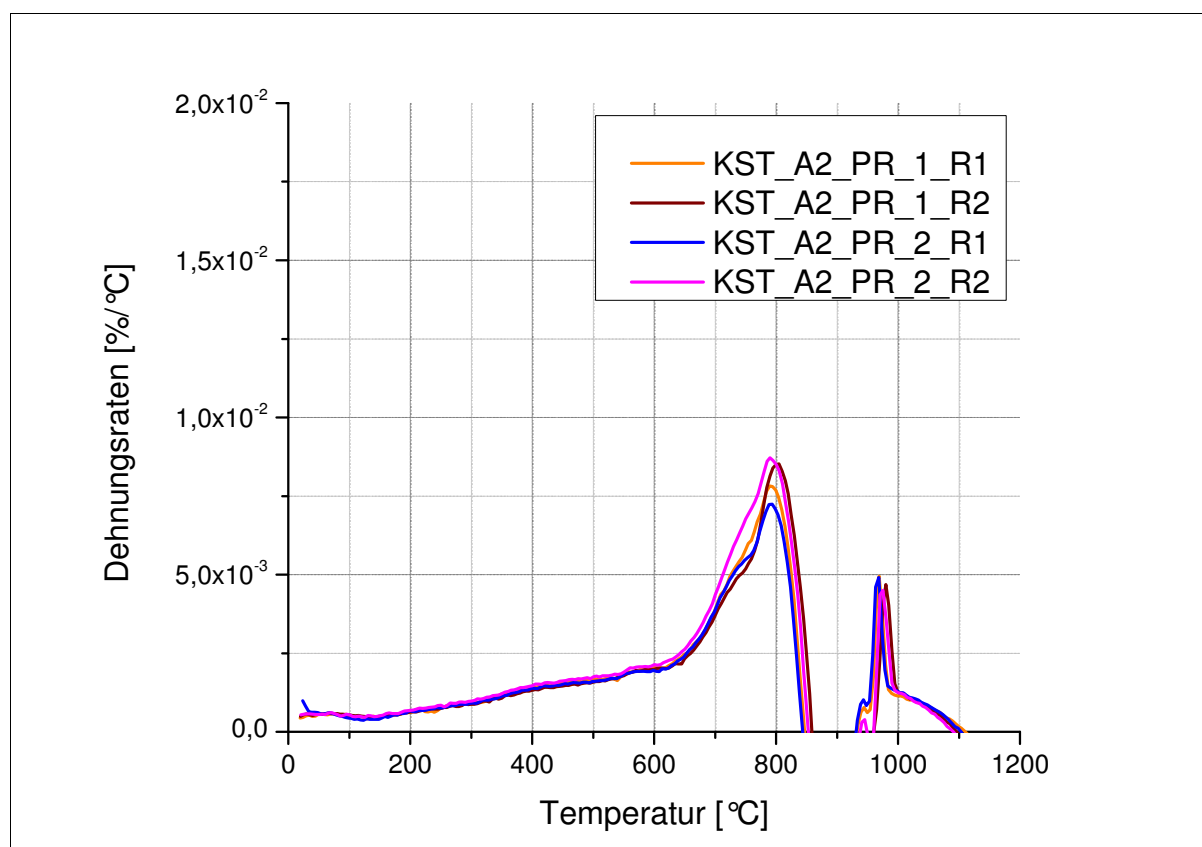


Abbildung 9.135: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes A2

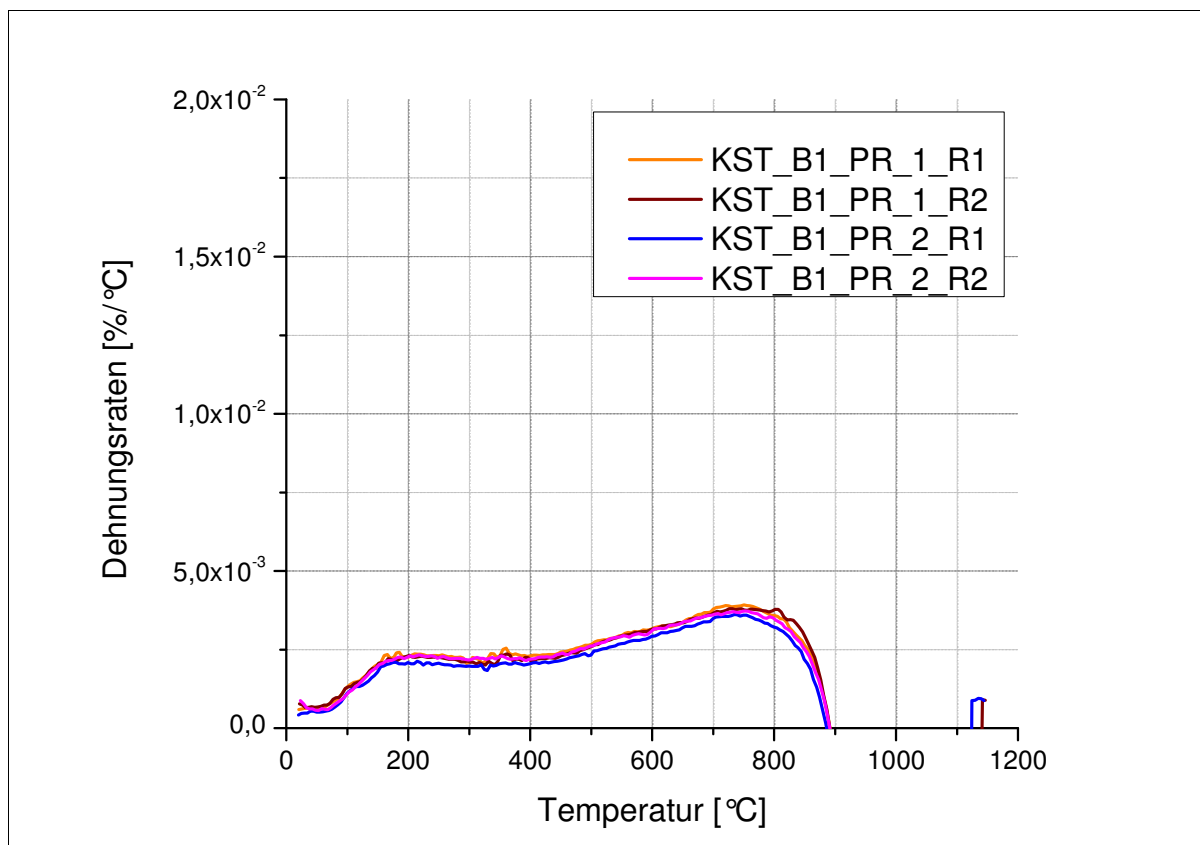


Abbildung 9.136: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B1

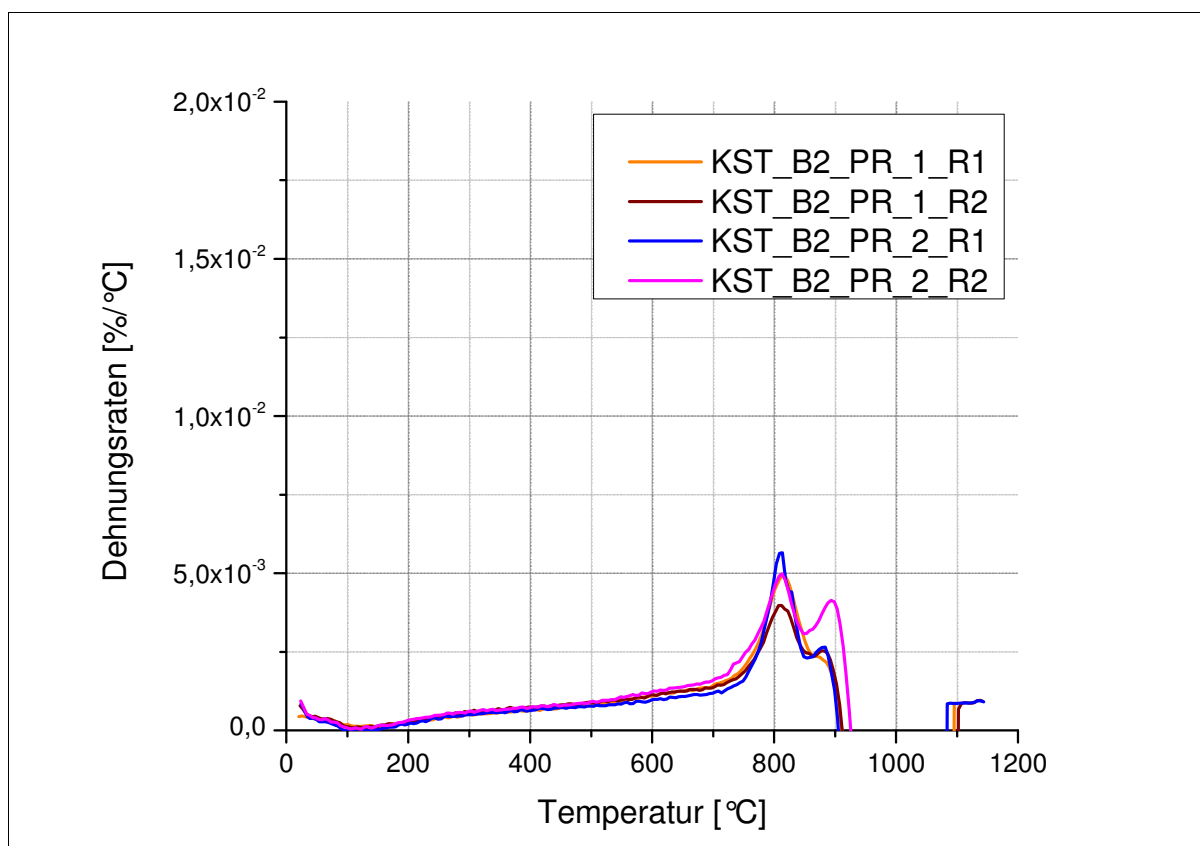


Abbildung 9.137: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B2

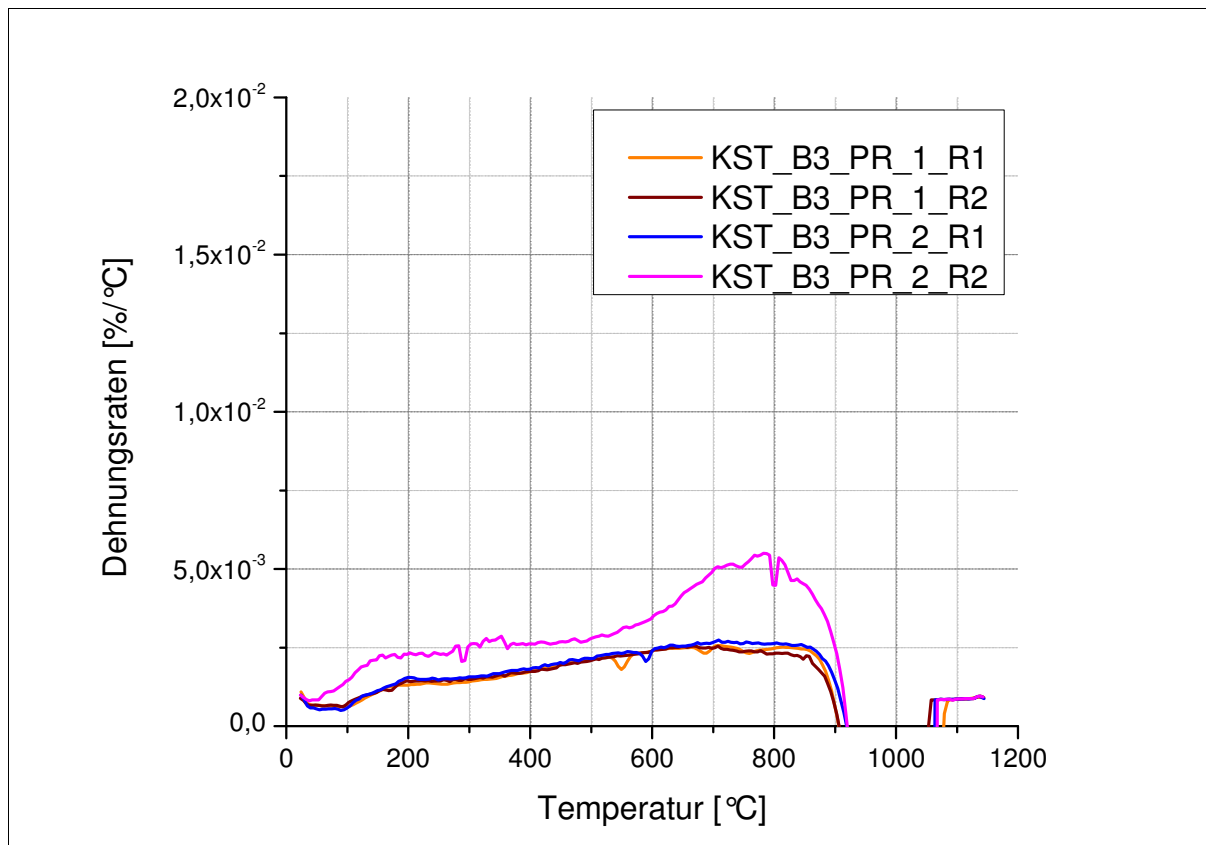


Abbildung 9.138: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B3

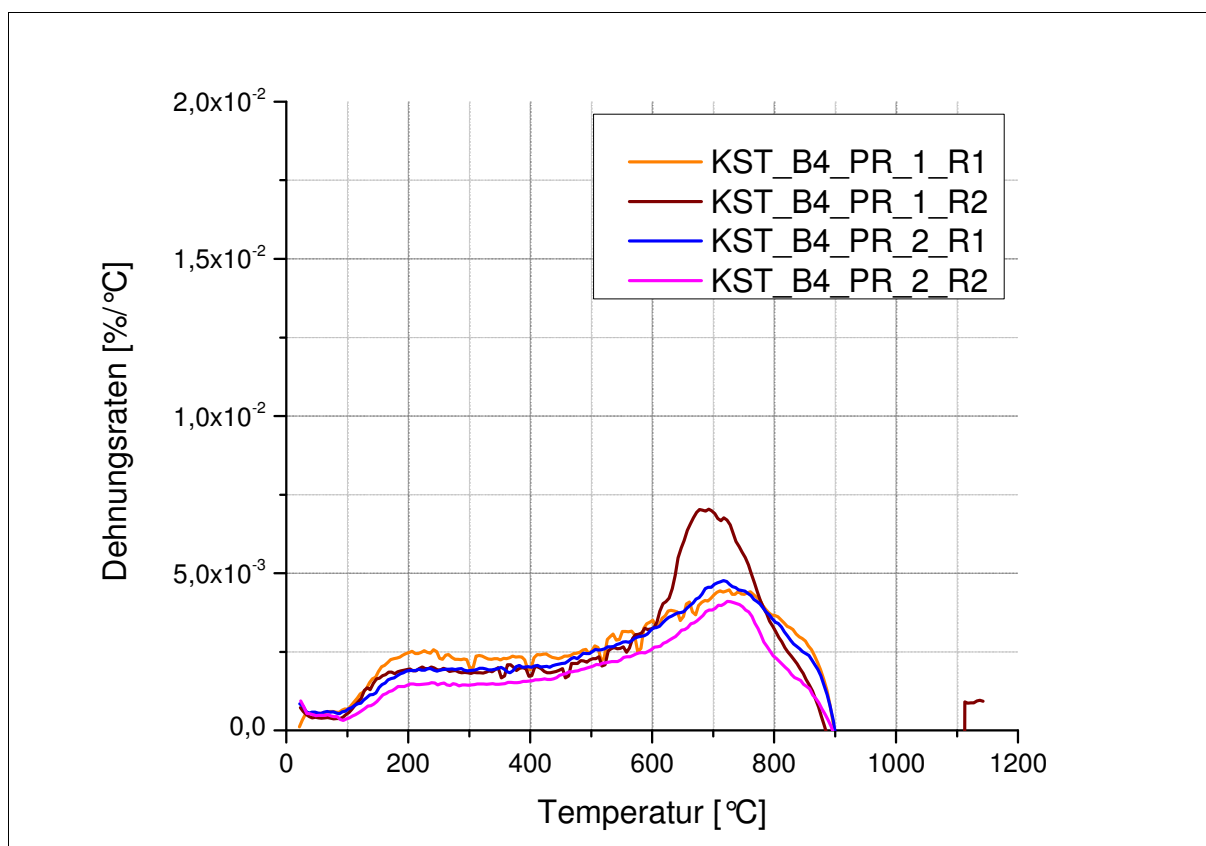


Abbildung 9.139: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B4

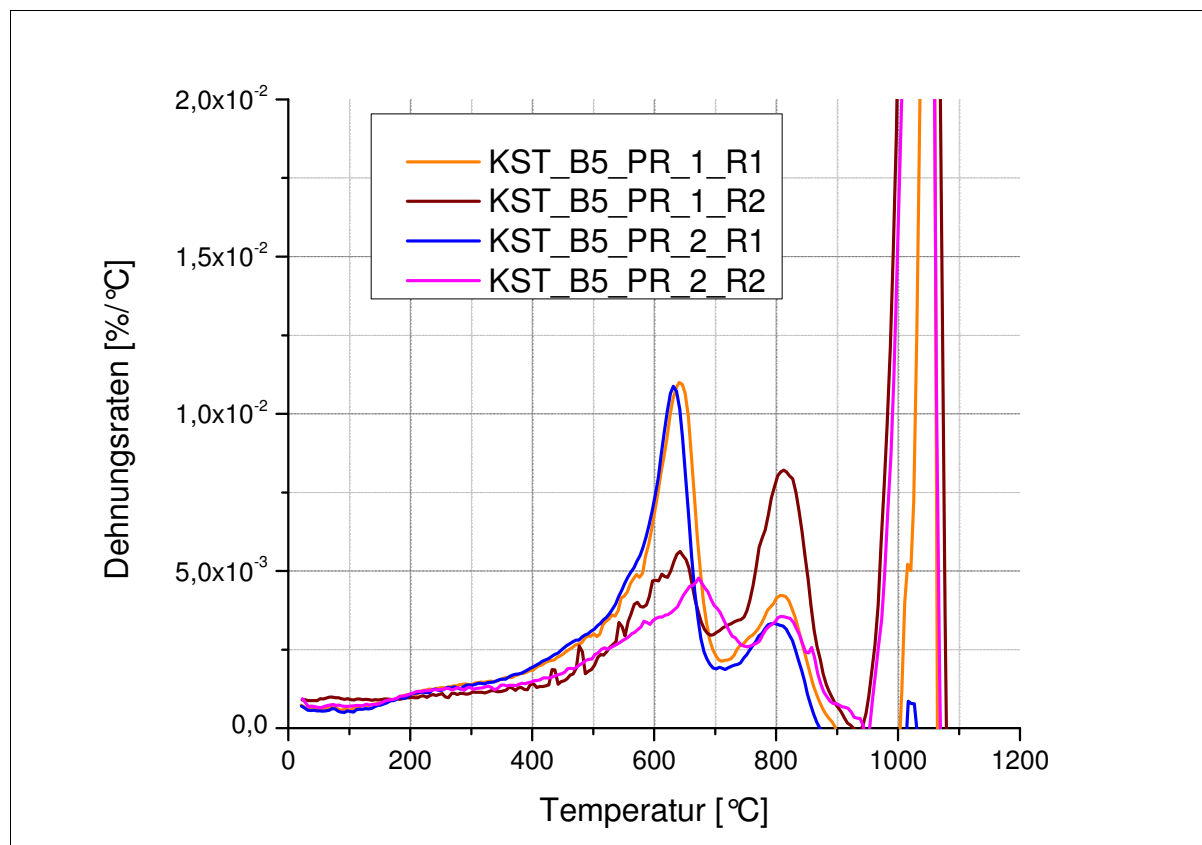


Abbildung 9.140: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B5

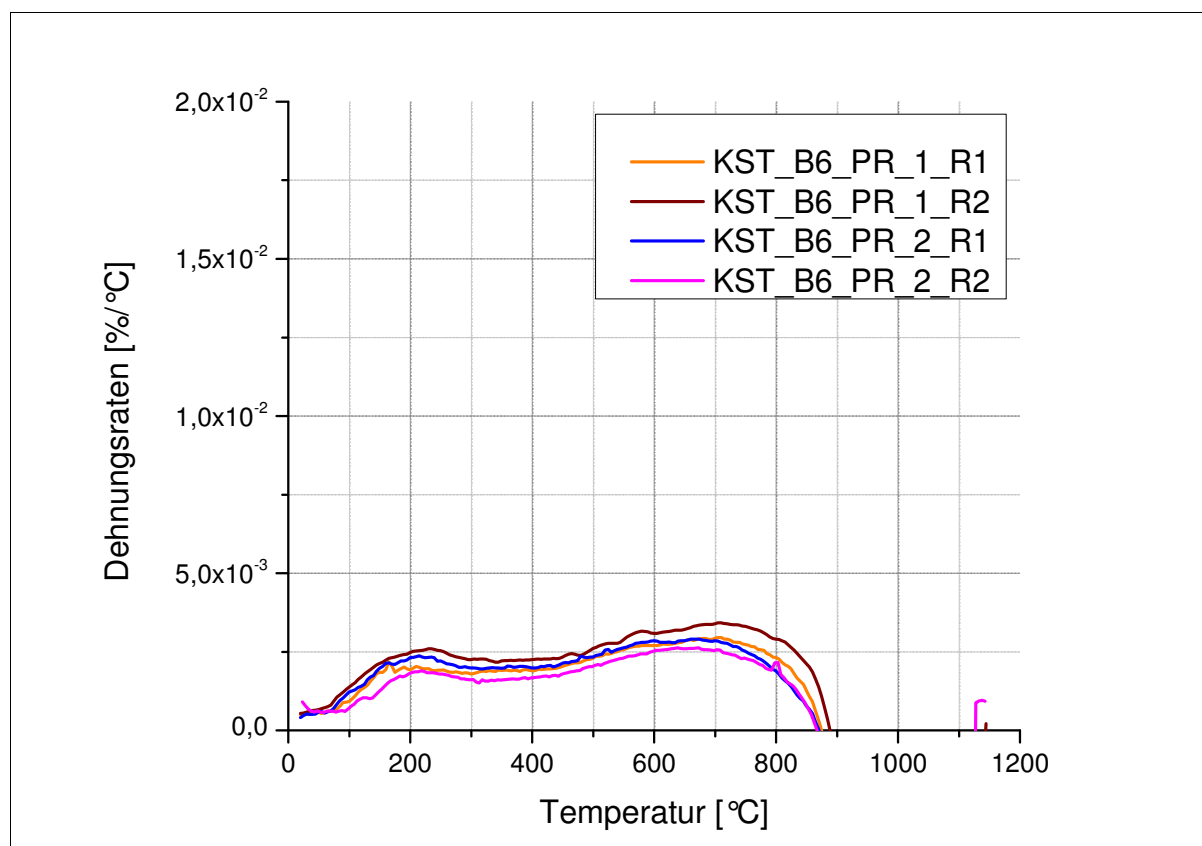


Abbildung 9.141: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes B6

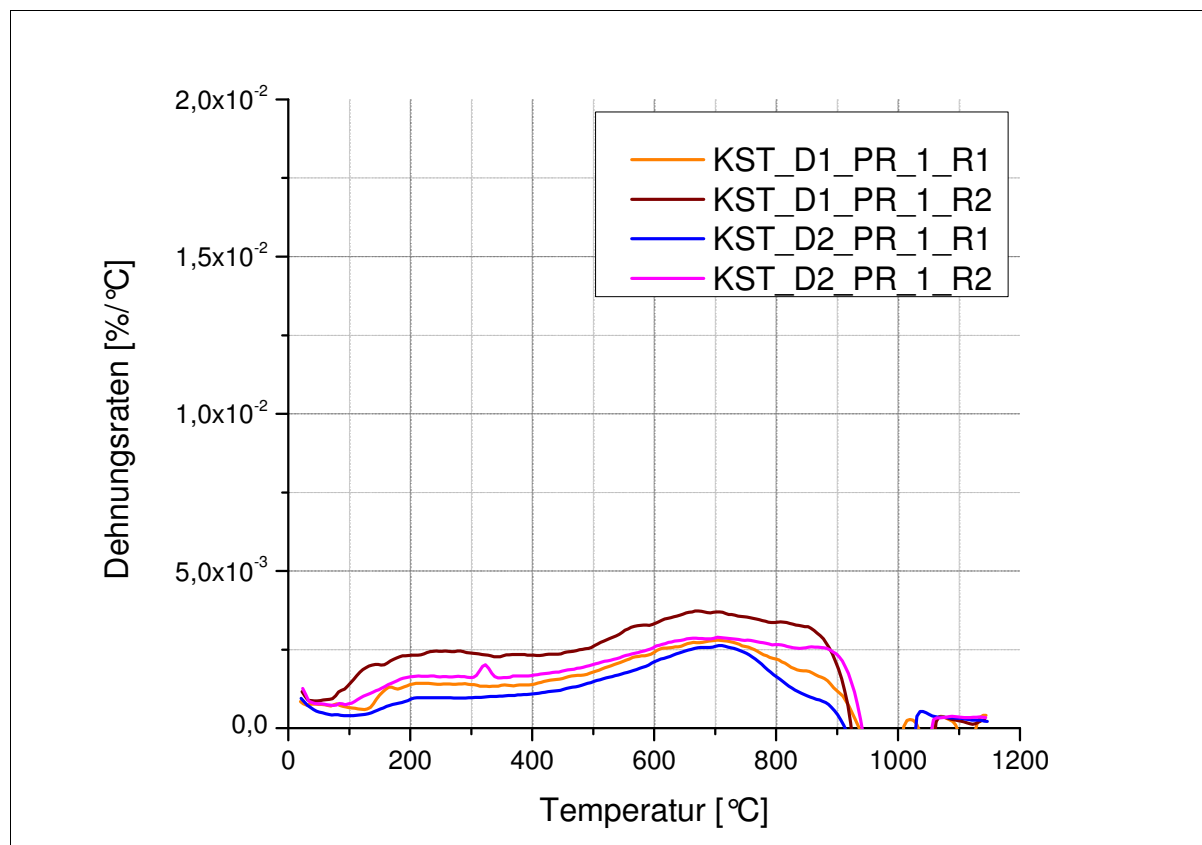


Abbildung 9.142: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke D1 und D2

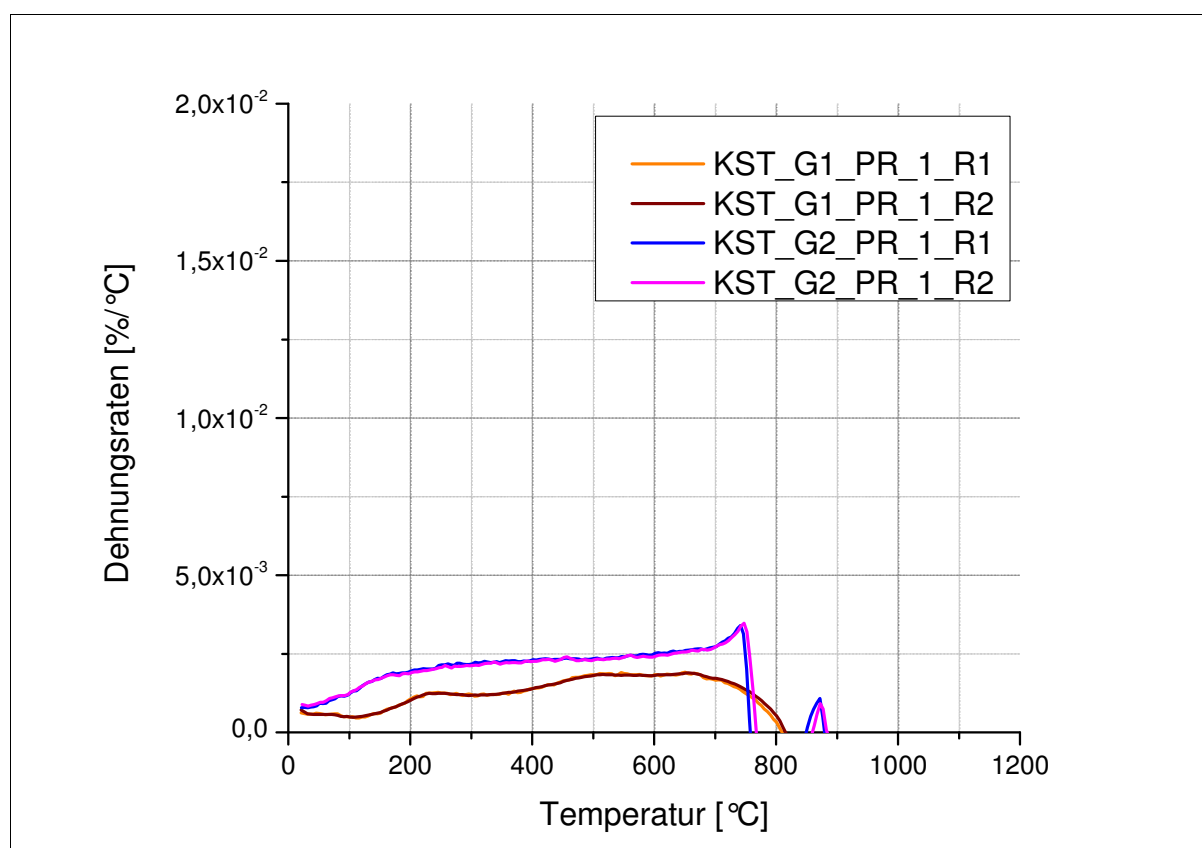


Abbildung 9.143: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke G1 und G2

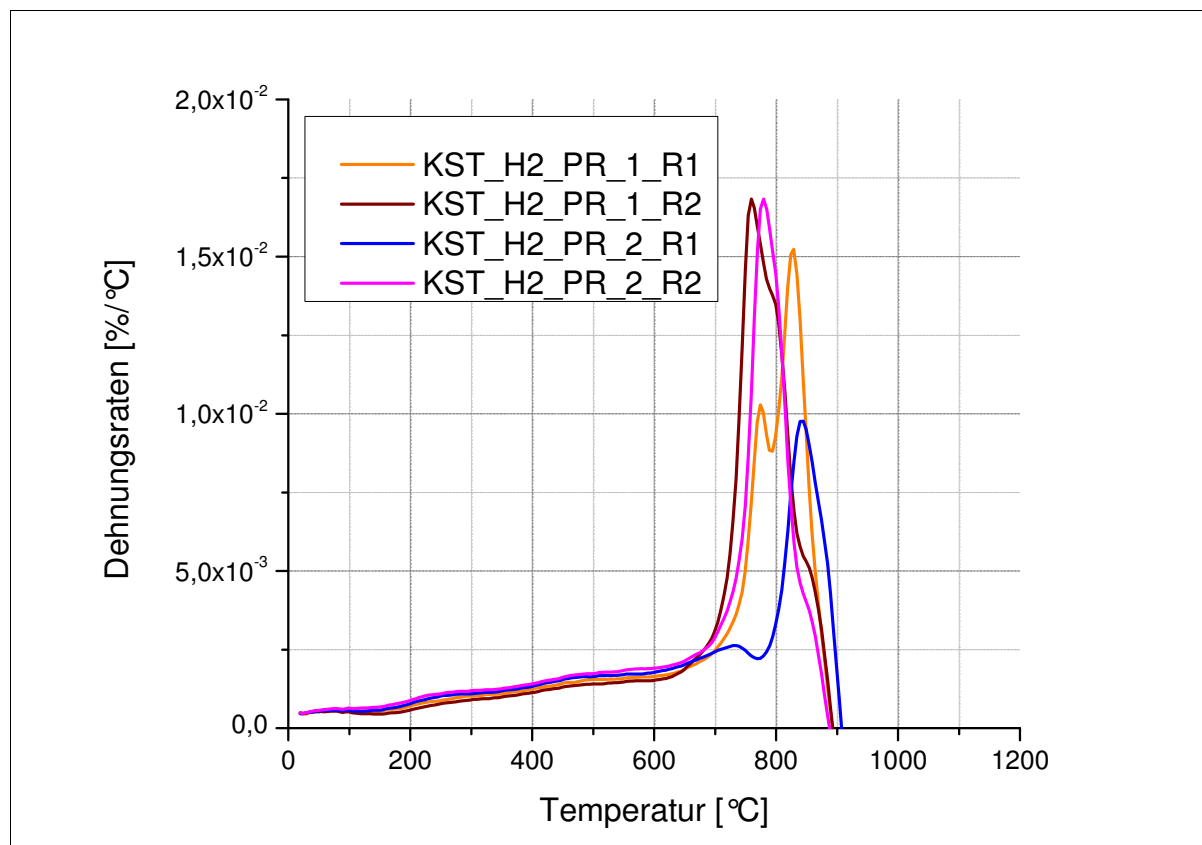


Abbildung 9.144: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke H

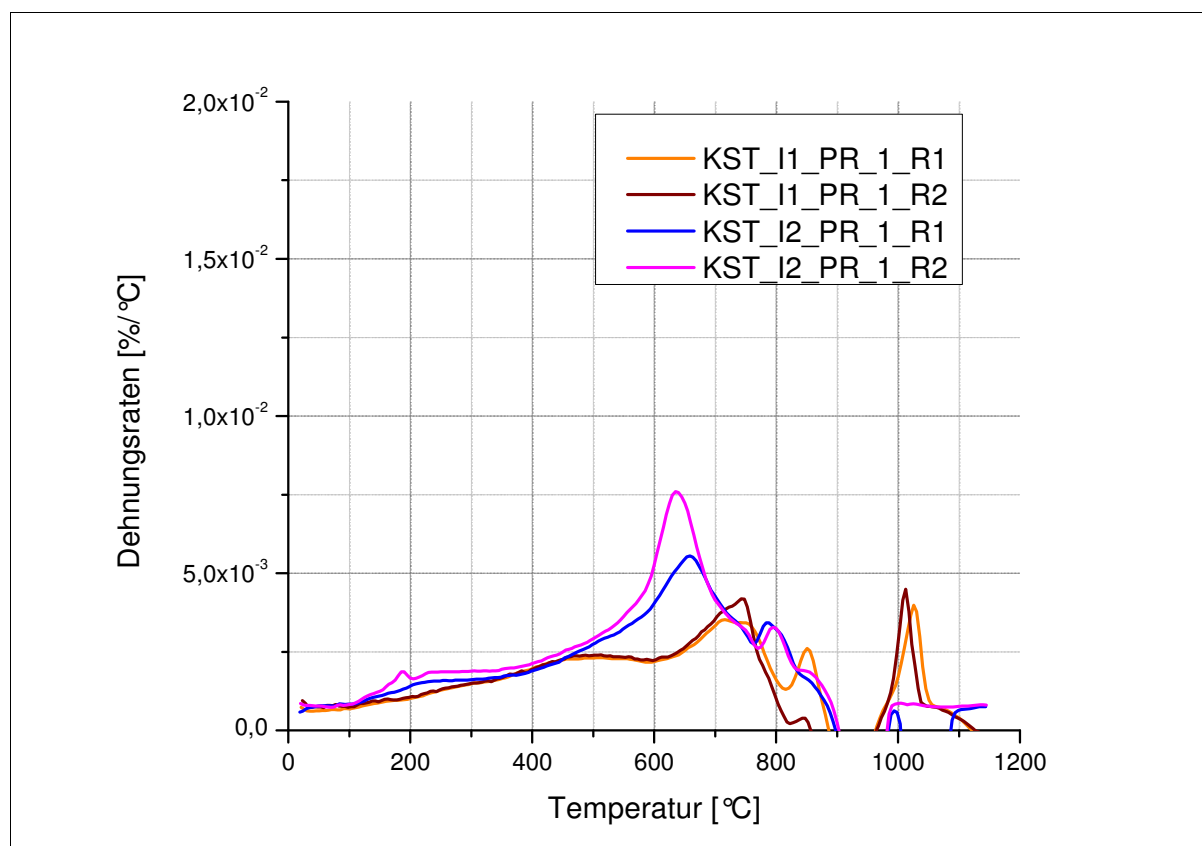


Abbildung 9.145: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke I1 und I2

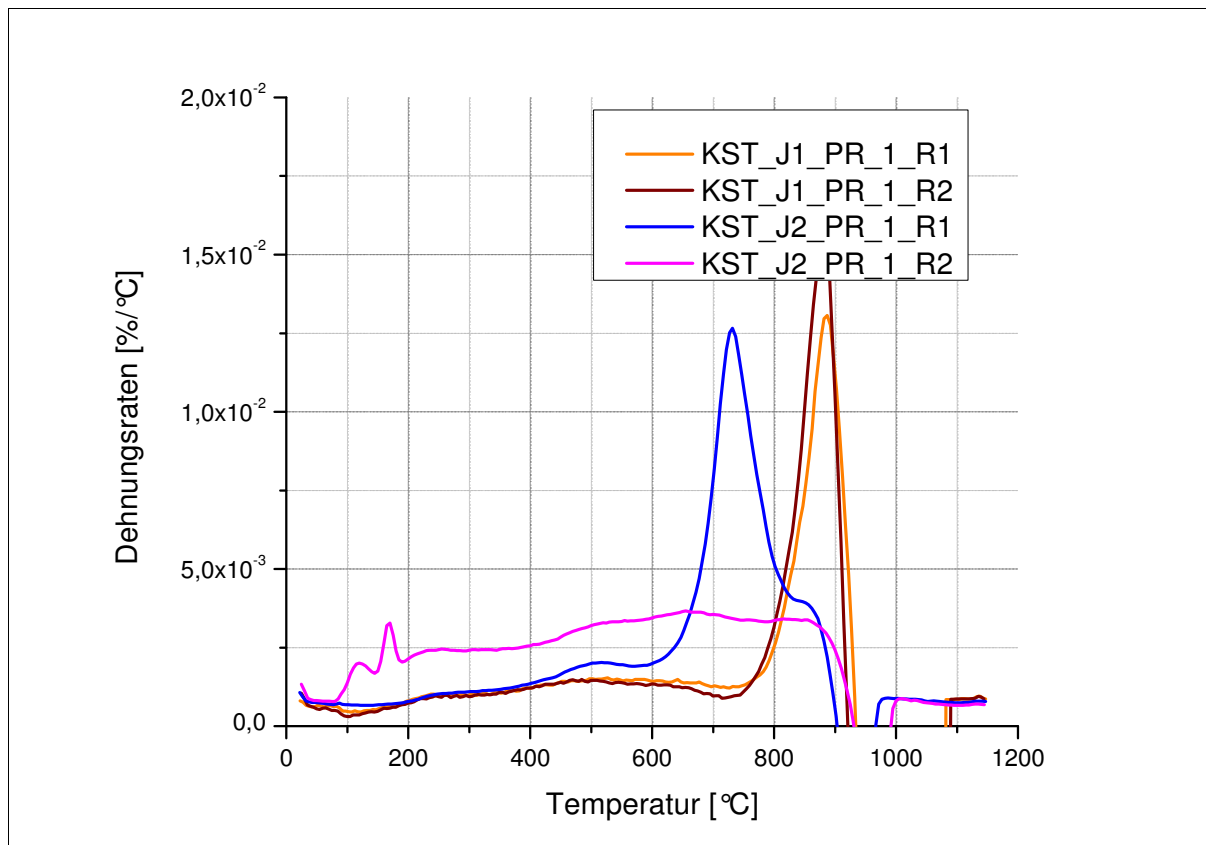


Abbildung 9.146: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke J1 und J2

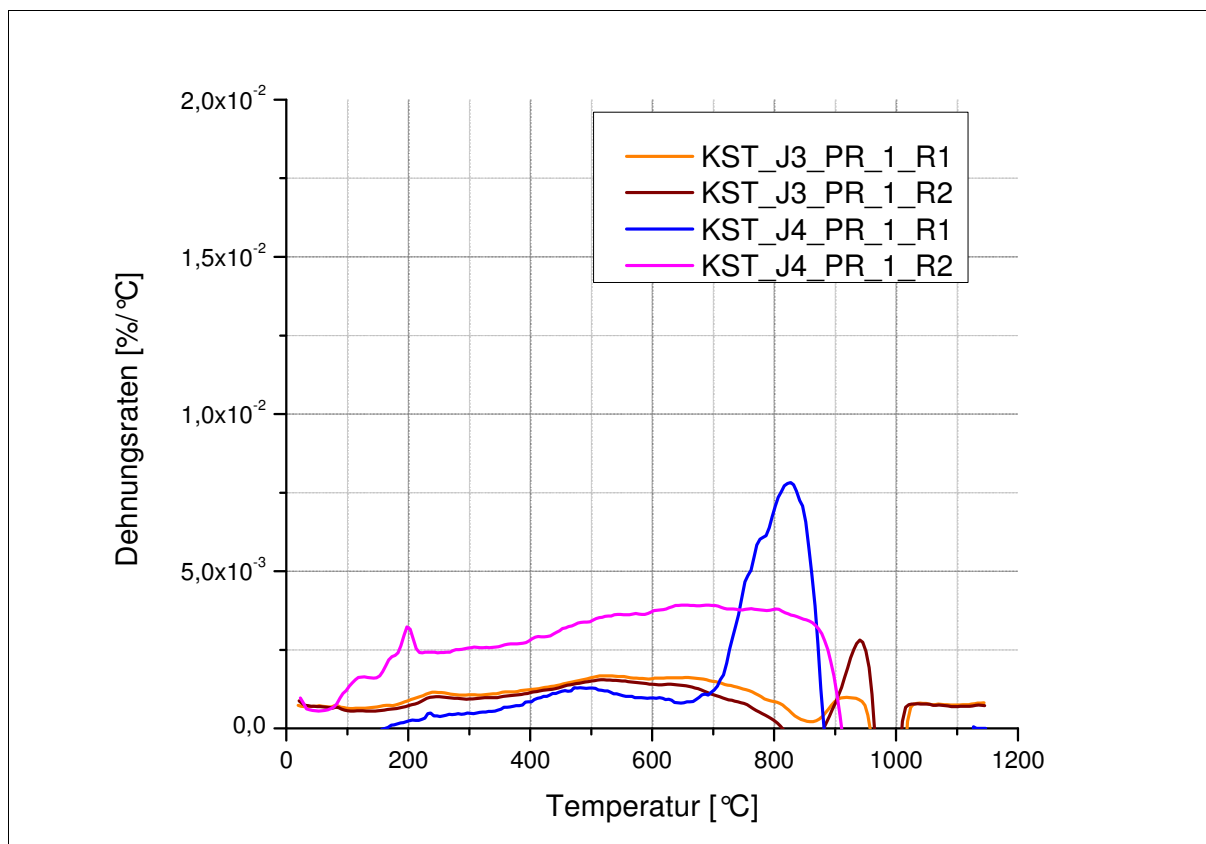


Abbildung 9.147: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke J3 und J4

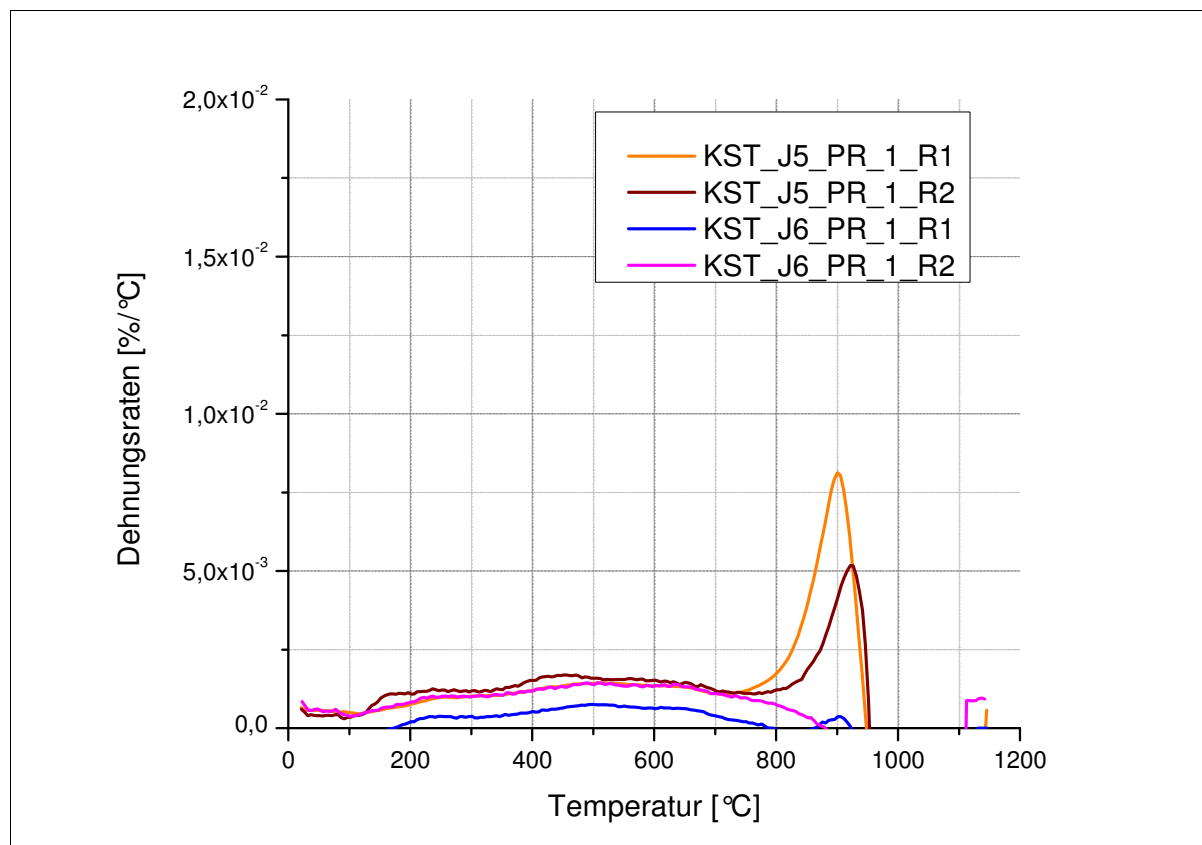


Abbildung 9.148: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke J5 und J6

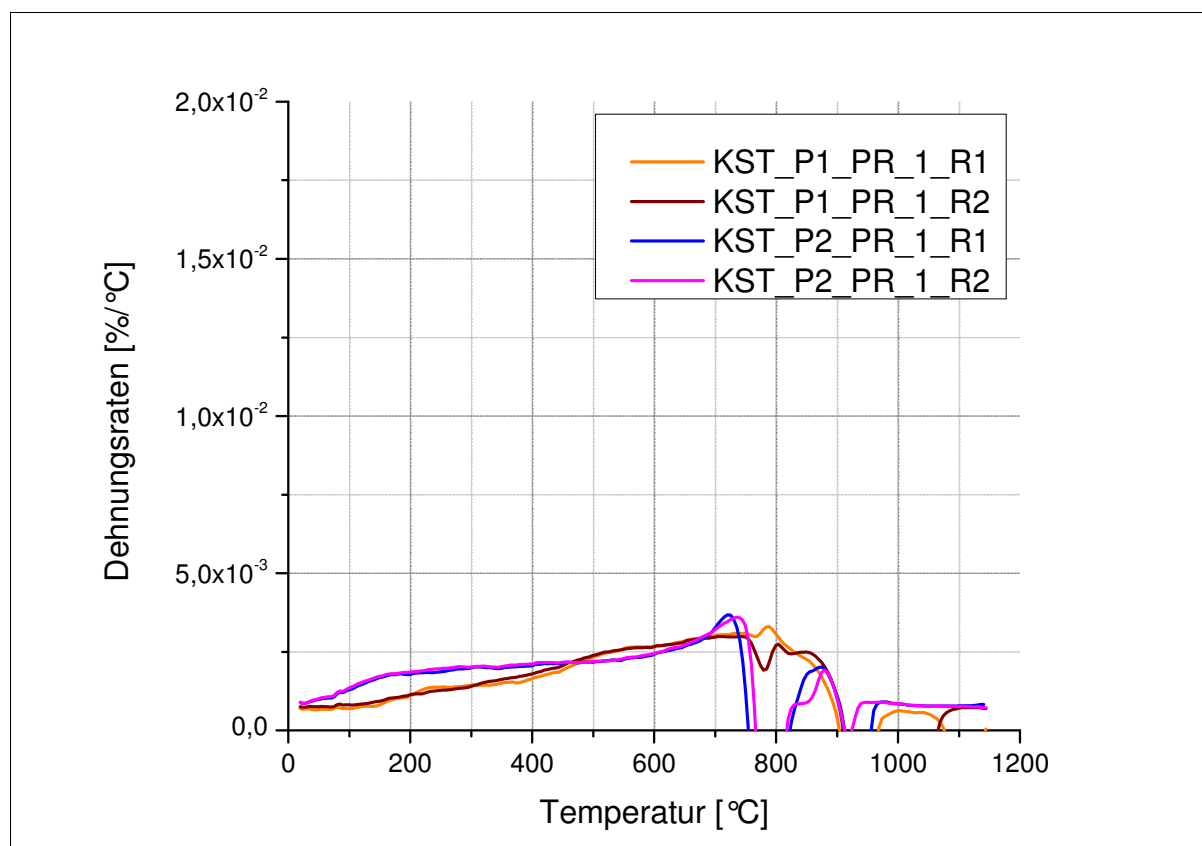


Abbildung 9.149: Dehnungsraten der Probenstäbchen der Handstücke P1 und P2

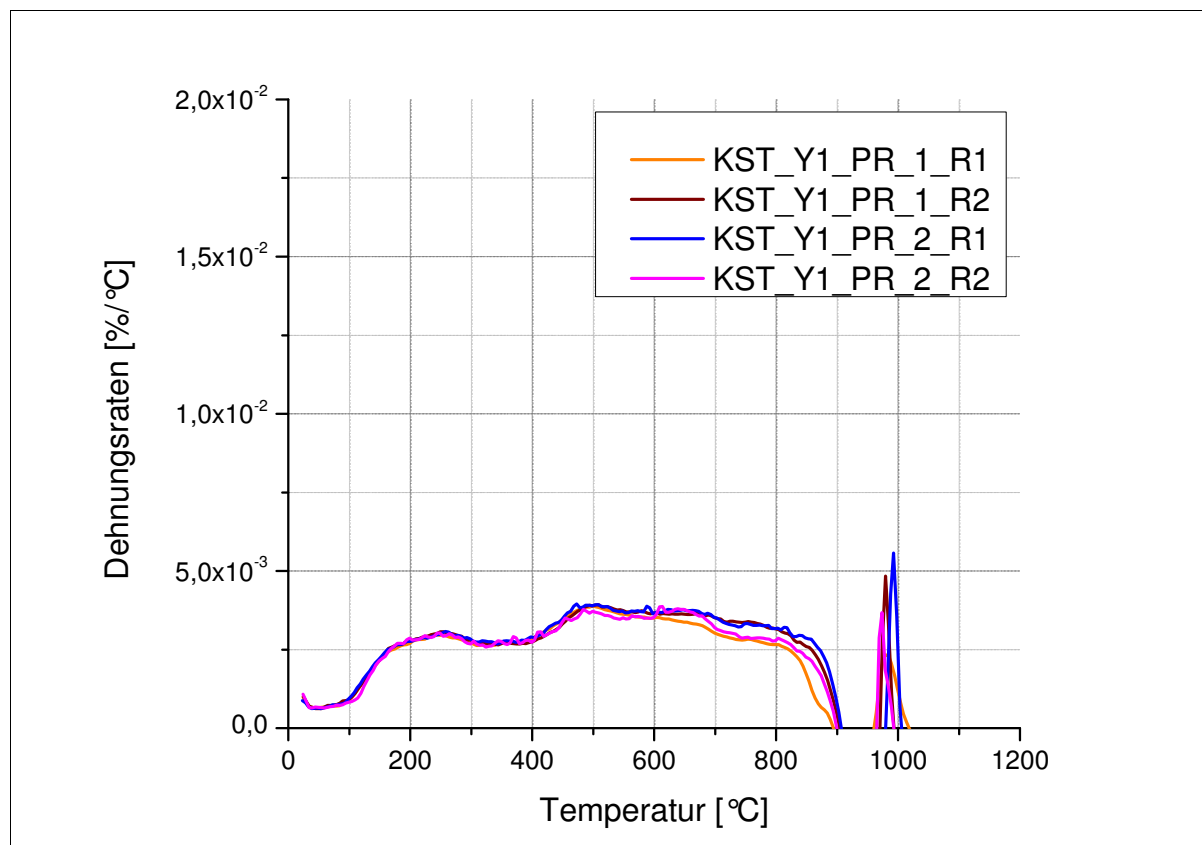


Abbildung 9.150: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes Y1

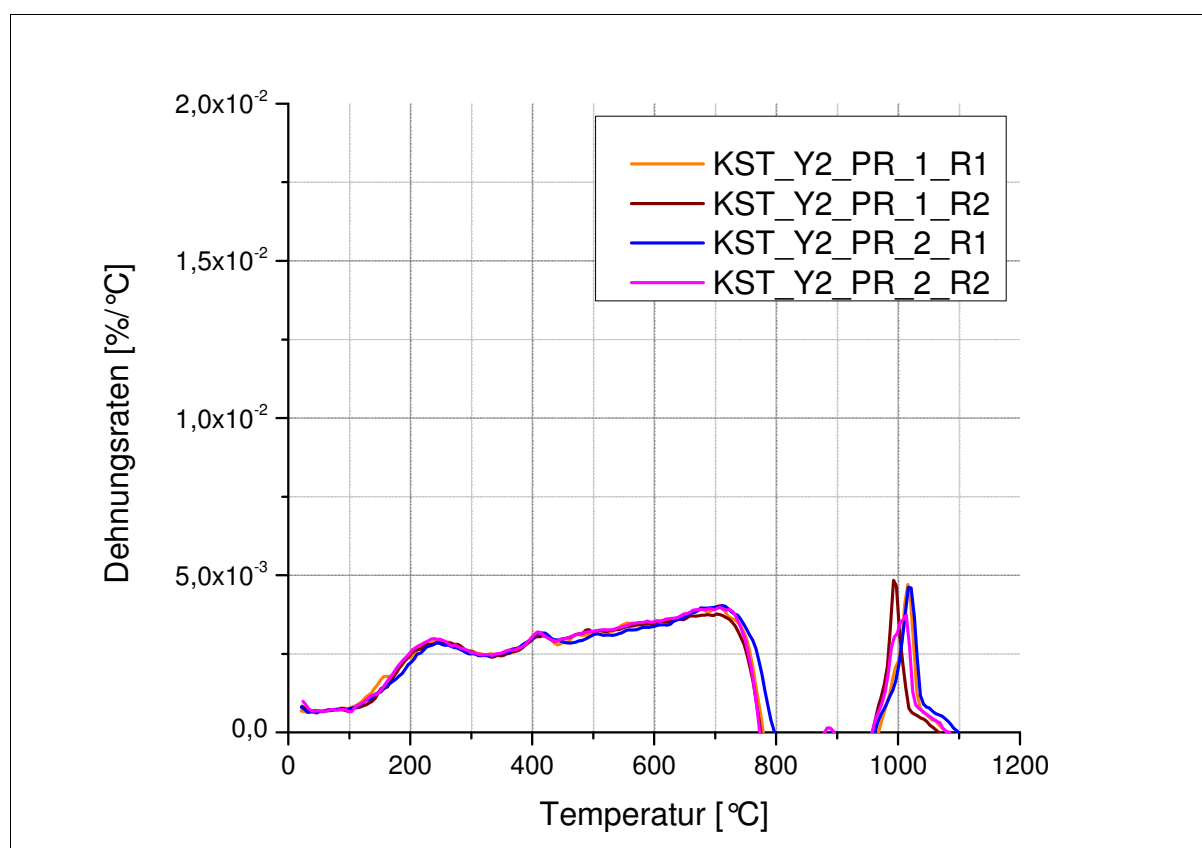


Abbildung 9.151: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes Y2

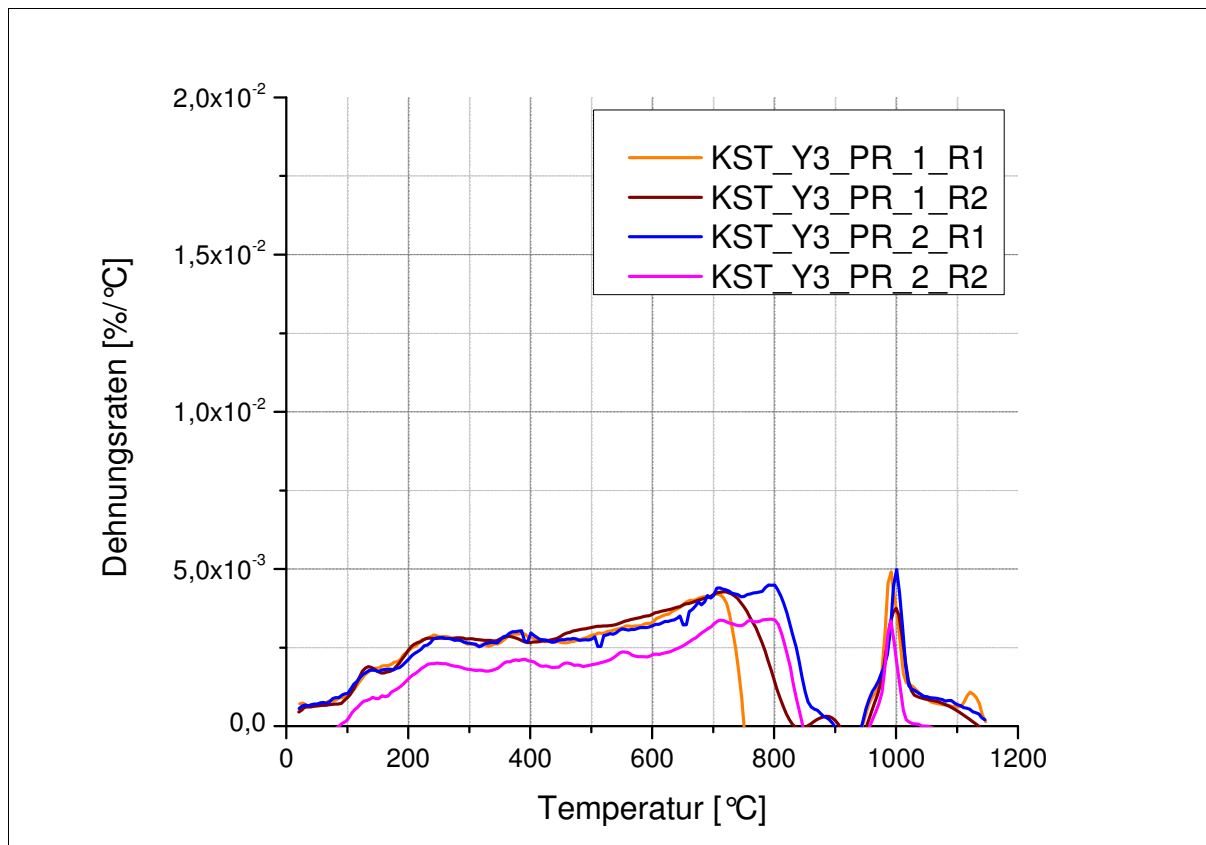


Abbildung 9.152: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes Y3

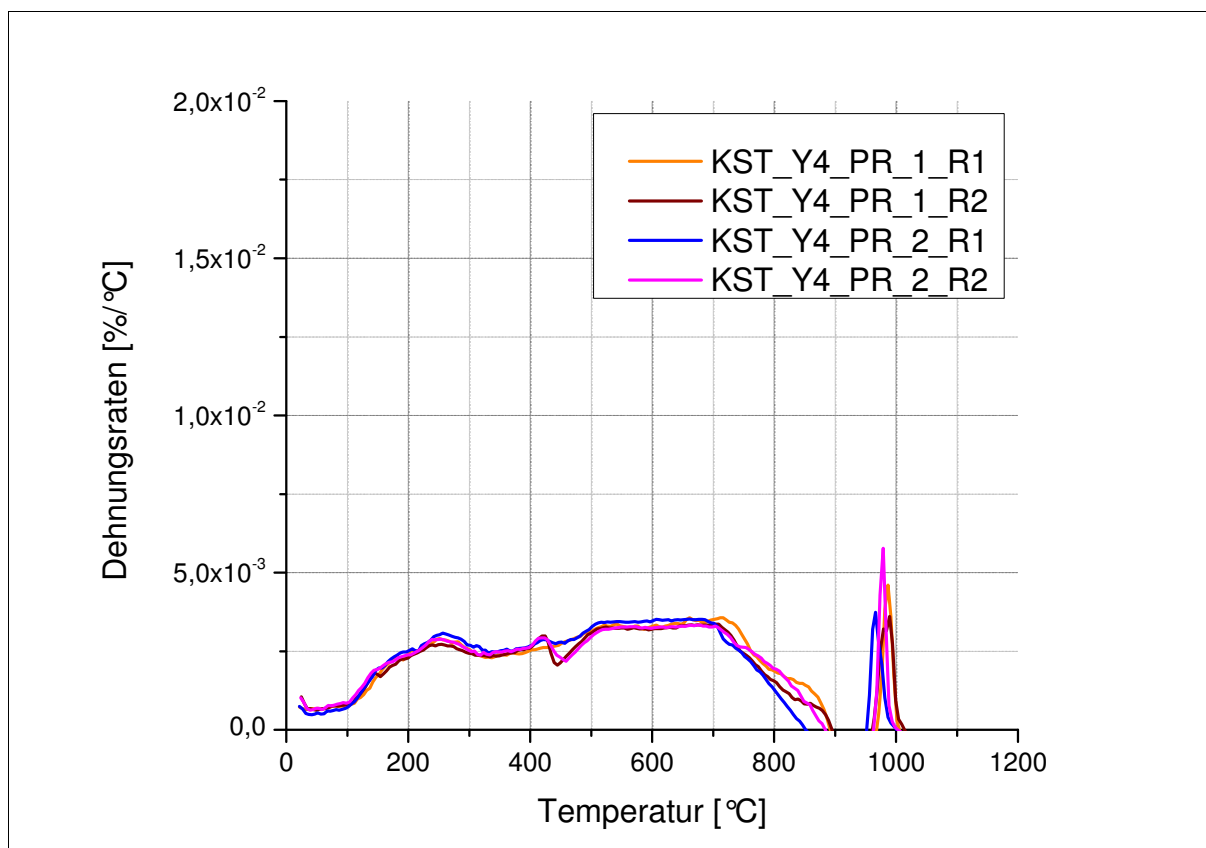


Abbildung 9.153: Dehnungsraten der Probenstäbchen des Handstückes Y4

### 9.7 DSC Diagramme

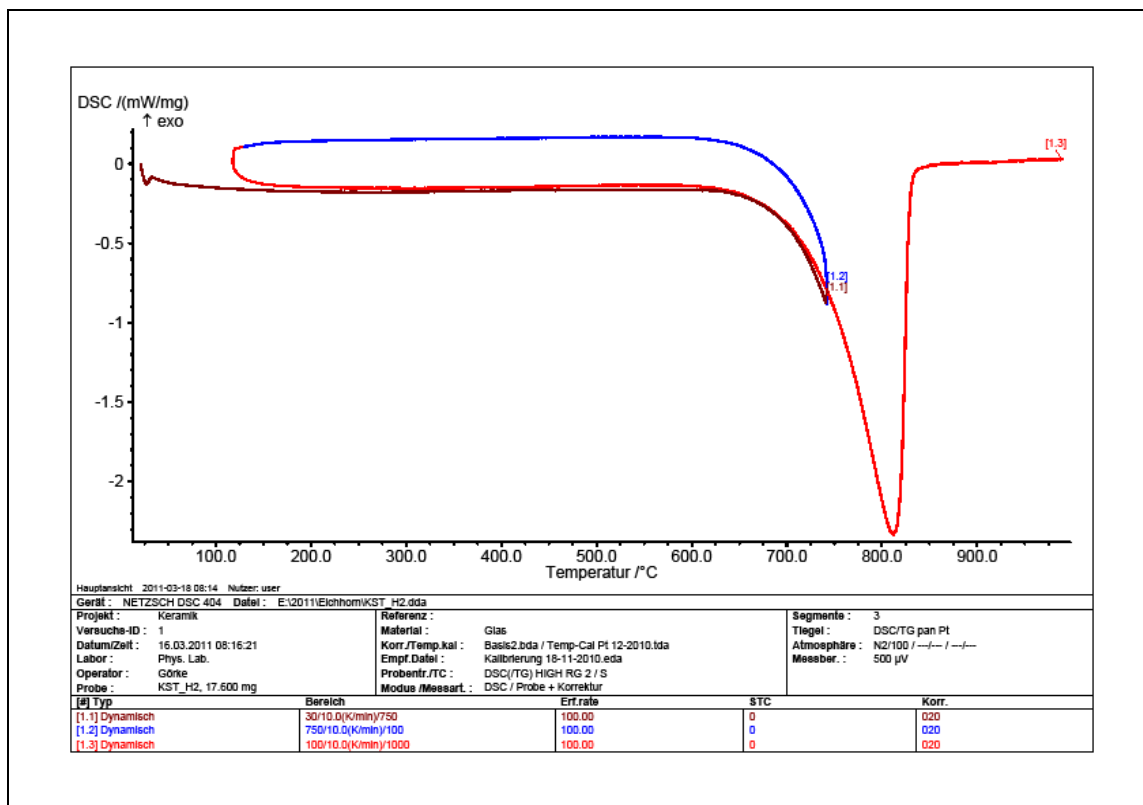


Abbildung 9.154: DSC- Diagramm des Handstückes H

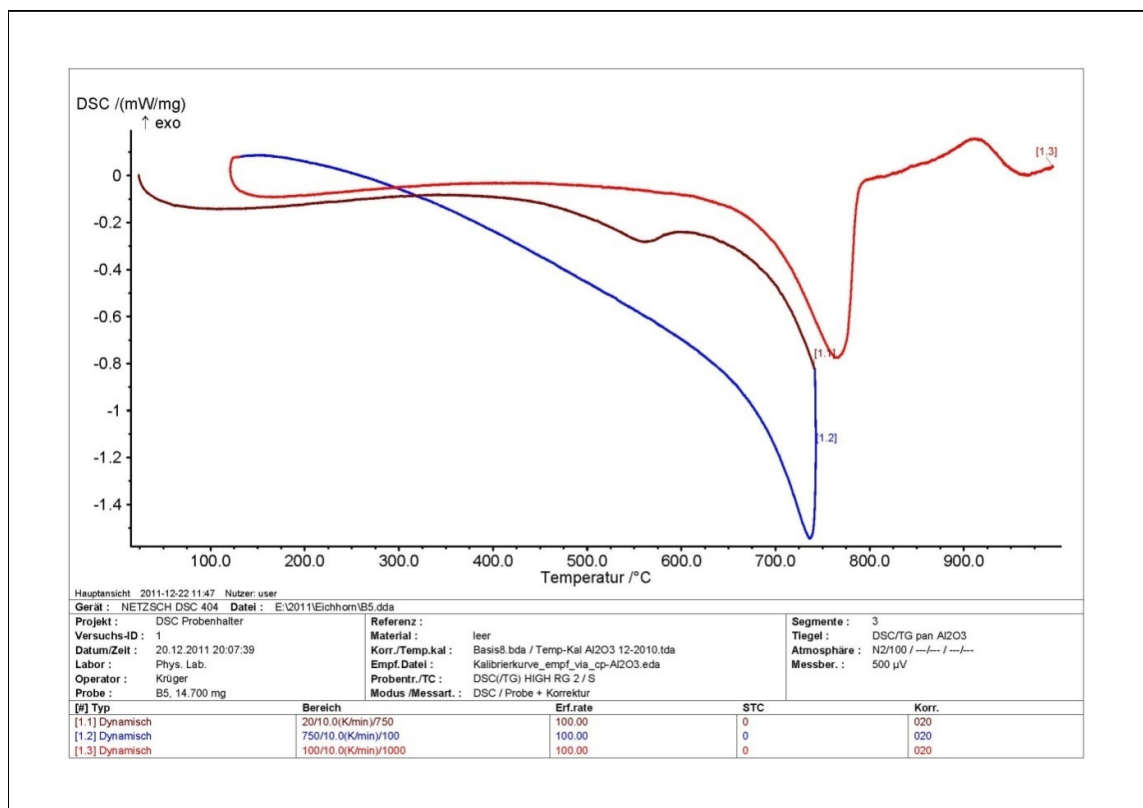


Abbildung 9.155: DSC- Diagramm des Handstückes B5