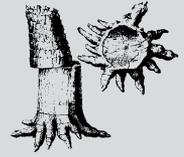


# Zirkone aus Bachsedimenten im Sächsischen Granulitgebirge

**Dagmar Dietrich, Wolfram Modaleck, Christel Pönitz,  
Steffen Schulze und Thomas Lampe, Chemnitz**



*Zum Andenken an das Mitglied des Freundeskreises des Museums für Naturkunde Chemnitz e. V.  
und hochgeschätzten Kollegen der Technischen Universität Chemnitz  
Prof. Dr. Walter Hoyer (12.12.1944–15.10.2016)*

## Kurzfassung

Bei der Untersuchung von Schlichen aus verschiedenen Bächen im Sächsischen Granulitgebirge fallen regelmäßig auch Zirkone unterschiedlicher Form und Größe auf. Neben kleinen Kristallen vom Grundgebirgstyp aus dem Mittweidaer Granit (~ 0,1 mm) sind 1-3 mm große gut ausgebildete klare Kristalle, die gelegentlich nadlige Einschlüsse enthalten, sowie 3 bis 8 mm große klare oder trübe, graue Bruchstücke zu finden, bei denen es sich entsprechend eines Tests mit UV-Licht ebenfalls um Zirkone handelt. Dieser Typ ist aus den anstehenden Gesteinen des Granulitgebirges, des Erzgebirges oder des Vulkanitkomplex Chemnitz-Flöha nicht bekannt. Ob sie durch das eiszeitliche Geschiebe aus Skandinavien herantransportiert wurden oder möglicherweise aus dem Nordwest-Sächsischen Vulkanitkomplex stammen, erfordert umfangreiche Untersuchungen. Über erste beispielhafte Ansätze wird in dieser Studie berichtet.

Als magmatische Frühausscheidung mit großer Stabilität können akzessorische Zirkone mehrere Verwitterungs- und Sedimentationszyklen überstehen. Solche Zirkone behalten viele Eigenschaften, die aus ihrer Entstehung resultieren wie das Alter im Kern, die chemische Zusammensetzung und in etwa ihre Form und Größe. Modifikationen während des fluviatilen Transports betreffen Größenverringerungen durch Kantengerundung, sowie die Entstehung von Rissen und Kollisionsmarken, die durch die physikalische Sortierung und den mechanischen Abrieb verursacht werden. Auch Überprägungen durch hydrothermale Gesteins-Metamorphosen können stattfinden. Neben der Datierung des Kristallisations- und Metamorphose-Alters können durch die Typisierung der Morphologie und durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen Informationen über Bildungs- und Metamorphose-Bedingungen sowie Transportmedien und zurückgelegte Wege im Sediment gewonnen werden.

Aus Sedimentproben von vier verschiedenen Fundpunkten im sächsischen Granulitgebirge wurden Zirkone extrahiert, an denen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie typologische und morphologische Untersuchungen einschließlich Kathodolumineszenz und Rückstreuelektronen-Beugung vorgenommen wurden. Die Ergebnisse seien Anregung zu umfassenderen Untersuchungen hinsichtlich der Provenienz der Zirkonpopulationen in Bach-Schlichen des Sächsischen Granulitgebirges, ähnlich den bereits vorliegenden Untersuchungen an Zirkonen aus den granitoiden Gesteinen des Sächsischen Granulitgebirges.

## Abstract

Sediments in streams located in the Saxon Granulite Massif contain clear well-formed zircons up to several millimetres in size. Such zircons are not known from the bedrocks of the Saxon Granulite Massif, the Erzgebirge or the NW Saxon Volcanite Complex. First investigations concerning the provenience of the zircons are shown in this work.

Anschrift der Autoren

Dr. Dagmar Dietrich, Prof. Dr. Thomas Lampe, Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik, TU Chemnitz, 09107 Chemnitz

Wolfram Modaleck, Neefestraße 57, 09119 Chemnitz

Christel Pönitz, Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, TU Chemnitz, 09107 Chemnitz,

Steffen Schulze Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, TU Chemnitz, 09107 Chemnitz

As magmatic primary crystallization products with great stability, accessory zircons withstand several weathering and sedimentation cycles. Zircons retain many properties linked with their formation such as age of the core, chemical composition, shape and size. Modifications during sedimentation involve size reduction due to rounding of edges, formation of cracks and collision marks which have their origin in physical sorting, mechanical abrasion, and overprints by hydrothermal metamorphic processes. Zircons provide information about ages of crystallization and metamorphism, conditions of formation and alteration, as well as media and distances of transport.

A small number of zircon grains gained from sediment samples of four streams of the Saxon Granulite Massif served as a case study to collect data for morphological and typological classification. This is done by optical and scanning electron microscopy, supplemented by cathodoluminescence and electron backscatter diffraction. The received results give rise to a more detailed investigation of the provenance of the non-uniform zircon populations originating from sediments or granitoids of the Saxon Granulite Massif.

## Einleitung

Zirkon ist ein Schwermineral mit der chemischen Formel  $ZrSiO_4$ . Im Juwelenhandel hat Zirkon, als natürlicher Edelstein u.a. Hyazinth und Jargon genannt, in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, nicht zu verwechseln mit dem preiswerten Diamantersatz Zirkonia, dem synthetisch erzeugten Oxid des Übergangsmetalls Zirkonium. Wesentlich kleiner in den Abmessungen ( $0,23 \times 0,23 \times 0,43$  mm), aber viel wertvoller für die Geologie unseres Planeten ist ein Zirkon mit der Bezeichnung 01JH36-69. Mit einem Alter von  $4,374 \pm 0,006$  Ga, also mit rund 4,4 Milliarden Jahren ist er lediglich rund 100 Millionen Jahre jünger als die Erde selbst (VALLEY et al. 2014, 2015) und damit das bisher älteste Fundstück.

Für die Geochronologie sind Zirkone so wertvoll, weil sie primär als frühes Kristallisationsprodukt in magmatischen Gesteinen entstehen und radioaktive Beimengungen enthalten, aus deren Zerfallsreihen auf das Entstehungsalter geschlossen werden kann. Zur Ermittlung dienen die Isotopenverhältnisse Uran/Blei bzw. Thorium/Blei, die durch Zerfall der instabilen radioaktiven Isotope zu stabilen Blei-Isotopen entstehen. Weil Blei-Ionen im Gegensatz zu Uran- und Thorium-Ionen weder die passende Ladung noch die passende Größe haben, um schon bei der Kristallisation als Fremdelement ins Zirkon-Gitter eingebaut zu werden, kann nur der radioaktive Zerfall die Ursache für Blei im Zirkon sein; und bis  $900^\circ\text{C}$  (der sogenannten Schließungstemperatur) bleibt es im Gitter gefangen. Gegenüber mechanischen Beanspruchungen (Erosion), chemischen Einflüssen (Verwitterung) und Metamorphosen erweist sich Zirkon als besonders beständig. Anstatt sich aufzulösen, neigen Zirkone eher zum Wachstum, so dass manche Zirkone, ähnlich Jahresringen in Bäumen, verschiedene alte Zonen aufweisen, deren individuelles Alter sich bestimmen lässt. Der dazu ausgewertete radioaktive Zerfall von  $^{238}\text{U}$  zu  $^{206}\text{Pb}$ , von  $^{235}\text{U}$  zu  $^{207}\text{Pb}$  und von  $^{232}\text{Th}$  zu  $^{208}\text{Pb}$  setzt  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung frei, deren Energieeintrag die Fernordnung des Kristallgitters stören kann. Dabei bilden sich amorphe (metamikte) Domänen, die als trübe Bereiche im Kristall in Erscheinung treten. Sogar komplett glasartig umgewandelte Zirkone (Malakone) sind bekannt; dann erweist sich die für die Geochronologie so wertvolle Radioaktivität im Zirkon als Achilles-Ferse, weil sie die Gitterordnung auflöst. Mit Zirkonium stets vergesellschaftet ist das schwerere homologe Element Hafnium. Aus dem Zr/Hf-Isotopen-Verhältnis erhält man Informationen über die Umgebung, in der die Zirkone entstanden sind. Auch für die Kontrasterzeugung im Mikroskop zur Abbildung der Zonierung ist Hafnium von Bedeutung.

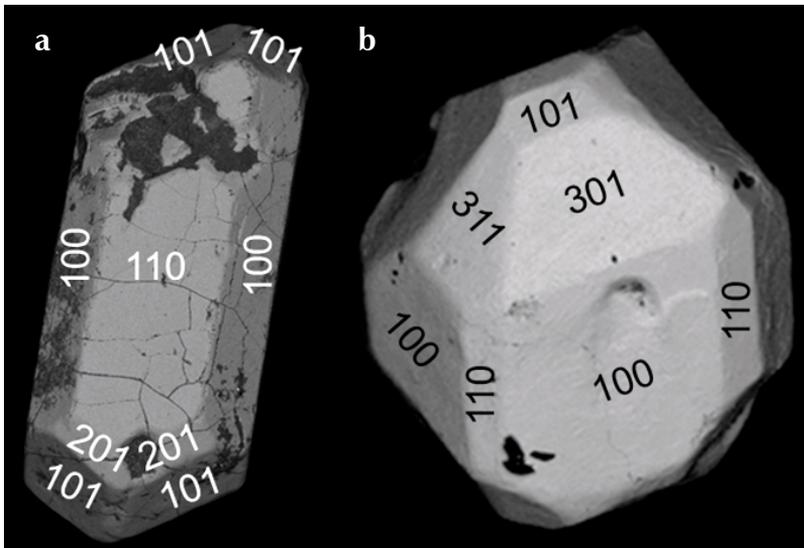
Zur Messung der Isotopen-Verhältnisse verwendet man insbesondere massenspektrometrische Untersuchungen, wobei unterschiedliche Wege der Ionenerzeugung zur Anwendung kommen (SCHALTEGGER et al. 2015): LA-ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), SHRIMP/SIMS (Sensitive High Resolution Ion Microprobe / Secondary Ion Mass Spectrometry) oder ID-TIMS (Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectrometry). Alle Methoden sind aufwändig hinsichtlich Messzeit, Kosten und Laborhygiene, wobei alle Faktoren in der Reihenfolge der Methodenauflistung steigen. Ein Beispiel der entstehenden Kosten für SHRIMP-Untersuchungen, also ortsaufgelöste Messungen, mit denen Metamorphosealter eingegrenzt werden, wurde im Literaturanhang aufgeführt (IBERSIMS).

Üblicherweise untersucht man deshalb die Zirkone vorher mittels Lichtmikroskopie, Kathodolumineszenz und/oder Rasterelektronenmikroskopie. Weil schwere Atome mehr Elektronen zurückstreuen, korreliert in

Rückstreuielektronen-Abbildungen die Helligkeit mit der Ordnungszahl. Somit bestimmt die Konzentration des Begleitelements Hafnium ganz wesentlich den Kontrast. Dessen Ordnungszahl (72) liegt deutlich über der Ordnungszahl von Zirkonium (40) und erst recht über der mittleren Ordnungszahl in  $-\text{SiO}_4$  (9,2). Mit Kathodolumineszenz-Abbildungen erreicht man einen inversen, aber stärkeren Kontrast, bei dem die Zonierung mit besserer Auflösung dargestellt wird. Ausgelöst wird die Kathodolumineszenz durch die kinetische Energie der Elektronen entweder aus dem Elektronenstrahl im Rasterelektronenmikroskop oder durch deren Erzeugung in einer Breitstrahlquelle. Für Zirkon sind gelbe, blaue und violette Lumineszenz-Banden bekannt, die auch als Fluoreszenz-Banden durch Bestrahlung mit UV-Licht hervorgerufen werden können. Panchromatische Abbildungen verdeutlichen die Zonierung durch die Intensitätsvariation der einzelnen Farbbänder. Als Strahlungsquellen im Zirkon-Gitter werden Lumineszenz-Zentren angesehen, die durch Gitter-Defekte (Frenkel-Paare, Schottky-Defekte, Sauerstoffbrücken) und den Einbau seltener Erden (vor allem Dysprosium) entstehen (GÖTZE 2002). Die Ursache für dunkle Zonen im Kathodolumineszenz-Bild (komplementär zu hellen Zonen in der Rückstreu-Abbildung) ist eine sehr hohe Defekt-Konzentration durch viele Fremdelemente, besonders Hafnium, die zur Löschung der Lumineszenz (genannt self-quenching) führt. Dazu passen die Informationen aus der Rückstreuielektronen-Beugung (EBSD), denn in den anhand der Güte der Beugungsmuster (EBSD-Maps, siehe DIETRICH et al. 2011) berechneten Karten erscheinen solche Zonen ebenfalls dunkel, weil die schwächere Ordnung im Kristallgitter zu verwaschenen Beugungsmustern führt.

Abgesehen vom Alter lassen sich so viele weitere Informationen ableiten. Bereits mit lichtmikroskopischen Methoden ist es möglich, Aussagen zur Zirkon-Typologie und Morphologie zu treffen. Zirkone haben eine ditetragonal-dipyramidale Kristallstruktur; sie bilden zwei verschiedene Prismen sowie drei verschiedene Pyramiden, deren Flächen in unterschiedlichen Kombinationen und Größenverhältnissen auftreten. Oft findet man das  $\{110\}$ - und das  $\{100\}$ -Prisma sowie die flache  $\{101\}$ - und die steile  $\{201\}$ -Pyramide (Abb. 1a); die sehr steile  $\{301\}$ -Pyramide (Abb. 1b) tritt selten auf. Die Regel, dass ein Kristall von den am langsamsten wachsenden Flächen begrenzt wird, führt zu verschiedenen Kristallgestalten, weil die Umgebungsbedingungen, also Chemismus und Temperatur der Magmen, die Wachstumsgeschwindigkeit der Kristallflächen der Zirkone bestimmen. Für die Ausbildung der Pyramidenflächen ist die Alkalinität der Schmelze ausschlaggebend, während die Entwicklung der Prismenflächen von der Temperatur abhängt. Daraus resultierende Tracht-Entwicklungspfade wurden von PUPIN (1980) vorgeschlagen. Zur Entschlüsselung der Entstehungsbedingungen von Zirkon-Populationen anhand der Kristallgestalt entwickelte PUPIN (1980) ein entsprechendes Klassifikations-Diagramm (siehe auch Abb. 7, links), in dem die Kristallgestalt (Typologie), die Alkalinität (A-Index) und die Temperatur (T-Index) der Schmelze in Beziehung gesetzt werden. Während man am Lichtmikroskop das

Endstadium der Tracht-Entwicklung erkennt, wird die Entwicklung selbst am inneren Zonar-Bau mittels Kathodolumineszenz-Abbildung sichtbar (CORFU et al. 2003). Sind Zirkonkristalle aus Plutoniten zumeist idiomorph ausgebildet, behalten metamorphe Zirkone ihre ererbten Kerne und erhalten neu gewachsene zusätzliche Ränder oder Kristalle.



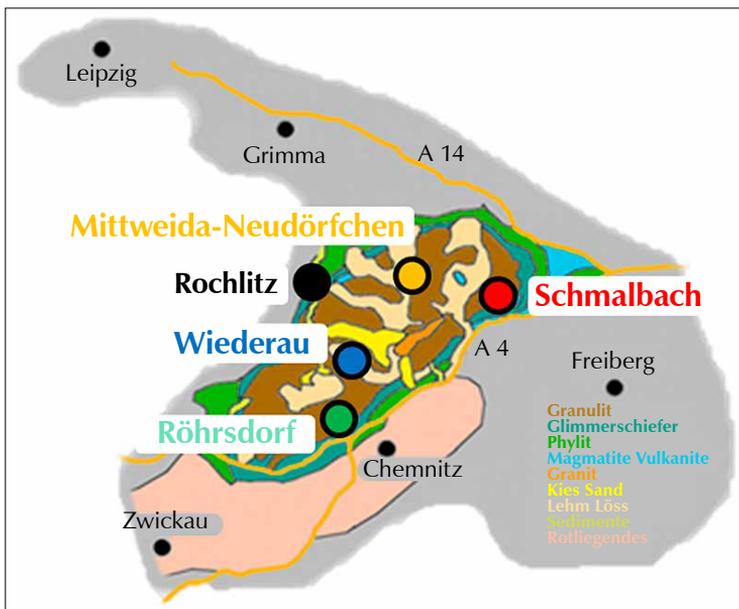
**Abb. 1**

Zwei idiomorphe Zirkone mit Indizierung der Kristallflächen - Tracht und Habitus sind verschieden - R4 (a), W2 (b).

Detritische Zirkone verändern durch den Transport im sedimentären Milieu ihre äußere Form. Modifikationen durch Rundung der Kanten, durch Kollisionsmarken, Brüche und Risse können zu Rückschlüssen hinsichtlich des Transportmediums und des zurückgelegten Weges führen. Eine Beschreibung und Typisierung der Morphologie von detritischen Zirkon-Kristallen wurde von GÄRTNER et al. (2013) entwickelt und stellt eine wichtige Ergänzung zu den derzeit angewandten Methoden der Provenienz-Analyse dar. Dabei wird zunächst der Grad der Rundheit von 1 bis 10 bewertet, wobei 1 für Kristalle mit scharfen Kanten und 10 für völlig gerundete Kristalle ohne erkennbare Kristallflächen steht. Es schließen sich 7 Elongationsklassen von knubblig (=1) bis nadelig (=7) an. Zu den Oberflächenmerkmalen gehören die Art der Bruchbildung (a – ohne, b – parallel zur c-Achse, c – etwa rechtwinklig zur c-Achse), die Anzahl von Kollisionsmarken (von I – ohne bis IV – Kristall mit aufgerauter Oberfläche) und das Vorhandensein von Rissen an der Kristalloberfläche (i – nicht vorhanden, ii – vorhanden). Bei der Einordnung ist die Vielzahl der dargestellten Beispiele innerhalb der Publikation sehr hilfreich.

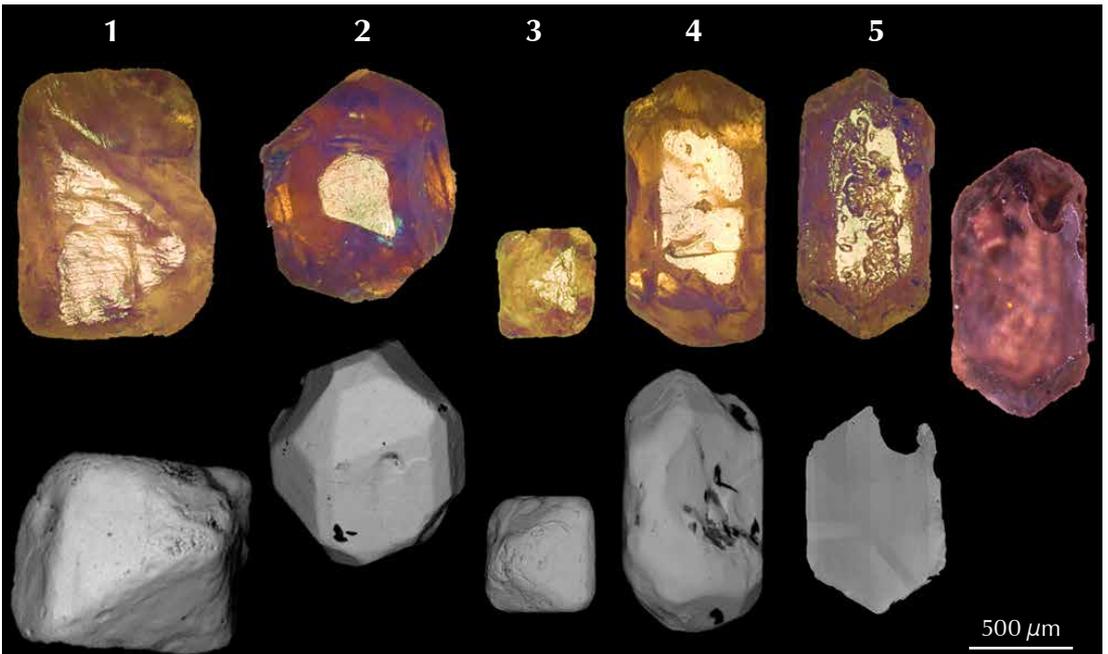
## Untersuchungen

Die Gewinnung von Zirkonen erfordert aufwändige Separationsmethoden (FRASL 1963). Für die hier untersuchten Zirkone wurden große Mengen (jeweils einige Tonnen) Schlich von vier Fundpunkten im Sächsischen Granulitgebirge bearbeitet (MODALECK et al. 2009). Die Orte der Probenahme (Wiederau, Schmalbach, Röhrsdorf und Mittweida-Neudörfchen) zeigt Abb. 2. Eine geringe Anzahl von 24 Zirkonen (acht aus Wiederau, fünf aus Schmalbach, vier aus Röhrsdorf, sieben aus Mittweida-Neudörfchen) wurde für die Studie weitestgehend zufällig ausgewählt. Folglich ohne Anspruch auf statistisch gesicherte Ergebnisse, bestand das Ziel darin, beispielhaft die mit dem Rasterelektronenmikroskop gekoppelten Methoden Rückstreuetelektronen-Beugung und Kathodolumineszenz zur Untersuchung zu nutzen. Außerdem wurden die Zirkone im reflektierten Licht mit einem Digitalmikroskop abgebildet, wie es üblicherweise in der Materialforschung verwendet wird. Ein petrografisches Mikroskop für die Arbeit im Durchlicht und mit Polarisationsfiltern, welches für die Routinearbeit zur Typisierung von Zirkonen besonders geeignet wäre (FRASL 1963), stand nicht zur Verfügung. Statistisch gesicherte Ergebnisse zur Zirkon-Typologie und -Morphologie müssen folglich einer späteren Untersuchung mit deutlich höherer Anzahl von Zirkonen vorbehalten bleiben. Zur Illustration: Während eines lokalen

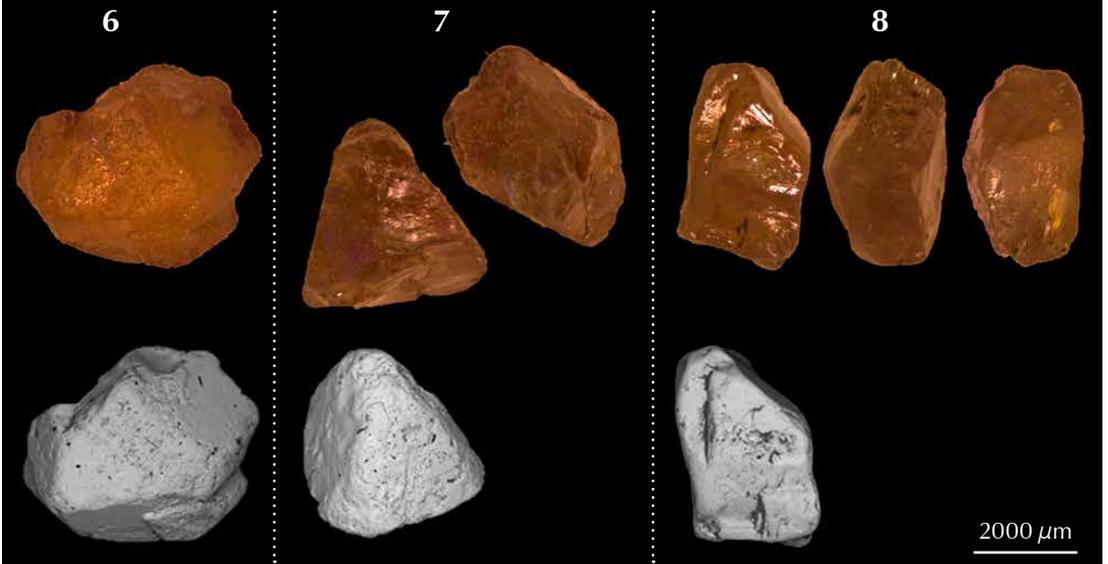


Symposiums, in dem Studenten über Ergebnisse ihrer Feldarbeit berichteten, stellte ein Referent fest, dass die von ihm untersuchten 126 Zirkone aus 3 Gesteinsproben lediglich als Fallstudie anzusehen wären, weil die statistische Relevanz nicht gegeben sei (HOFFMAN 2007). Entsprechende statistische Betrachtungen von VERMEESCH (2004) zeigten, dass etwa 100 Körner pro Probe zu

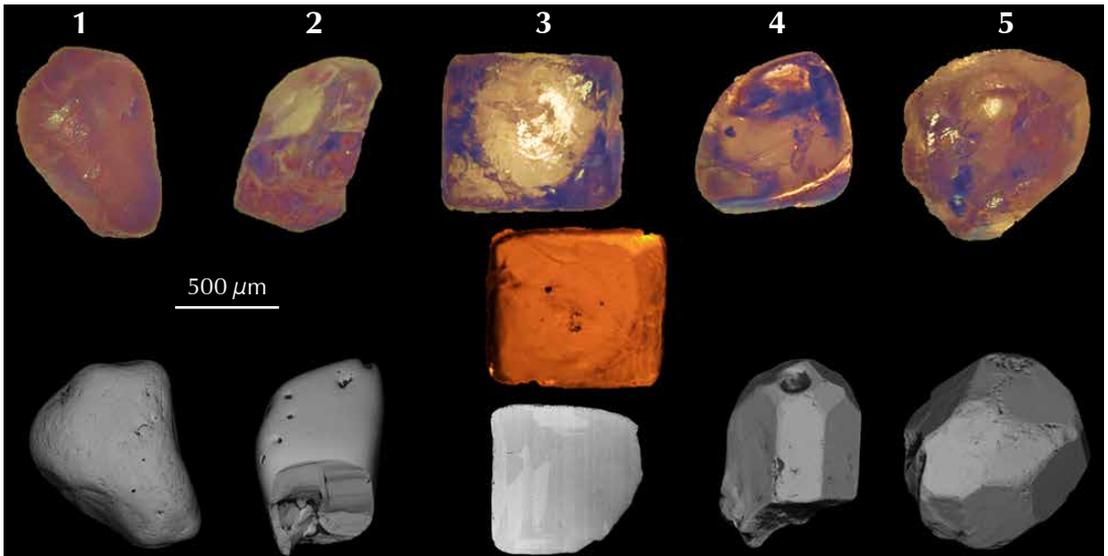
**Abb. 2**  
Orte der Probenahme im Sächsischen Granulitgebirge.



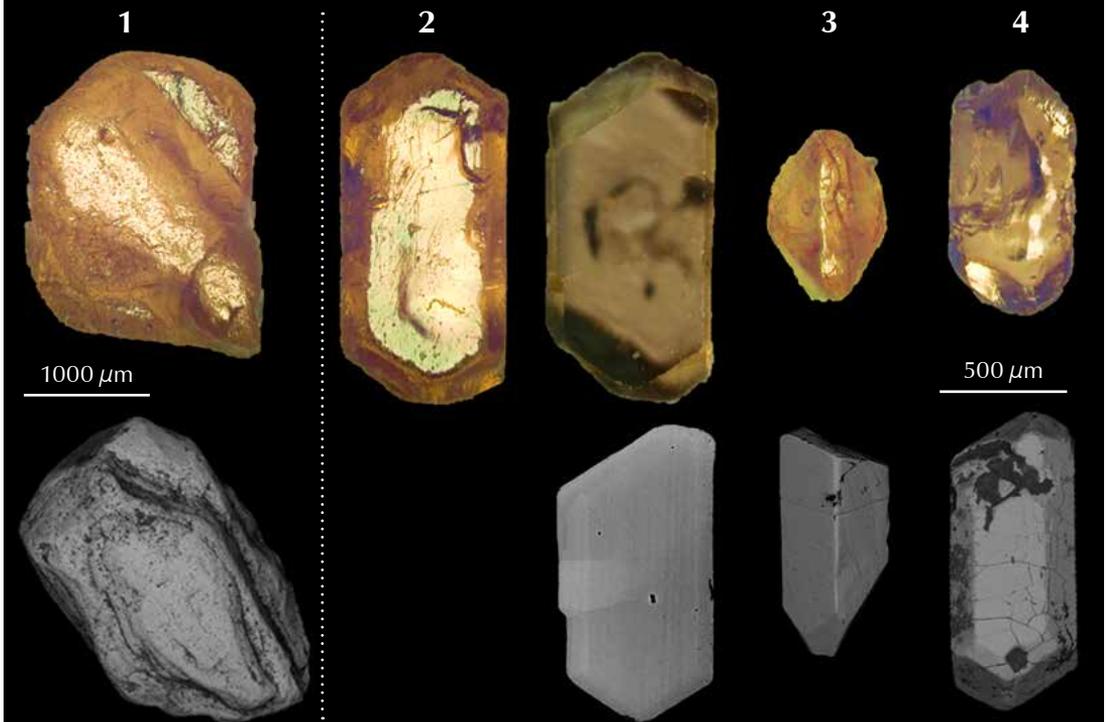
**Abb. 3**  
Kleine Zirkone aus Wiederau (W1 bis W5) im reflektierten Licht (obere Reihe, W5 auch als Querschliff in Einbettung) und im REM (untere Reihe, W5 nur als Querschliff).



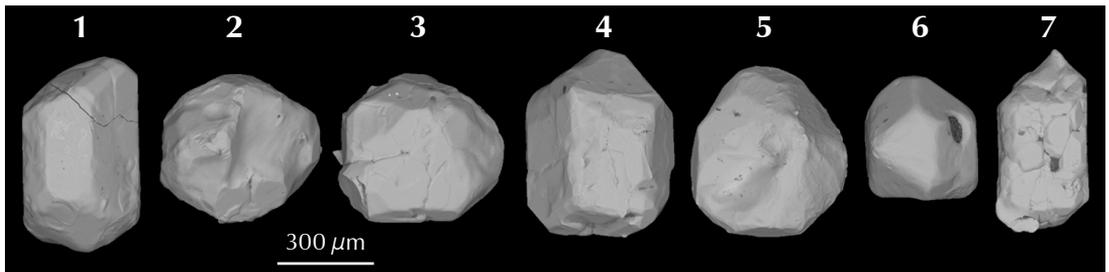
**Abb. 4**  
Große Zirkone aus Wiederau (W6 bis W8) im reflektierten Licht (obere Reihe) und im REM (untere Reihe).



**Abb. 5** Zirkone aus Schmalbach (S1 bis S5) im reflektierten Licht (obere Reihe, S3 auch als Querschliff in Einbettung) und im REM (untere Reihe, S3 nur als Querschliff).



**Abb. 6** Zirkone aus Röhrsdorf (R1 bis R4) im reflektierten Licht (obere Reihe, R2 auch im Querschliff) und im REM (untere Reihe, R2 nur als Querschliff).



**Abb. 7** Zirkone aus Mittweida-Neudörfchen (M1 bis M7) im REM.

untersuchen sind, um eine statistische Sicherheit von 95% zu erhalten.

Die untersuchten Zirkone sind überwiegend glasklar, pastell- bis holzfarben und fluoreszieren unter UV-Licht (Olympus BX51M) mehr oder weniger intensiv hellgelb. Besonders hell erscheinen die Zirkone W1, W2 und W3, S5 und R3 (Nummerierung entsprechend der folgenden Abbildungen). Abb. 3 bis 7 zeigen die Zirkone als Streupräparat im Auflichtmikroskop (Keyence Digitalmikroskop VHX 500) bzw. in der Sekundärelektronen-Abbildungen (Zeiss LEO 1455VP) nach Kohlenstoffbeschichtung. Vier Zirkone wurden für die Querschliffpräparation ausgewählt und ebenfalls in den Abbildungen im Auflicht und nach Präparation und Kohlenstoff-Beschichtung im Rückstreuerelektronen-Kontrast (Zeiss Neon 40 EsB) dargestellt.

Die chemische Analyse der Hauptkomponenten, wie sie mittels energiedispersiver Röntgenspektrometrie im Rasterelektronenmikroskop (Zeiss LEO 1455VP + EDAX Genesis) möglich ist, ergab am Querschliff die Elemente Zirkonium, Silizium, Sauerstoff und Hafnium sowie auf der Oberfläche zusätzlich Spuren von Eisen, Aluminium und gelegentlich auch Kalzium und Magnesium. Einziges mittels EDX nachweisbares Spurenelement ist Hafnium als Homologes von Zirkonium. Es ist sowohl an der Oberfläche als auch am Querschliff qualitativ bzw. halbquantitativ mit einem Stoffmengenanteil unter 0,3 % zu detektieren. Zur quantitativen Auswertung wurden im Spektrum die  $K\alpha$ -Linien von Sauerstoff (0,525 eV) und Silizium (1,74 eV) sowie die  $L\alpha$ -Linien von Zirkonium (2,044 eV) und Hafnium (7,899 eV) herangezogen. Die Anregungsenergie der Elektronen betrug 25 kV. Beachtet wurde, dass die Elemente je nach Ordnungszahl weitere charakteristische Röntgen-Peaks im Spektrum aufweisen, die zu Fehlinterpretationen bei der Zuordnung (richtig Zr  $L\gamma$ , falsch wäre Po  $M\alpha$ ) und zu höheren Unsicherheiten bei der Quantifizierung wegen der Überlagerung von Peaks (Si  $K\alpha$  und Hf  $M\alpha$ ) führen können. Die stöchiometrische Formel  $ZrSiO_4$  ohne Fremdelemente ergäbe folgende Stoffmengenanteile: 66,6 At% Sauerstoff, 16,6 At% Silizium und 16,6 At% Zirkonium. Die gerundeten und auf 100% bezogenen Analysenergebnisse als Stoffmengenanteile sowie die Massenanteile der Oxide (gemessen an den Querschliffen) enthält Tabelle 1. Ermittelt wurden 30 Gew%  $SiO_2$  und (67,7-68,3) Gew%  $ZrO_2$  sowie je nach Anteil zwischen 1,7 und 2,3 Gew%  $HfO_2$ .

**Tabelle 1**

Analyseergebnisse der energiedispersiven Röntgenspektrometrie an Querschliffen als Stoffmengen- bzw. Massenanteile.

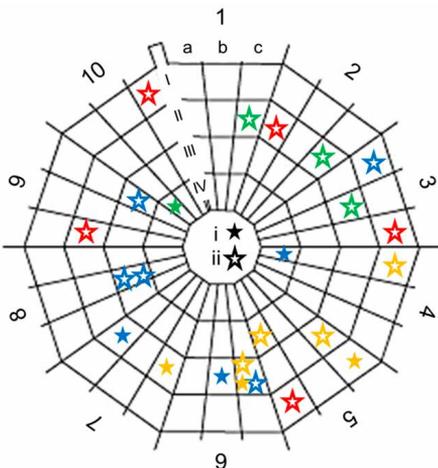
Probe	O/%	Si/%	Zr/%	Hf/%	$SiO_2$ /%	$ZrO_2$ /%	$HfO_2$ /%
W5	68,2	15,0	16,6	0,25	30	68,3	1,7
S3	69,4	14,4	15,9	0,25	29,9	68,2	1,9
R2	67,6	15,3	16,7	0,34	30,0	67,7	2,3

Anhand der licht- und rasterelektronenmikroskopischen Abbildungen erfolgte die Einordnung der Zirkone

hinsichtlich ihrer Morphologie nach GÄRTNER et al. (2013) und hinsichtlich ihrer Typologie nach PUPIN (1980). Die Ergebnisse wurden in Tabelle 2 aufgelistet.

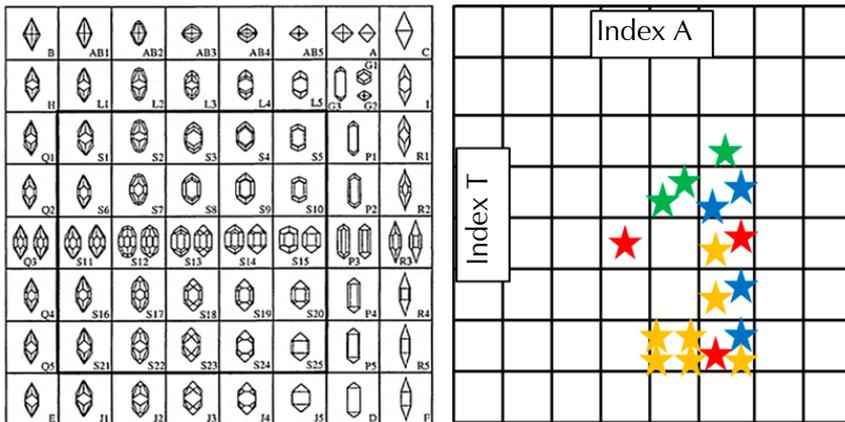
**Tabelle 2**

	Probenort	1	2	3	4	5	6	7	8
Rundheit	Wiederau	7	3	6	6	4	8	9	8
	Schmalbach	9	10	5	3	2			
	Röhrsdorf	10	3	1	2				
	Mittweida	4	7	6	5	6	5	5	
Elongation	Wiederau	2	1	1	4	4	1	2	2
	Schmalbach	2	2	1	1	1			
	Röhrsdorf	2	4	2	3				
	Mittweida	2	1	1	1	1	1	2	
Bruchbildung	Wiederau	c	a	a	b	a	b	c	b
	Schmalbach	a	c	c	c	a			
	Röhrsdorf	a	b	c	c				
	Mittweida	a	a	a	a	a	a	c	
Risse	Wiederau	i	ii	ii	i	i	ii	ii	ii
	Schmalbach	i	i	i	i	i			
	Röhrsdorf	i	ii	ii	ii				
	Mittweida	ii	i	ii	ii	i	i	ii	
Kollisionsmarken	Wiederau	II	I	II	II	IV	III	III	III
	Schmalbach	II	I	I	I	II			
	Röhrsdorf	IV	II	II	II				
	Mittweida	I	II	II	II	II	I	III	
Typologie	Wiederau	P4	S24	S25	P2	P2	-	-	-
	Schmalbach	-	-	P5	P3	S13			
	Röhrdorf	-	S9	P1	S9				
	Mittweida	P3	S24	S24	P4	S24	S24	P5	



**Abb. 8**

Netzdiagramm zur Morphologie der Zirkone W1-8 (blau), S1-5 (rot) und R1-4 (grün) und M1-M7 (gelb) hinsichtlich des Grades der Rundheit (1-10), der Art der Bruchbildung (a-c), des Auftretens von Kollisionsmarken (I-IV) und Rissen an der Oberfläche (i - gefüllter Stern: nicht vorhanden, ii - offener Stern: vorhanden).

**Abb. 9**

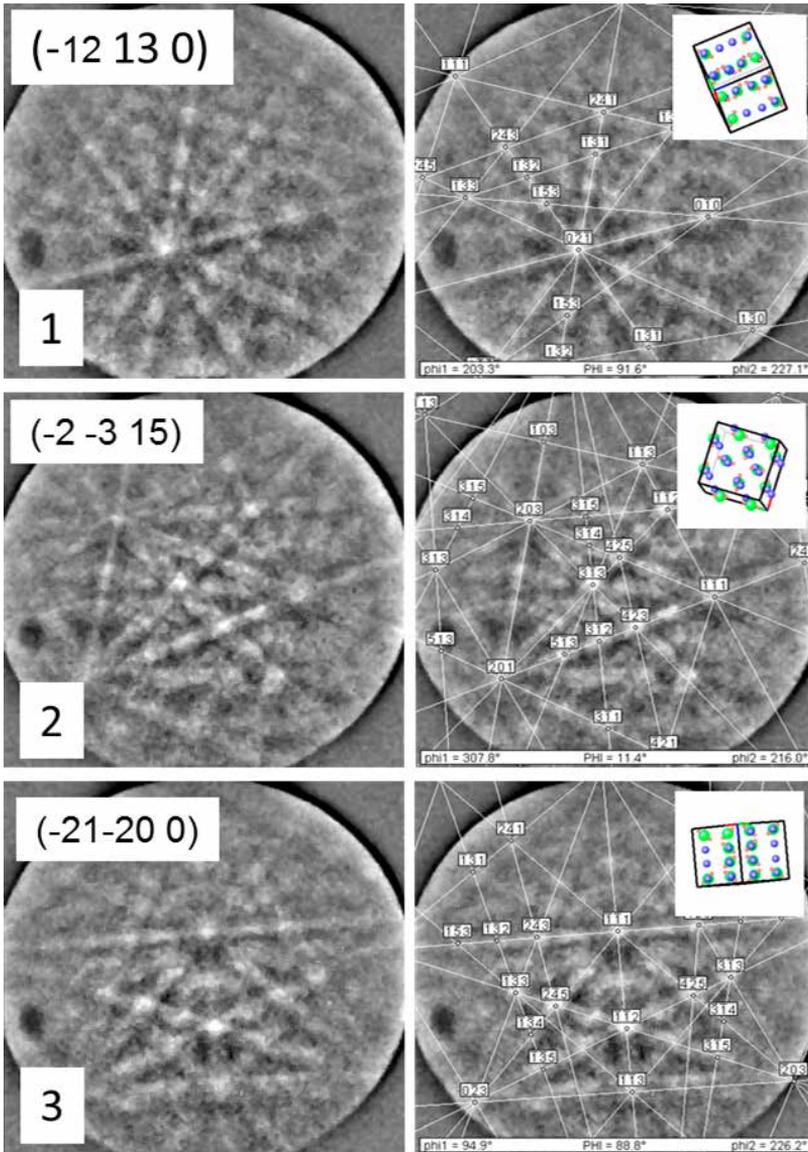
Typisierung der Zirkone nach Pupin (1980) aus Wiederau (blau), Schmalbach (rot), Röhrsdorf (grün) und Mittweida (gelb).

Morphologie nach GÄRTNER et al. (2013) und Typologie nach PUPIN (1980) der Zirkone von Wiederau, Schmalbach, Röhrsdorf und Mittweida-Neudörfchen.

Zur Veranschaulichung der morphologischen Merkmale sowie deren Korrelation hinsichtlich des Grads der Rundheit (1-10), der Art der Bruchbildung (a-c), des Auftretens von Kollisionsmarken (I-IV) sowie oberflächlicher Risse (i bzw. ii) dienen Netzdiagramme wie das in Abb. 8 dargestellte. Ein perfekt idiomorpher Kristall ohne Transportschäden erhielt darin die Position 1a-I, während ein vollständig gerundeter, zerbrochener und oberflächlich rauer Zirkon die Position 10c-IV bekäme. Lediglich die in den Sektoren 1-7 enthaltenen Zirkone verfügen über ausreichend gut erkennbare Kristallflächen, die eine Typisierung nach PUPIN gestatten. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der Typisierung nach PUPIN, soweit es die Gestalt der Zirkone zuließ. Anhand der Typisierungsergebnisse und der Tracht-Entwicklungspfade nach PUPIN ist die Zugehörigkeit der untersuchten Zirkone zu dem aus Magmatiten erschmolzenen I-Typ-Granit zu erkennen.

Zirkone mit prismatischer Ausbildung liegen zumeist auf einer der  $\{100\}$ - oder  $\{110\}$ -Flächen des Biprismas und somit in einer die Erkennung der Tracht begünstigenden Lage. Wenn sie in dieser Lage eingebettet werden, erfolgt der Querschliff parallel zu einer dieser Flächen, wie anhand der Orientierungsbestimmung mittels Rückstreuelektronen-Beugung im Rasterelektronenmikroskop zu sehen ist (Abb. 10-14). Der Detektor für die Aufnahme der Beugungsmuster im Rasterelektronenmikroskop besteht aus einem Phosphorschirm und einer hochauflösenden CCD-Kamera (Zeiss NEON 40EsB + EDAX TSL Digiview). Der Elektronenstrahl rastert die Probe auf dem präparierten Querschnitt punktwise ab – für diese Untersuchungen wurde ein Abstand von  $1 \mu\text{m}$  gewählt. Dabei wird pro Punkt ein Beugungsmuster aufgenommen und dieses mit einer Software (EDAX TSL OIM) indiziert. Typische Rückstreuelektronen-Beugungsmuster für die Zirkone W5, S3 und R2 zeigt Abbildung 10. Man erkennt, dass ohne spezielle Justage infolge der planparallelen Präparation die Schnitte nahezu parallel zu  $(110)$ -,  $(001)$ - bzw.  $(100)$ -Prismen-Flächen orientiert sind. Die jeweils aus allen Beugungsmustern berechneten Karten der Orientierungsverteilung zeigen die Abb. 11d-14d, wobei die Farben entsprechend der Farbkodierung im Standarddreieck gewählt wurden.

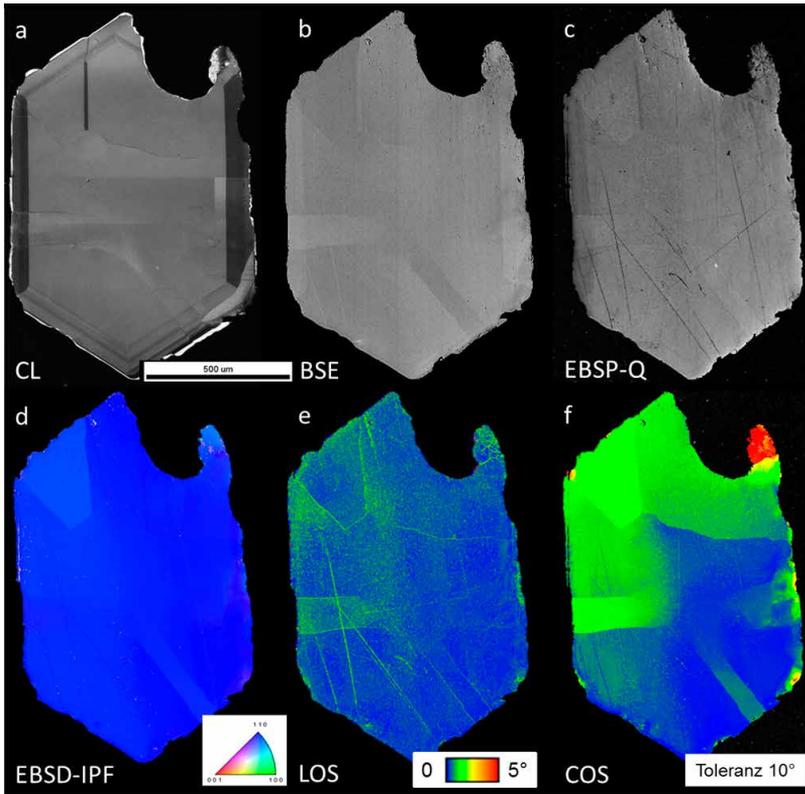
Details sind in den Karten der lokalen Orientierungsänderung von 0 bis  $5^\circ$  (Abb. 11e-14e) und der Korn-Orientierungsänderung (Abb. 11f-14f) zu erkennen. Die lokale Orientierungsänderung markiert Korngrenzen und benachbarte Gitterverzerrungen (Abb. 11e), die Begrenzung eines Einschlusses (Abb. 12e), aber auch durch die Querschliffpräparation unbeabsichtigt verursachte Kratzer (Abb. 11e, 13e). Die Karte der Kornorientierungsänderung, hier dargestellt für einen Toleranzwinkel von  $10^\circ$ , verdeutlicht das Auftreten von Subkörnern in Übereinstimmung mit deren Grenzen – besonders gut erkennbar an Zirkon W5 in Abb. 11f. Zirkon S3 weist keine Subkörner auf. Die Orientierungsänderung in Zirkon R2 deutet auf Spannungsfelder im Korn hin, die noch nicht zur Ausbildung einer Subkorngrenze geführt haben. Bei den dunklen kreisförmigen Gebieten in diesem Zirkon (sichtbar in Abb. 13c) handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um metamikte Domänen. Zirkon W8 (Abb. 14) liegt auf der Prismen-Fläche (100). Er zeigt in der EBSD-Güte-Karte und in der Rückstreuelektronen-Abbildung eine senkrechte Streifung parallel zu den Prismen-Flächen, die sich auch



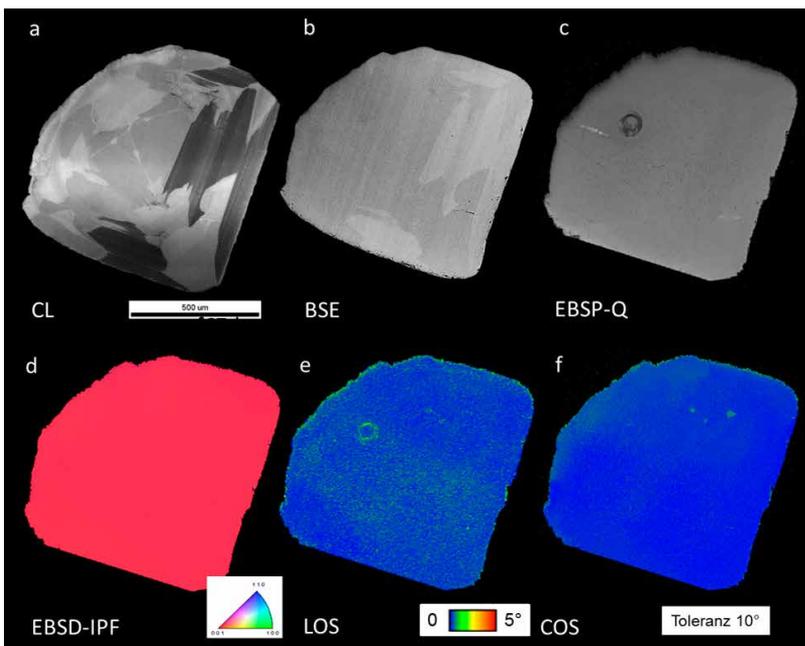
**Abb. 10**  
EBSD-Beugungsmuster der Zirkone W5, S3 und R2 (links) – die Indizierung (rechts) zeigt die ungefähre Ausrichtung des Schnitts parallel zu den (110)-, (001)- bzw. (110)-Prismen-Flächen.

in der UV-Fluoreszenz (Abb. 14a) widerspiegelt. Ebenso erkennbar sind eine Vielzahl von Einschlüssen sowie die Durchstoßlinien von Brüchen.

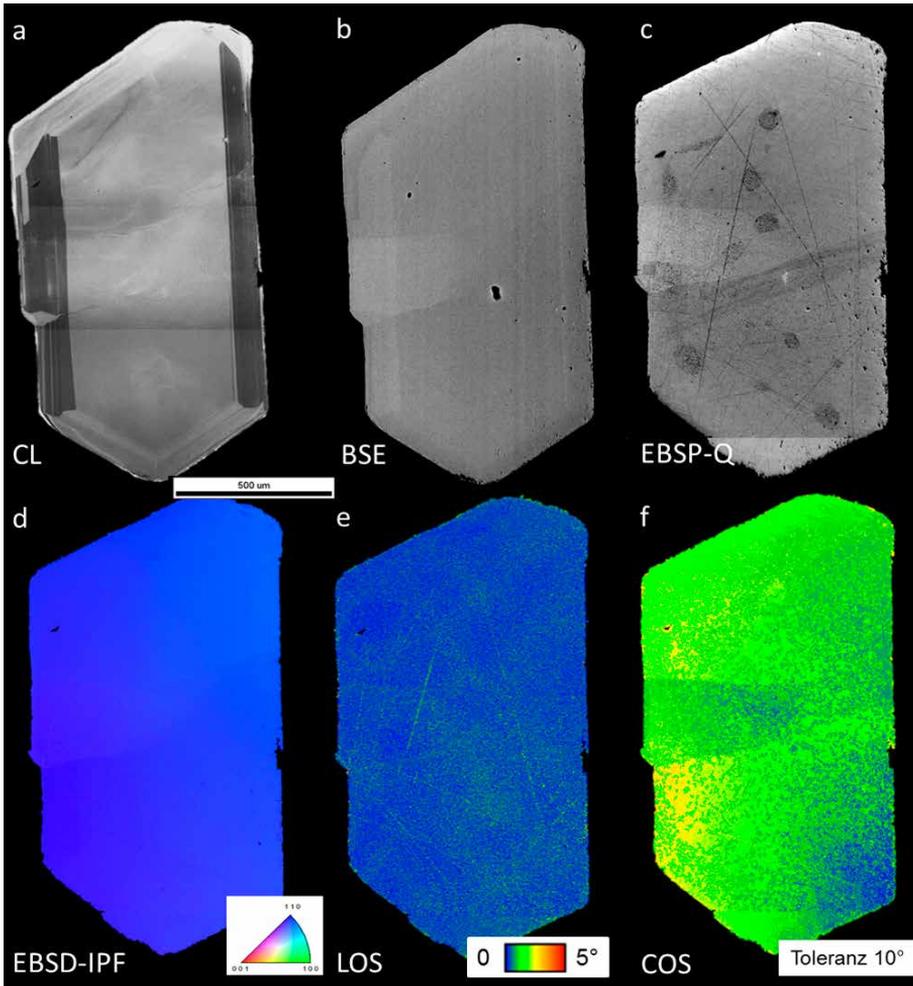
Für die Kathodolumineszenz-Abbildungen diente ein zweites Rasterelektronenmikroskop mit einem optischen Spektrometer zur Aufnahme und Analyse der Lumineszenz (FEI NovaNanoSEM + Gatan MonoCL). Die Anregungsenergie der Elektronen betrug 20 kV. Es wurden violette Banden bei 352 nm und 403 nm (intrinsische Defekte), blaue bzw. gelbe Banden bei 483 nm und 578 nm (vermutlich  $\text{Dy}^{3+}$ ) und eine orange Bande bei 626 nm (vermutlich  $\text{Fe}^{3+}$ ) gemessen. Da die monochromatischen Bilder geringe Helligkeits-Unterschiede, aber keine zusätzlichen Details zeigen, wurden nur die panchromatischen Bilder dargestellt. Die Abbildungen 10a-12a bestehen aufgrund der Größe der Zirkone aus bis zu drei Bildern, was sich in waagerechten Linien mit dort schwer vermeidbaren Helligkeitssprüngen bemerkbar macht. Ungeachtet dieser



**Abb. 11**  
 Zirkon W5 in Kathodolumineszenz (a), Rückstreuungselektronen-Abbildung (b), EBSD-Güte-Karte (c), EBSD-Orientierungskarte (d), Karte der lokalen Orientierungsänderung (e) und der Kristallorientierungsänderung mit Toleranz 10°(f).



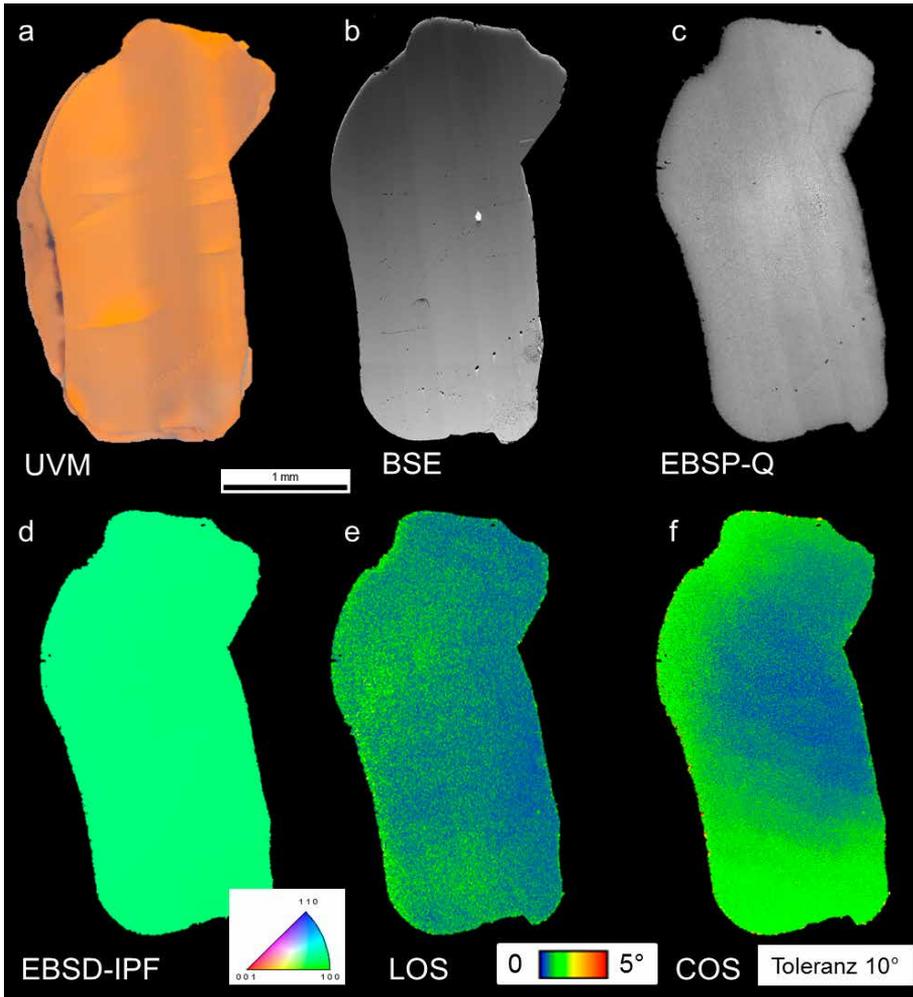
**Abb. 12**  
 Zirkon S3 in Kathodolumineszenz (a), Rückstreuungselektronen-Abbildung (b), EBSD-Güte-Karte (c), EBSD-Orientierungskarte (d), Karte der lokalen Orientierungsänderung (e) und der Kristallorientierungsänderung mit Toleranz 10°(f).

**Abb. 13**

Zirkon R2 in Kathodolumineszenz (a), Rückstreuelektronen-Abbildung (b), EBSD-Güte-Karte (c), EBSD-Orientierungskarte (d), Karte der lokalen Orientierungsänderung (e) und der Kristallorientierungsänderung mit Toleranz  $10^\circ$  (f).

Artefakte zeigen die Übersichtsbilder der Zirkone W5 und R2 eine oszillierende Zonierung an den Rändern um einen relativ großen Kern. Zirkon S3 ist charakterisiert durch eine komplexe Zonierung in verschiedenen Abschnitten, die auch als Tannenbaum-Zonierung bezeichnet wird (engl. fir-tree zoning, VAVRA et al 1996, CORFU et al. 2003). Zirkon R2 enthält in seinem Kern zahlreiche gewellte Risse, von denen zwei mit dem Wachstum eines kleinen Tochterkristalls assoziiert sind.

Die Zonierung und die Orientierungsänderung der Subkörner bezüglich des Mutterkristalls zeigen sich bereits in den Rückstreuelektronen-Abbildungen (Abb. 11b-14b). Darüber hinaus sind nur in den Kathodolumineszenz-Abbildungen Brüche erkennbar, die teilweise zu Versetzungen in der Zonierung geführt haben. Das lässt erkennen, dass diese Risse erst während der Umlagerung im Sediment entstanden sind (Abb. 15, kreisförmige Markierung). Andere Risse erfuhren eine Ablenkung durch die Zonierung (Abb. 15, Einsatz oben), folgen weitgehend einer Kristallachse (z. B. Abb. 15, Einsatz Mitte) und wurden durch eine Füllung wieder geheilt (Abb. 15, Einsatz unten). Nach der mechanischen Beanspruchung während der Umlagerung

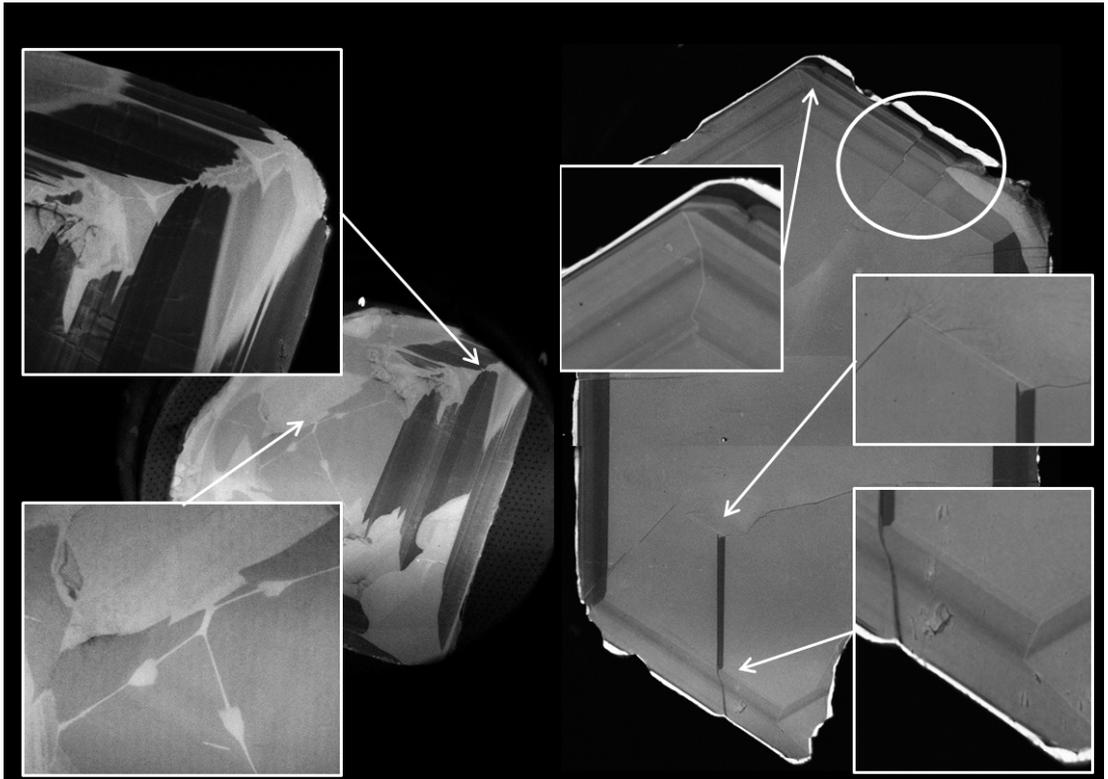


**Abb. 14**

Zirkon W8 in UV-Fluoreszenz (a), Rückstreuelektronen-Abbildung (b), EBSD-Güte-Karte (c), EBSD-Orientierungskarte (d), Karte der lokalen Orientierungsänderung (e) und der Kristallorientierungsänderung mit Toleranz 10°(f).

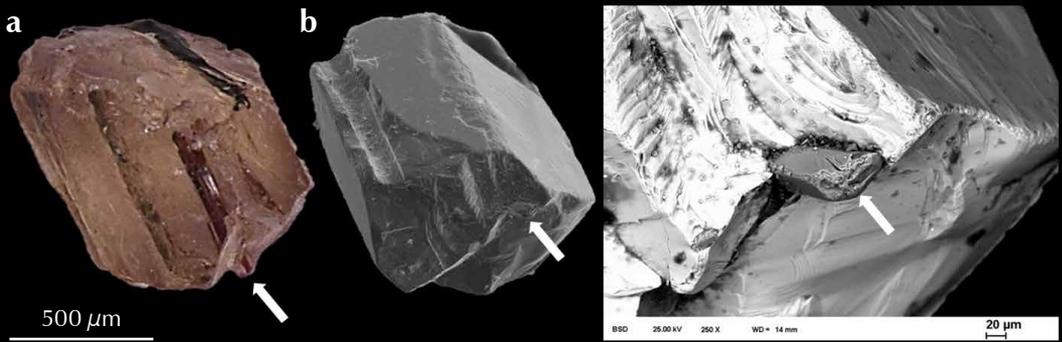
im Sediment, äußerlich erkennbar an der Verrundung des Kristalls, haben metamorphe Überwachungen und Riss-Füllungen komplexe Muster erzeugt (Abb. 16).

Bereits erwähnt wurde, dass Zirkone Einschlüsse gasförmiger, flüssiger oder kristalliner Phasen enthalten können. Zur Beschreibung solcher zusätzlichen morphologischen Erscheinungen kann man die Muster der Einschlussregelung nach der Korngestalt des Wirts heranziehen (FRASL 1963). Für eine solche Betrachtung sind Einschlüsse besonders gut verwertbar, wenn sie idiomorph-säulige, stängelige bis nadelförmige Gestalt haben. Solche nadelförmigen Einschlüsse sind nicht sehr häufig, aber doch regelmäßig in Zirkonen der untersuchten Fundstellen festzustellen. Einen solchen Zirkon aus Wiederau zeigt Abb. 17. Das lichtmikroskopische Bild zeigt einen Titanoxid-Einschluss innerhalb des Zirkons sowie eine rillenförmige Vertiefung auf der Oberfläche parallel zur Hauptachse des Zirkons, die wohl ursprünglich eine ebensolche Nadel enthielt. In der



**Abb. 15**  
Zirkon W5 Details in KL-Abbildung.

**Abb. 16**  
Zirkon S3 Details in KL-Abbildung.



**Abb. 17**  
Zirkon aus Wiederau im reflektierten Licht (a) und im REM (b, c), rechts Detail der Bruchfläche, der Pfeil zeigt auf die Bruchfläche der Titanoxid-Nadel.

Rückstreuelektronen-Abbildung ist die Stirnseite der Nadel an der Bruchfläche des Kristalls gut zu erkennen. Deren Zusammensetzung wurde mittels EDS gemessen und somit Titanoxid nachgewiesen.

## Einordnung der Ergebnisse

Die typologische Einordnung der wenigen hier gezeigten Zirkone deutet auf deren Zugehörigkeit zum I-Typ hin, also aus Magmatiten stammend. Die hohe Konzentration der Zirkone im Schlich von Bächen im Sächsischen Granulitgebirge, sowie deren Typ und Größe, aber auch eine früher vorgenommene singuläre Altersbestimmung, lassen vermuten, dass diese nicht aus dem Granulit selbst, sondern aus einer anderen Quelle stammen, bei der es sich vermutlich um Vulkanite eines nicht mehr vorhandenen weil abgetragenen Grundgebirges handelt, die eiszeitlich und vor allem nacheiszeitlich umgelagert wurden.

Für die Typlokalität des unter hohem Druck und hoher Temperatur gebildeten Umwandlungsgesteins Granulit erfolgten umfassende geochronologische Untersuchungen von KRÖNER et al. (1998), LINNEMANN et al. (2000, 2004), SAGAWA et al. (2013) und HOFFMANN et al. (2013), die die Komplexität und Mehrphasigkeit der Entstehung unter Einbeziehung der frühpaläozoischen Cadomischen Orogenese sowie spätpaläozoischer Eruptionen im Nordwest-Sächsischen Vulkanit-Komplex demonstrieren. Die grobe zeitliche Einordnung umfasst die präkambrische (proterozoische) Bildung der Protolithen mit metavulkanischem und metasedimentärem Ursprung sowie deren früh-karbonische mehrphasige Metamorphose, Hebung und finale Exhumierung. Die Autoren der vorliegenden Arbeit vertreten die Hypothese, dass die aus dem Schlich stammenden Zirkone nicht zu den bisher untersuchten Populationen gehören.

Deshalb sollen die hier dargestellten Ergebnisse den Anreiz für umfassendere Untersuchungen bilden, um die Provenienz der Zirkone aus dem Schlich von Bächen im Sächsischen Granulitgebirge zu klären. Sowohl eine statistisch abgesicherte Typisierung der Zirkone, aber noch viel mehr die quantitative Bestimmung darin enthaltener Spurenelemente sowie die Altersbestimmung auf Basis gemessener Isotopenverhältnisse sind nur im Rahmen eines geförderten Forschungsprogramms zu verwirklichen. Eine entsprechend große Anzahl von Zirkonen kann von einem der Autoren (W.M.) zur Verfügung gestellt werden.

## Dank

Für die Nutzung der Technik danken wir der Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik und der Professur Analytik an Festkörperoberflächen der Technischen Universität Chemnitz. Hilfreiche und inspirierende Hinweise und Diskussionen verdanken wir einem anonymen Gutachter sowie Herrn Prof. Dr. R. Rößler, Herrn Prof. Dr. C. Breitzkreuz, Frau Dr. Birgit Gaitzsch und Herrn A. Repstock von der TU Bergakademie Freiberg.

## Literatur

- CORFU, F.; HANCHAR, J. M.; HOSKIN, P. W. O. & KINNY, P. (2003): Atlas of Zircon Textures. – *Rev. Mineral. Geoch.*, **53** (1): 469–500.
- DIETRICH, D.; LAMPKE, T. & RÖSSLER, R. (2011): Mikrostrukturuntersuchungen mit Rückstreuelektronen an versteinerten Hölzern aus dem Perm von Chemnitz. – *Veröff. Mus. Naturkunde Chemnitz*, **34**: 85–94.
- FRASL, G. (1963): Die mikroskopische Untersuchung der akzessorischen Zirkone als eine Routinearbeit des Kristallingeologen. – *Jb. Geol. Bundesanstalt*, **106**: 405–428.
- GÄRTNER, A.; LINNEMANN, U.; SAGAWA, A.; HOFMANN, M.; ULLRICH, B. & KLEBER, A. (2013): Morphology of zircon crystal grains in sediments – characteristic, classifications, definitions. – *Geologica Saxonica*, **5**: 65–73.
- GÖTZE, J. (2002): Kathodolumineszenz-Mikroskopie und Spektroskopie in den Geo- und Materialwissenschaften. – *Mitt. Österr. Mineral. Ges.*, **147**: 27–41.
- HOFFMAN, M. (2007): Growth history of zircon crystals in coarse-grained granite, Vinalhaven Intrusion, Coastal Maine. 20<sup>th</sup> Annual Keck Research Symposium in Geology, Proceedings of a meeting held April 2007, Wooster, Ohio, pp. 121–126, <http://keck.wooster.edu/publications>.

- HOFFMANN, U.; BREITKREUZ, C.; BREITER, K.; SERGEEV, S.; STANEK, K. & TICHOMIROVA, M. (2013): Carboniferous–Permian volcanic evolution in Central Europe – U/Pb ages of volcanic rocks in Saxony (Germany) and northern Bohemia (Czech Republic). – *Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rundsch.)*, **102**: 73–99.
- IBERSIMS-Konditionen, Granada, Spanien, Angaben entsprechend <http://www.ugr.es/~ibersims/ibersims/Welcome.html>: Bei einer Mindestbuchungszeit von einem Tag entstehen Kosten von 1800 Euro/Tag oder 9000/Woche zuzüglich 225 Euro/Probenpräparation einschließlich LM- und KL-Dokumentation sowie 150 Euro/Tag für die Analyse durch das Personal. An 250-800 Ma alten Zirkonen dauert eine Punktmessung etwa 18 min. Hinzu kommt die Zeit für die Navigation auf der Probe und für die Analyse eines Standards.
- KRÖNER, A.; JAECKEL, P.; REISCHMANN, T. & KRONER, U. (1998): Further evidence for an early Carboniferous (~340 Ma) age of high-grade metamorphism in the Saxonian granulite complex. – *Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rundsch.)*, **86**: 751–766.
- LINNEMANN, U.; GEHMLICH, M.; TICHOMIROVA, M.; BUSCHMANN, B.; NASDALA, L.; JONAS, P.; LÜTZNER, H. & BOMBACH, K. (2000): From Cadomian subduction to Early Palaeozoic rifting: the evolution of Saxo-Thuringia at the margin of Gondwana in the light of single zircon geochronology and basin development (Central European Variscides, Germany). – In: *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. Geological Society, London, Spec. Publ., **179**: 131–153. DOI 10.1144/GSL.SP.2000.179.01.10.
- LINNEMANN, U.; McNAUGHTON, N. J.; ROMER, R. L.; GEHMLICH, M.; DROST, K. & TONK, C. (2004): West African provenance for Saxo-Thuringia (Bohemian Massif): Did Armorica ever leave pre-Pangean Gondwana? – U/Pb-SHRIMP zircon evidence and the Nd-isotopic record. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **93**: 683–705.
- MODALECK, W.; SEIFERT, G.; WEISS, S.; LEHMANN, U.; KREHER, S. & THALHEIM, K. (2009): Die besten Funde Europas: Edle Zirkone aus dem Sächsischen Vogtland. – *Lapis*, **34** (2): 13–26.
- PUPIN, J.P. (1980): Zircon and granite petrology. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**: 207–220.
- SAGAWA, A.; GÄRTNER, A.; HOFMANN, M. & LINNEMANN, U. (2013): U-Pb ages and morphology of zircons from different granites within the Saxonian Granulite Massif. – *Geologica Saxonica*, **59**: 205–224.
- SCHALTEGGER, U.; SCHMITT, A. K. & HORSTWOOD, M. S. A. (2015): U–Th–Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS, and laser ablation ICP-MS: Recipes, interpretations, and opportunities. – *Chem. Geol.*, **402**: 89–110.
- VALLEY, J. W.; CAVOSIE, A. J.; USHIKUBO, T.; REINHARD, D.A.; LAWRENCE, D. F.; LARSON, D. J.; CLIFTON, P. H.; KELLY, T. F.; WILDE, S. A.; MOSER, D. E. & SPICUZZA, M. J. (2014): Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. – *Nature Geoscience* **7**, 219–223, doi:10.1038/ngeo2075.
- VALLEY, J. W.; REINHARD, D. A.; CAVOSIE, A. J.; USHIKUBO, T.; LAWRENCE, D. F.; LARSON, D. J.; KELLY, T. F.; SNOEYENBOS, D. R. & STRICKLAND, A. (2015): Nano- and micro-geochronology in Hadean and Archean zircons by atom-probe tomography and SIMS: New tools for old minerals. – *Am. Min.* **100**: 1355–1377.
- VAVRA, G.; GEBAUER, D.; SCHMID, R. & COMPSTON, W. (1996): Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, **122**: 337–358.
- VERMEESCH, P. (2004): How many grains are needed for a provenance study? – *EPSL* **224**, 441–451.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Veröffentlichungen des Museums für Naturkunde Chemnitz](#)

Jahr/Year: 2017

Band/Volume: [40](#)

Autor(en)/Author(s): Dietrich Dagmar, Modaleck Wolfram, Pönitz Christel, Schulze Steffen, Lampke Thomas

Artikel/Article: [Zirkone aus Bachsedimenten im Sächsischen Granulitgebirge 151-166](#)