

ZUR NUTZUNG DES STEREOSKOPISCHEN VERFAHRENS IN DER MINERALOGIE

Robert Sturm

Brunnleitenweg 41, 5061 Elsbethen, Österreich

*email: sturm_rob@hotmail.com

Summary

The stereoscopic technique allows the spatial visualization of an object in terms of two semi-images, which depict the respective item from two slightly different perspectives. Whilst the optical procedure could establish in numerous scientific disciplines especially in the past decades, it remained largely unused in mineralogy hitherto. By means of two simple methods (rotation method, image stacking method) three-dimensional images of minerals can be produced in both the macroscopic and microscopic area. This material can be used for various scientific questions ranging from crystal morphology over crystal growth to the research of mineral inclusions. In the present contribution the stereoscopic methodology and its application in microscopic mineralogy will be subjected to a comprehensive portrayal.

Zusammenfassung

Das stereoskopische Verfahren erlaubt die räumliche Darstellung eines Objektes auf Basis zweier Halbbilder, welche den betreffenden Gegenstand aus zwei geringfügig unterschiedlichen Perspektiven abbilden. Während sich dieses Verfahren insbesondere in den vergangenen Jahrzehnten in etlichen naturwissenschaftlichen Disziplinen etablieren konnte, blieb es in der Mineralogie bislang noch weitgehend ungenutzt. Anhand zweier einfacher Methoden (Rotationsmethode, Bildstapelmethode) lassen sich im makro- und mikroskopischen Bereich dreidimensionale Abbildungen von Mineralen erzeugen, welche für verschiedene Fragestellungen (Kristallmorphologie, Kristallwachstum, Einschlussforschung) herangezogen werden können. Im vorliegenden Beitrag werden die stereoskopische Methodik und ihre Anwendung in der mikroskopischen Mineralogie einer umfangreichen Darstellung unterzogen.

Einleitung

Das bereits in der Mitte des 19. Jh. entwickelte stereoskopische Verfahren hat die räumliche Darstellung eines Objektes mithilfe zweier zweidimensionaler Halbbilder zum Inhalt. Die stereoskopischen Halbbilder zeigen dabei den

Gegenstand aus zwei geringfügig unterschiedlichen Perspektiven. Die räumliche Wahrnehmung des abgebildeten Objektes wird dadurch erzeugt, dass jedes Auge lediglich eines der beiden Halbbilder zu sehen bekommt. Die Halbbilder können dabei nebeneinander zu einem klassischen Stereogramm angeordnet sein oder nach entsprechender Farbcodierung zu einer Anaglyphe überlagert werden (HELMCKE, 1989; SCHEIDEL, 2009; STURM, 2016, 2017).

Die wissenschaftliche Nutzung des stereoskopischen Verfahrens und insbesondere der Stereofotografie erfolgte in Ansätzen bereits zu Beginn des 20. Jh. In dieser Zeit fand das Raumbild unter anderem für die Vermessung von Wolken (Meteorologie), die detaillierte Geländebeschreibung (Topografie) und dreidimensionale Darstellung archäologischer Fundstätten seine breitere Verwendung (LORENZ, 1987; BAHR, 1991; KUHN, 1999). In den vergangenen Dekaden vermochte sich die Methode auch zunehmend in jenen naturwissenschaftlichen Disziplinen zu etablieren, welche zur Klärung verschiedener Fragestellungen auf die räumliche Abbildung zurückgreifen möchten (z. B. Mikropaläontologie, Entomologie, Zellbiologie). Dabei konnte anhand etlicher wissenschaftlicher Arbeiten demonstriert werden, dass die durch die Stereoskopie erzeugte Tiefenwahrnehmung eines Objektes ihren Beitrag zur effizienten Problemlösung zu leisten vermag, in manchen Fällen jedoch auch neue Fragen aufwirft (GOLDSTEIN et al., 2003; CYPIONKA et al., 2016; STURM 2017). Die Stereofotografie spielt aktuell vor allem in der Mikroskopie für die räumliche Darstellung kleinster Objekte (z. B. Mikrofossilien, Mikroorganismen) eine wichtige Rolle und trägt hier zu einer erweiterten morphologischen und morphometrischen Analyse bei (HELMCKE, 1989; LORENZ, 1989; GOLDSTEIN et al., 2003).

In die Mineralogie fand das stereoskopische Verfahren bislang nur punktuell seinen Eingang, wobei hier insbesondere die räumliche Darstellung und Beschreibung einzelner Kristalle im Vordergrund stand (STURM, 2017, 2018). Zu diesem Zweck fanden auch eigens für die Licht- und Elektronenmikroskopie entwickelte Aufnahmetechniken ihre Verwendung (STURM, 2016). Bisher veröffentlichte Resultate deuten darauf hin, dass die Stereofotografie unter anderem bei der gezielten Erforschung morphologischer Phänomene (chemische Lösungsprozesse, Verwachsungen, Zwillingsbildung, Einschlüsse) einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zu leisten vermag (GOLDSTEIN et al., 2003; STURM, 2018).

Im vorliegenden Beitrag soll ein etwas genauerer Einblick in die stereoskopische Methode und ihre Anwendung in der mineralogischen Forschung präsentiert werden, wobei das Hauptaugenmerk auf die licht- und elektronenmikroskopische Visualisierung gelegt wird. Anhand ausgewählter Bildbeispiele soll nochmals der wissenschaftliche Wert dieses optischen Verfahrens diskutiert werden.

Methodik

Aus der Literatur können mehrere Verfahren zur Erzeugung stereoskopischer Halbbilder in der Mikroskopie entnommen werden, wobei die Rotations- und die Bildstapelmethode bislang die meisten Anwendungen gefunden haben (RAAP & CYPIONKA, 2011; CYPIONKA et al., 2016; STURM 2016, 2017). Die Rotationsmethode eignet sich sowohl für die Licht- als auch für die

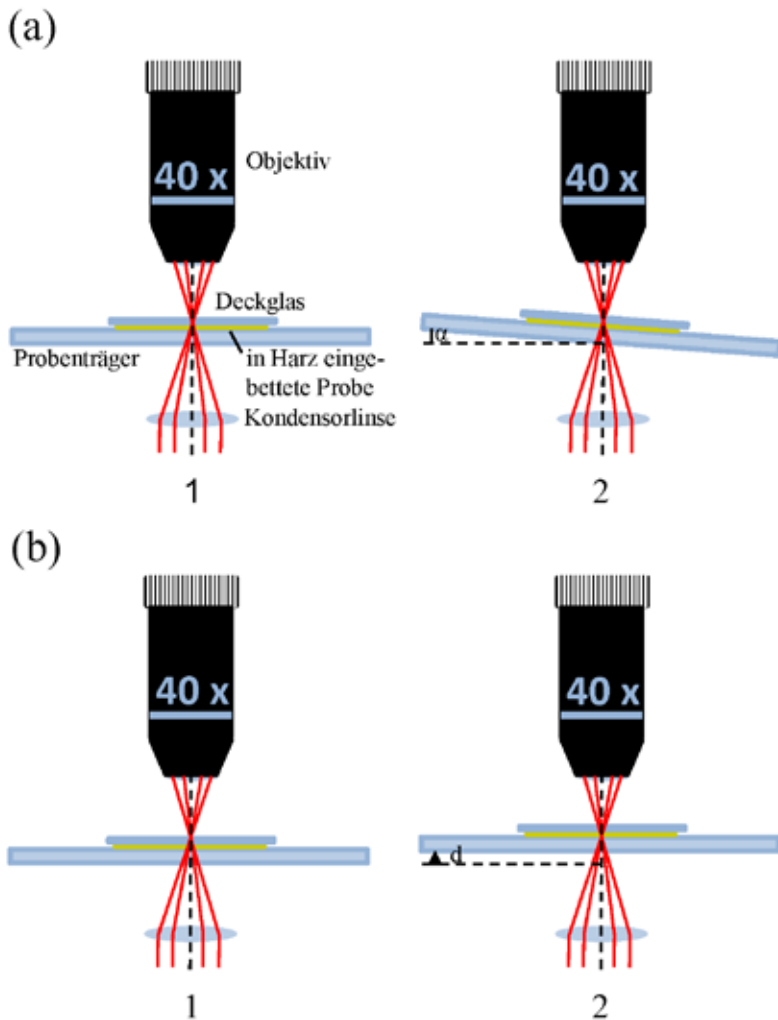


Abbildung 1: Verfahren zur Herstellung stereoskopischer Bilder: (a) Rotationsmethode, (b) Bildstapelmethode.

Rasterelektronenmikroskopie. Grundsätzlich besteht diese Technik aus zwei einfachen Schritten, welche die Fotografie des Objektes in der Ausgangsstellung und die Aufnahme desselben in leicht rotierter Position umfassen (Abb. 1a). Der Drehwinkel sollte sich dabei auf maximal 10° belaufen und stellt den bestimmenden Faktor in Bezug auf die Stärke des stereoskopischen Effektes dar. Beim Rasterelektronenmikroskop wird die Drehung des Objektes durch ein geringfügiges Kippen des Probenhalters herbeigeführt, welches sich durch entsprechende mechanische oder elektronische Bedienelemente erzeugen lässt. In der Auflichtmikroskopie kann die Rotation durch Verwendung einer kippbaren Unterlage simuliert werden, wobei zwischen beiden Aufnahmen des Objektes auf einheitliche Schärfen- und Beleuchtungseinstellungen zu achten ist. In der Durchlichtmikroskopie kann der Kippeffekt beispielsweise durch Verwendung eines Universaldrehtisches oder einer ähnlichen Vorrichtung realisiert werden.

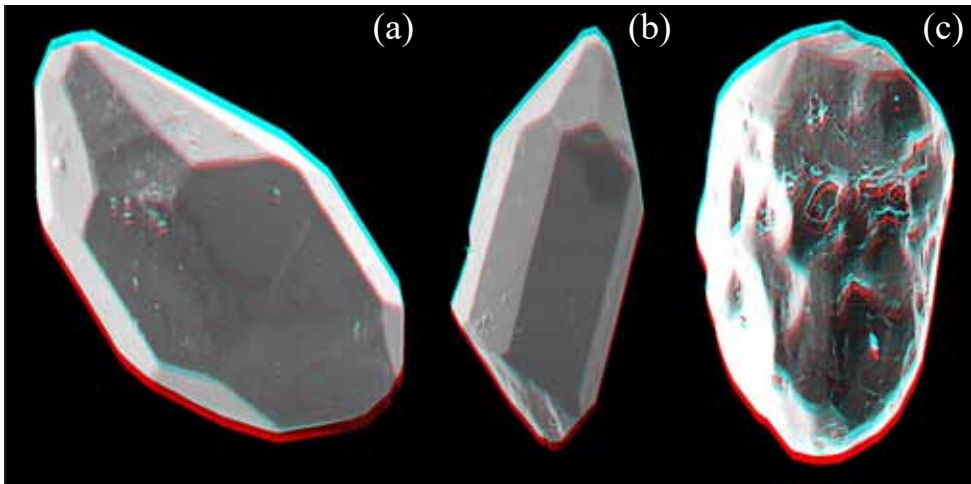


Abbildung 2: Stereoskopisches Verfahren in der Rasterelektronenmikroskopie am Beispiel von akzessorischem Zirkon: (a) weitgehend unversehrter Kristall mit seinen typischen Prismen- und Pyramidenflächen, (b) durch quer verlaufende Bruchfläche gekennzeichneter Kristall, (c) Kristall mit extremen Spuren der chemischen Lösung (Länge der Kristalle jeweils etwa 150 µm).

Die Bildstapelmethode wird ausschließlich bei der Durchlichtmikroskopie von transparenten Objekten (z. B. Mikroskopie von Zirkonstreupräparaten) genutzt und stellt im Vergleich zur Rotationsmethode eine ungleich komplexere Technik dar (Abb. 1b). Dies liegt daran, dass der Gegenstand unter Einstellung verschiedener Fokusebenen fotografiert wird und diese Ebenen jeweils einen konstanten Abstand zueinander aufweisen sollten. Konkret stellt man zunächst die Oberfläche des Objektes scharf und erzeugt davon ein fotografisches Bild. Im nächsten Schritt verschiebt man den Fokus um eine festgelegte Strecke (z. B. 2 µm) nach unten und produziert das nächste Bild. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis man einen aus 10 Einzelbildern bestehenden Stapel erhalten hat. Der Bildstapel wird in weiterer Folge unter Zuhilfenahme spezieller Computersoftware (z. B. PICOLAY; RAAP & CYPIONKA, 2011; CYPIONKA et al., 2016) bearbeitet und in ein klassisches Stereogramm oder eine Farbanaglyphe transformiert. Dabei gelangt das Prinzip der sogenannten Objektiefenkartierung (Object Depth Mapping) zur Anwendung, bei dem die aus dem Bildstapel gewonnene Tiefeninformation für die Erstellung eines dreidimensionalen und drehbaren Modells des Gegenstandes herangezogen wird.

Resultate

Die stereoskopische Methode in der Rasterelektronenmikroskopie

Beispiele für stereoskopische Rot-Cyan-Anaglyphen, welche unter Zuhilfenahme der Rotationsmethode erstellt wurden, sind in Abb. 2 zusammengefasst. Wie der exemplarische Fall des akzessorischen Zirkons recht deutlich zeigt, leistet das Raumbild einen nicht unerheblichen Beitrag in Bezug auf eine verstärkte Darstellung oberflächlicher Phänomene. Diese umfassen einerseits Bruchflächen, deren genaue Struktur im dreidimensionalen Bild näher ergründet werden kann, und andererseits

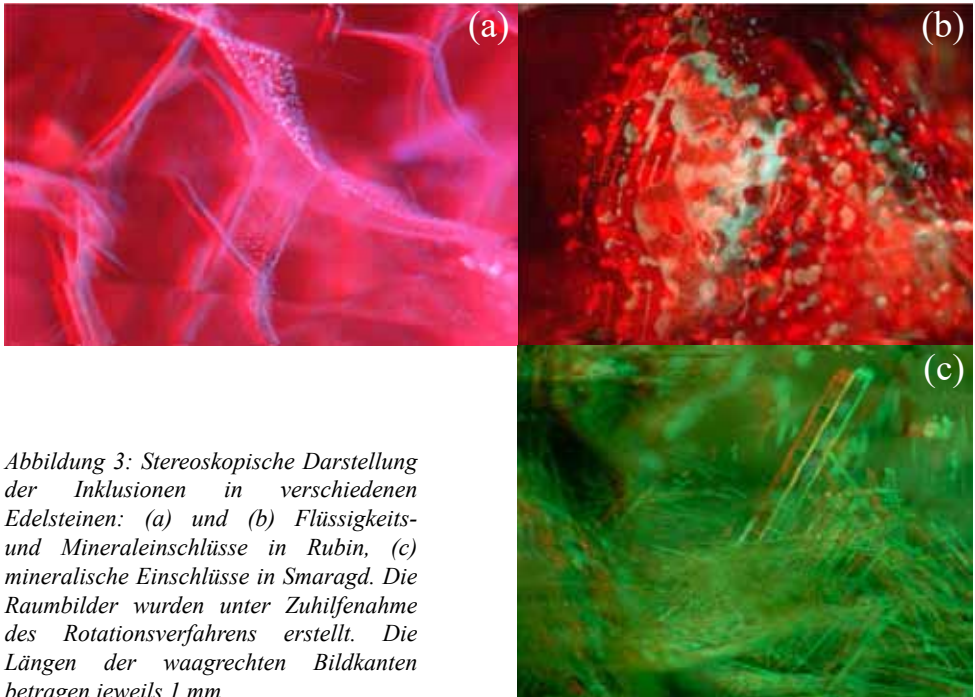


Abbildung 3: Stereoskopische Darstellung der Inklusionen in verschiedenen Edelsteinen: (a) und (b) Flüssigkeits- und Mineraleinschlüsse in Rubin, (c) mineralische Einschlüsse in Smaragd. Die Raumbilder wurden unter Zuhilfenahme des Rotationsverfahrens erstellt. Die Längen der waagrecht Bildkanten betragen jeweils 1 mm.

Spuren einer intensiven chemischen Einwirkung auf den Kristall, welche zur Bildung abgerundeter Ecken und Kanten sowie zur Entstehung tiefer Korrosionsgruben und -buchten führt. Gerade die zuletzt genannten morphologischen Veränderung einzelner Zirkonkristalle lassen sich durch die Anwendung stereoskopischer Methoden einer detaillierteren Analyse (Strukturbeschreibung, Vermessung) zuführen.

Die stereoskopische Technik in der Lichtmikroskopie

Für umfassende lichtmikroskopische Untersuchungen eignen sich unter anderem die Einschlüsse in Edelsteinen (Rubin, Smaragd). Diese verfügen zumeist über eine erhöhte strukturelle Komplexität, welcher man sich mit der stereoskopischen Methode sehr gut anzunähern vermag. Die in Abb. 3 zusammengefassten anaglyphischen Bilder wurden mithilfe der Rotationsmethode erzeugt, wobei zwischen den beiden stereoskopischen Halbbildern ein Drehwinkel von 5° besteht. Anhand des Raumbildes lässt sich die Tiefenausdehnung von Flüssigkeitseinschlüssen in Rutil ebenso gut nachverfolgen wie die dreidimensionale Anordnung von Mineralinklusionen (z. B. Rutilnadeln) in Smaragd.

Akzessorischer Zirkon bietet sich aufgrund seiner optischen Transparenz und seiner zum Teil reichen Strukturierung für die Anwendung des Bildstapelverfahrens an (Abb. 4). Die anaglyphischen Bilder der einzelnen Kristalle wurden jeweils auf Basis von zehn Einzelbilder mit einem Abstand der Fokusebenen von je $2\ \mu\text{m}$ erstellt. Dies hat zur Folge, dass sich das Objekt hinter dem Scheinfenster zu einem plastischen Gebilde entwickelt, bei welchem man insbesondere die Strukturierung einzelner Risse und Brüche einer näheren Analyse zuführen kann.

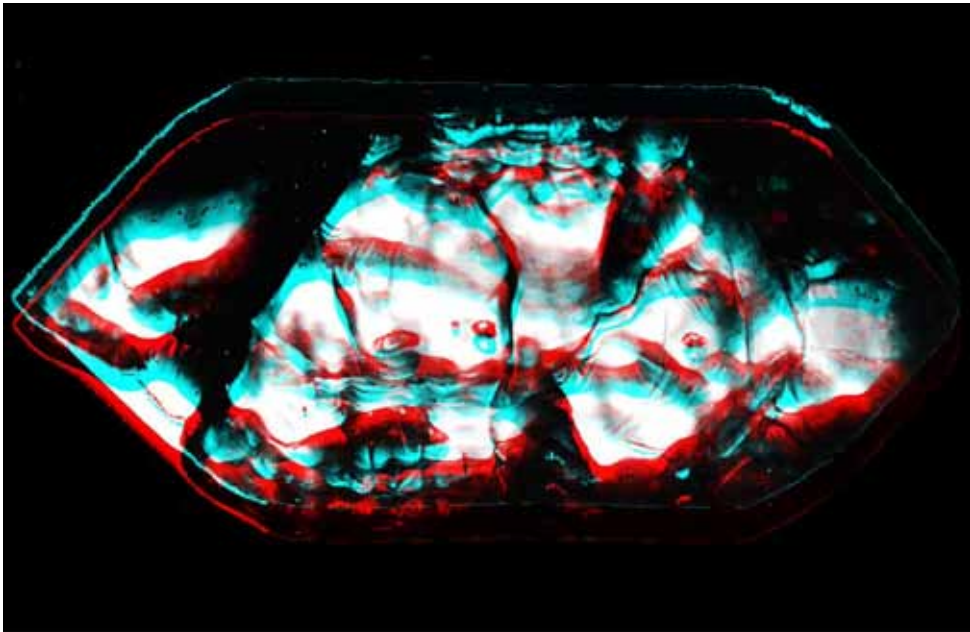


Abbildung 4: Stereoskopische Visualisierung eines Zirkonkristalls (Länge: 200 μm) mithilfe der Bildstapelmethode.

Diskussion

Das stereoskopische Verfahren zur räumlichen Darstellung von Objekten konnte sich vor etwa 120 Jahren in der Wissenschaft etablieren und wurde zu Beginn vor allem für die Vermessung komplexer dreidimensionaler Strukturen (Wolken, Sternbilder, Landschaftsformen) herangezogen. Die Konstruktion eigener Messstereoskope erlaubte eine Quantifizierung der in den Raumbildern gespeicherten Deviationswerte und damit eine genaue Berechnung der Tiefenausdehnung einzelner fotografisch festgehaltener Gebilde (SCHEIDEL, 2009; STURM, 2017). In der moderneren Forschung fand die Stereoskopie sowohl bei der genauen Beschreibung großer Baustrukturen (BAHR, 1991; KUHN, 1999) als auch bei der räumlichen Darstellung von Kleinstlebewesen und Mikrofossilien (GOLDSTEIN et al., 2003; STURM, 2017) ihre breite Anwendung. In der Mikrobiologie diente die Methode dabei nicht selten der exakteren Ergründung oberflächlicher und intrazellulärer Strukturen. In der Mikropaläontologie hingegen wurde das Raumbild noch zusätzlich für die gezielte Visualisierung artspezifischer Merkmale, welche im Normalbild oft nur schwer identifiziert werden können, herangezogen (HELMCKE, 1989; RAAP & CYPIONKA, 2011; STURM, 2015).

In der Mineralogie blieb das Raumbild bislang hauptsächlich auf Detailbeschreibungen von Kristalloberflächen beschränkt. Dabei konnte jedoch festgestellt werden, dass sich selbst kleinste superfizielle Strukturelemente (z. B. Raureifanlagerungen an Schneekristallen) sehr effizient mit dem stereoskopischen Verfahren herausarbeiten lassen (STURM 2018). Die Nutzung der optischen Methode in der Lichtmikroskopie ermöglicht zudem einen dreidimensionalen Blick in das Kristallinnere.

Anhand der vorliegenden Arbeit konnte demonstriert werden, dass das Raumbild seinen berechtigten Platz bei der gezielten Erforschung von Edelsteininklusionen und Einschlussphasen beziehungsweise Internstrukturen in magmatischen Kristallen besitzt. Ein wesentlicher Vorteil der stereoskopischen Methode besteht sicherlich darin, dass die dreidimensionale Objektvisualisierung in Bezug auf Zeit und Kosten wenig Aufwand verlangt und sehr rasch zu brauchbaren Resultaten führt. Darüber hinaus erlaubt die Technik neben einer allgemeinen Beschreibung dreidimensionaler Strukturen auch deren genaue räumliche Vermessung, wobei hier die Bildaufnahme nach einem standardisierten Verfahren zu erfolgen hat (LORENZ, 1987, 1989).

Als wesentlicher Nachteil der Stereoskopie mag der Umstand gelten, dass die dreidimensionale Verarbeitung von anaglyphischen Bildern oder klassischen Stereogrammen einem gewissen Anteil der Bevölkerung vorenthalten bleibt, da dieser nicht über entsprechende stereoptische Aufnahmefähigkeiten verfügt (SCHEIDEL, 2009; STURM, 2017). Zudem tritt die auf der Lasertechnik basierende Holografie in immer stärkere Konkurrenz zum stereoskopischen Raumbild, wobei jedoch das holografische Verfahren einen wesentlich höheren Zeit- und Kostenaufwand erforderlich macht (LÜRS, 1989).

Inwieweit die stereoskopische Bildgebung in Zukunft noch Eingang in die mineralogische Forschung finden wird, bleibt ungewiss. Ein noch wenig ergründetes Potenzial steckt in dieser Methode, wenn es um die Lieferung räumlicher Daten für Computermodelle geht. Gerade in Hinblick auf diesen Aspekt könnte die Stereoskopie nach den 1990er Jahren eine neuerliche Renaissance erleben.

Literatur

- BAHR, A. (1991): Stereoskopie. Räume, Bilder, Raumbilder. 167 p., Thales Verlag, Essen.
- CYPIONKA, H., VÖLCKER, E., ROHDE, M. (2016): Stacking-Programm PICOLAY - Erzeugung virtueller 3D-Bilder mit jedem Lichtmikroskop oder REM. – BIOSpektrum 22/2, 143-145.
- GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, D. E., JOY, D. C., LYMAN, C. E., ECHLIN, P., LITSHIN, E., SAWYER, L., MICHAEL, J. R. (2003): Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 567 p., Springer, New York.
- HELMCKE, J. G. (1989): Mikroorganismen stereoskopisch betrachtet. 71-78 in KEMNER, G. (Ed.) „Stereoskopie. Technik, Wissenschaft, Kunst und Hobby“, Museum für Verkehr und Technik, Berlin.
- KUHN, G. (1999): Stereofotografie und Raumbildprojektion. 134 p., VfV-Verlag, Gilching.
- LORENZ, D. (1987): Das Stereobild in Wissenschaft und Technik. Ein dreidimensionales Bilderbuch. 220 p., Rita Wittig Fachbuchverlag, Hückelhoven.
- LORENZ, D. (1989): Die Stereobild- und Stereomesstechnik in der Meteorologie. 61-79 in KEMNER, G. (Ed.) „Stereoskopie. Technik, Wissenschaft, Kunst und Hobby“, Museum für Verkehr und Technik, Berlin.

- LÜRS, O. (1989): Holographie. 94-103 in KEMNER, G. (Ed.) „Stereoskopie. Technik, Wissenschaft, Kunst und Hobby“, Museum für Verkehr und Technik, Berlin.
- RAAP, E., CYPIONKA, H. (2011): Vom Bildstapel in die dritte Dimension: 3D-Mikroaufnahmen mit PICOLAY. – Mikrokosmos, 100/3, 140-144.
- SCHEIDEL, A. J. (2009): Stereoskopie in Bild und Video - Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen des räumlichen Sehens. 156 p., Universität Mainz, Mainz.
- STURM, R. (2015): Die Stereofotografie biologischer Objekte. – BIUZ, 45/3, 52-55.
- STURM, R. (2016): Die Stereofotografie und ihre Nutzung zur Klärung wissenschaftlicher Fragestellungen. – Mikroskopie, 3/3, 86-100.
- STURM, R. (2017): Stereoskopie in Mathematik und Naturwissenschaften. 130 p., Cuvillier, Göttingen.
- STURM, R. (2018): Stereofotografie in der Elektronenmikroskopie - Teil 3: Kristallografie. – Mikroskopie, 5/4, 188-199.