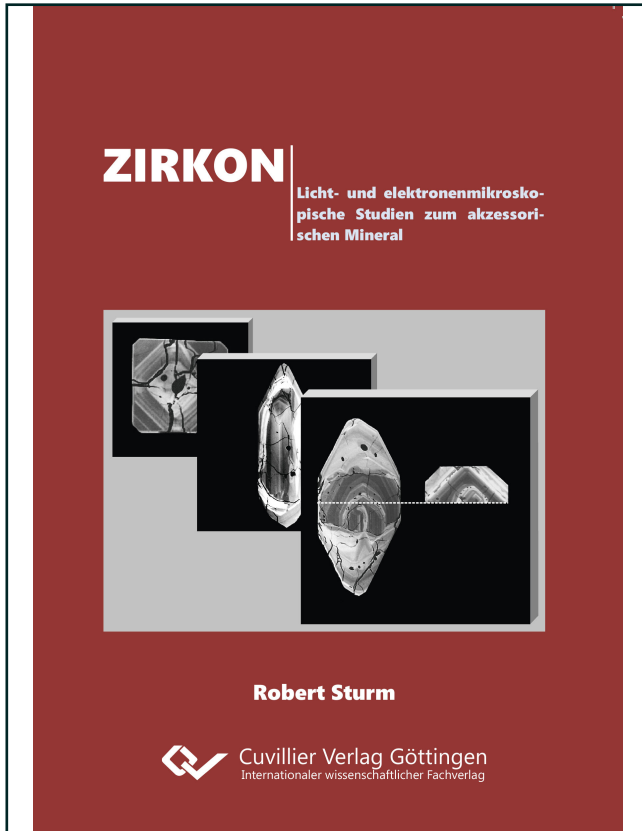




Robert Sturm (Autor)

## Zirkon

Licht- und elektronenmikroskopische Studien zum  
akzessorischen Mineral



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7588>

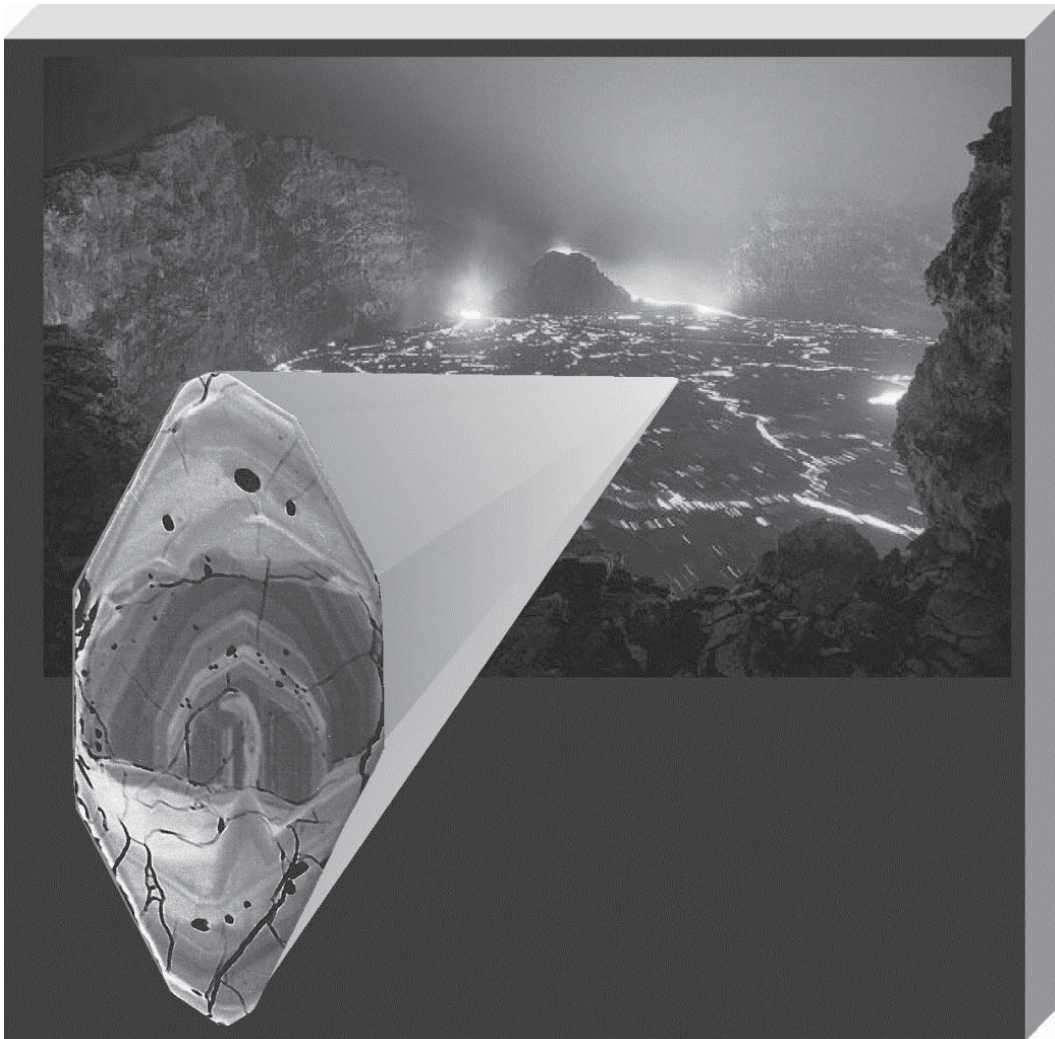
Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

1

# EINLEITUNG





## ■ 1 EINLEITUNG

### *1.1 Das Mineral Zirkon und seine Bedeutung*

Die hohe Bedeutung, welche das Mineral Zirkon bis zum heutigen Tag in der mineralogisch-petrografischen Forschung besitzt, ist auf mehrere Gründe zurückzuführen. Hier muss zunächst sicherlich dessen ubiquitäres Auftreten, das heißt sein Vorkommen in vielerlei Gesteinsarten, genannt werden. Zirkon konnte in magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteinen der Erdkruste, aber auch in Mantelxenolithen, Mondgestein, Meteoriten und Tektiten nachgewiesen werden (Speer, 1982; Sturm, 2014a). Hinsichtlich seiner Menge liegt Zirkon in all diesen Gesteinen lediglich als akzessorische Phase vor, deren Anteil an der Gesamtmineralogie sich auf Bruchteile eines Gewichtsprozents belaufen. Eine Anreicherung von Zirkonkristallen ist insbesondere für Schwerminerallagen in Sedimenten (Seifen; Pohl, 2005) und spezielle, durch magmatische Differentiation gebildete Gesteine (z. B. Zirkonsyenite; Speer, 1982; Deer et al., 1992) dokumentiert.

Neben seinem Vorkommen in zahlreichen Gesteinsarten zeichnet sich Zirkon noch zusätzlich durch seine erhöhte Resistenz gegenüber allen Arten mechanischer und chemischer Einwirkung aus. Dies liegt einerseits in der bemerkenswerten Härte (6,5-7,5 nach Mohs) des Minerals, andererseits aber auch in dessen geringfügiger Löslichkeit begründet (Deer et al., 1992). Diese Eigenschaft bringt es letztlich mit sich, dass Zirkon mehrere Zyklen der Erosion, des sedimentären Transportes, der Diagenese und der Metamorphose (oder Anatexis) zu überstehen vermag (Speer, 1982; Steyrer & Sturm, 1995, 2002; Corfu et al., 2003). Eine nennenswerte Bedeutung kommt Zirkon durch seinen Gehalt an diversen radioaktiven Elementen (z. B. U, Th) in der Geochronologie zu. Hier wird das Mineral unter anderem zur Ermittlung des Kristallisationsalters, der Abkühlungshistorie des Magmas und der Redistribution radioaktiver Isotope und ihrer Tochterprodukte herangezogen (Davis et al, 2003). Der Alpha-Zerfall radioaktiver Elemente geht vielfach mit einer sukzessiven Zerstörung des Zirkongitters (Metamiktisierung) und Amorphisierung der Mineralphase einher. Dieser intrakristalline Prozess resultiert in einer Veränderung (Verdunklung) der



Zirkonfarbe und Reduktion von Mineralhärte, Brechungsindex und Dichte (Chudoba & Stackelberg, 1936; Hanchar und Hoskin, 2003).

Die kommerzielle Bedeutung von akzessorischem Zirkon basiert hauptsächlich auf dessen thermischen Eigenschaften, welche eine Anwendung in der keramischen Industrie, in der Erzeugung von Gussformen und in der Herstellung feuerfester Materialien erlauben. Von geringfügigerer Bedeutung ist der Einsatz von Zirkon als Schleifmittel, dessen Vertreibung als Edelstein sowie dessen Verwendung als Quelle für die Elemente Zr und Hf (Deer et al., 1992).

### ***1.2 Wichtige Forschungsfragen in Verbindung mit Zirkon***

Der Beginn einer aus wissenschaftlicher Sicht relevanten Zirkonforschung kann in die 1950er Jahre gestellt werden, als man mit Hilfe des Lichtmikroskops morphologische Eigenarten von Zirkonkristallen aus magmatischen und sedimentären Gesteinen zu studieren begann (Poldervaart, 1950, 1955, 1956; Larsen et al., 1953; Larsen & Poldervaart, 1958). Das Wachstum des Zirkonkorns wurde aus Mangel an technischen Hilfsmitteln als formunveränderlicher Prozess mit gleichmäßiger Größenzunahme aller beteiligten Flächen interpretiert. Diese Sichtweise änderte sich in den 1960er Jahren zunehmend, als man heranging, den akzessorischen Zirkon aus verschiedenen Gesteinen anhand sogenannter Streupräparate systematisch zu untersuchen (Frasl, 1963; Hoppe, 1963; Marchenko, 1966). Die unter dem Lichtmikroskop erkennbare Zonierung zahlreicher Kristalle, welche deren Wachstumsverlauf nachzeichnet, ließ bereits oftmals eine Formveränderung während des Kristallisationsprozesses erkennen. Dies hatte zur Folge, dass man fortan das Wachstum magmatischer Kristalle als wesentlich dynamischeren und hinsichtlich seiner externen Steuerung auch komplexeren Vorgang zu verstehen begann. Frasl (1963) gelang es zudem, geometrische Spezifitäten der Zirkonkristalle herauszuarbeiten, indem er etwa systematische Messungen des pyramidalen Spitzenwinkels vornahm. Dabei konnte für die Zirkonform  $\{100\} + \{101\}$  ein apikaler Winkel von  $96^\circ$ , für die Zirkonform  $\{110\} + \{101\}$  hingegen ein apikaler Winkel von  $120^\circ$  festgestellt werden (Sturm, 1995, 1999a, 1999b, 1999c, 1999d, 2005, 2006, 2007a; Sturm & Finger, 1995).



In den 1970er Jahren widmete man sich vermehrt der Frage nach dem Zusammenhang zwischen Wachstumverlauf von akzessorischem Zirkon und physikalisch-chemischen Eigenschaften der magmatischen Quelle. Köhler (1970) konnte beispielsweise zeigen, dass Zirkonkristalle je nach Differentiationsgrad des Magmas durch teils signifikante morphologische Unterschiede gekennzeichnet sind. Basierend auf dieser Erkenntnis führten Pupin & Turco (1972, 1975) eine statistische Evaluation der in unterschiedlichen granitischen Gesteinen anzutreffenden Zirkonmorphologien durch. Anhand dieser systematischen Studien konnte einerseits eine genauere Klassifikation der Zirkonformen magmatischer Gesteine (siehe Kapitel 1.6) erstellt, andererseits jedoch auch die seit längerer Zeit bestehende Hypothese eines differenzierten Wachstumsverlaufes der Kristalle bestätigt werden. Die Autoren definierten auf Basis ihrer Ergebnisse Wachstumstrends („Typological Evolutional Trend“) für Zirkonkristalle aus verschiedenen magmatischen Milieus. Demnach zeichnen sich initiale Wachstumsstadien des Zirkons durch ein Vorherrschen der Kristallformen  $\{100\}$  und  $\{211\}/\{101\}$  aus, tendieren aber mit fortschreitender Kristallisationsdauer immer stärker zu den Formen  $\{110\}$  und  $\{101\}$ . Pupin (1980) vermutete einen Zusammenhang dieses Wachstumsverlaufes mit der sich fortwährend verändernden Temperatur und Chemie des Wirtsmagmas. Er ging zudem soweit, die für ein Granitgestein konstatierte Zirkonmorphologie heranzuziehen, um genauere Erkenntnisse zur Genese des Wirtsgesteins zu erlangen. Diese petrogenetische Indikation mit Hilfe von akzessorischem Zirkon findet bis zum heutigen Tage ihre Verwendung, läuft jedoch unter anderen Rahmenbedingungen und nach wesentlich moderneren Erkenntnissen ab (Sturm, 2010a, 2014b). Eine Quantifizierung des Zirkonwachstums anhand elektronenmikroskopischer Visualisierungstechniken ist im Wesentlichen in die 1980er und 1990er Jahre zu stellen, als es zur sukzessiven Etablierung geeigneter Präparationstechniken kam (Paterson et al., 1989, 1992; Vavra, 1990, 1994; Benisek & Finger, 1993; Sturm, 2008a). Vavra (1990, 1993, 1994) konnte anhand ausgedehnter Kathodolumineszenzstudien an Zirkonschnitten eine statistische Erhebung des Wachstums einzelner Zirkonflächen durchführen und zudem demonstrieren, dass





das Kristallwachstum von mehr physikalischen und chemischen Faktoren als bis dahin angenommen bestimmt wird. In der Studie von Benisek & Finger (1993) konnte gezeigt werden, dass Zirkon nicht zwingend den von Pupin (1980) eingeführten Wachstumstrends zu folgen hat, sondern von diesen in mehrerlei Hinsicht abzuweichen vermag. Eine Bestätigung dieser Erkenntnis wurde wenig später auch von Sturm (1999b, 2004a, 2004b, 2009a) erbracht. Der Autor konnte mit Hilfe kombinierter Längs- und Querschnitte einzelner Zirkonkristalle den Nachweis dafür erbringen, dass Zirkon in Granitoiden mit spezifischem Chemismus gänzlich von dem ihm angedachten Wachstumsverlauf *sensu* Pupin abzuweichen vermag. Seit dieser fundamentalen Studie ist man vermehrt danach bestrebt, neue Wachstumstrends für Zirkon zu definieren – ein Vorhaben freilich, welches sich aufgrund des präparatorischen Aufwandes recht schwierig gestaltet.

Eine andere wissenschaftliche Frage, die im Zusammenhang mit Zirkon zu sehen ist, betrifft die Datierung bestimmter, das akzessorische Mineral enthaltender Gesteinskörper. Dafür bedient man sich der in Zirkon vorhandenen Konzentration an radioaktiven Elementen (U, Th). Durch Kenntnis der ursprünglichen Uran- und Thoriumkonzentration, welche man aus dem Gehalt radioaktiver Zerfallsprodukte ( $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ) deduktiv ermitteln kann, und der gegenwärtigen Uran- und Thoriumkonzentration lässt sich unter Zuhilfenahme des radioaktiven Zerfallsgesetzes ein Zirkonalter (= Kristallisationsalter) errechnen (Faure, 1977; Jäger & Hunziker, 1979; Gebauer & Grünenfelder, 1979; Speer, 1982). Aufgrund dreier Tochterisotope lassen sich für Zirkon insgesamt drei radioaktive Zerfallsreihen konstruieren, welche auch drei Alterswerte liefern. Bei übereinstimmenden Daten spricht man von einem konkordanten Zirkonalter, wohingegen unterschiedliche Daten, wie sie häufig bei geochronologischen Untersuchungen auftreten, eine Diskordanz indizieren. Diskordante Zirkonalter resultieren aus einer Ab- oder Zufuhr von Blei, Uran und Thorium. Die Gründe für eine derartige Konzentrationsänderung besagter Elemente sind sehr vielfältig und schließen thermische oder chemische Ereignisse (Metamorphose, Verwitterung), intrakristalline Diffusion, Metamiktisierung und Rekristallisationsprozesse mit ein (Speer, 1982).



Neben chemischen Methoden zur Altersbestimmung wurden in der Vergangenheit auch alternative geochronologische Techniken zur Anwendung gebracht, unter denen etwa die Spaltspurenmethode (Gleadow et al., 1976), die Thermolumineszenzdatierung (Vaz & Senftle, 1971) oder die mikrochemische Analyse mit Hilfe der Elektronenstrahlmikrosonde (Sommerauer, 1974, 1976; Medenbach, 1976; Speer, 1982) für teils interessante und im geologischen Zusammenhang bedeutende Ergebnisse sorgten. Moderne Geochronologie an akzessorischem Zirkon lässt sich anhand der Ionensonde (SHRIMP) mit hoher Zielgenauigkeit und Selektivität durchführen, was beispielsweise bei Vorhandensein unterschiedlicher Zirkonphasen (siehe dazu Kapitel 3.6) zu einer dringenden Notwendigkeit gerät (Friedl et al., 2000). Datierungen alter Zirkonkerne und jüngerer Überwachungen bestätigen vielfach die Annahme, wonach ein einzelner Zirkonkristall mehrere orogene Zyklen in seinem Inneren nachzuzeichnen vermag (Sturm, 2004a).

### ***1.3 Zukünftige Problemfelder***

Aufgrund seines ubiquitären Vorkommens und seiner teils einzigartigen physikalischen Eigenschaften wird Zirkon auch in Zukunft im Blickpunkt der mineralogischen und petrografischen Forschung stehen. Neben seinem Wert in der Geochronologie und für die Indikation petrogenetischer Prozesse interessiert vor allem sein Gehalt an Einschlussphasen (Sturm, 2009a, 2009b), welche mittels moderner Techniken analysiert und zur genaueren Deskription des Kristallisationsprozesses herangezogen werden können. In der Strukturgeologie gewinnt Zirkon infolge seiner mechanischen und chemischen Resistenz zunehmend an Bedeutung, lässt er sich doch für die Volumens- und Massenbilanzierung in duktilen Scherzonen heranziehen (Steyrer & Sturm, 2002; Sturm & Steyrer, 2003a, 2003b; Sturm, 2008b, 2011) und bietet damit eine Alternative zum Modell der immobilen Elemente (Gresens, 1967; Grant, 1986; Sturm, 2003, 2016a). In diesem Zusammenhang ist das Verhalten von Zirkon bei hochgradigen Metamorphoseereignissen, welches in der Vergangenheit für intensive Diskussionen sorgte, zu nennen. Es gilt hier insbesondere zu klären, ob bereits voranatektische Metamorphosestadien durch entsprechende Diffusionsprozesse über