

MIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR KRISTALLOGRAFIE VON SCHNEEFLOCKEN

Robert Sturm

Brunnleitenweg 41, 5061 Elsbethen, Österreich

*email: sturm_bert@hotmail.com

Summary

Subject to the temperature and moisture conditions prevailing in the atmospheric layers snow crystals may develop a multitude of shapes, whereby most geometric variants are traceable to the hexagonal prism. For the light-microscopic investigation of these easily destructible objects usage of a transparent cooling device, by means of which crystals can be conserved at -40°C to -170°C for a short time, is necessary. Under the microscope besides the wide spectrum of shapes also a detailed insight into the partly chaotic growth process of single snow crystals is provided to the beholder. Thereby, spatial photography yields additional knowledge with regard to the emergence and three-dimensional extension of the objects.

Zusammenfassung

Schneekristalle können je nach den in den atmosphärischen Schichten vorherrschenden Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen eine Vielzahl an Formen ausbilden, wobei sich die meisten geometrischen Varianten auf das hexagonale Prisma zurückführen lassen. Für die lichtmikroskopische Untersuchung dieser sehr leicht zerstörbaren Objekte ist die Verwendung einer transparenten Kühlvorrichtung erforderlich, mit deren Hilfe die Kristalle kurzfristig bei -40°C bis -170°C konserviert werden können. Unter dem Mikroskop eröffnet sich dem Betrachter neben dem breiten Formenspektrum auch ein detaillierter Einblick in den teils chaotischen Wachstumsverlauf einzelner Schneekristalle. Die Raumfotografie liefert dabei in Bezug auf die Entstehung und dreidimensionale Ausdehnung der Objekte noch zusätzliche Erkenntnisse.

Einleitung

Bei Schneeflocken (Schneekristallen) handelt es sich ganz allgemein um atmosphärische Gebilde, welche aus einem oder mehreren Eiskristallen bestehen können. Am Anfang stellen sie noch winzige Objekte dar, die in geeigneten Wolkenformationen durch Gefrierung stark unterkühlter Flüssigkeitströpfchen zur Entstehung gelangen. Die fortwährende Koagulation solcher kristallinen



Abbildung 1: Schema zur Präsentation jener Grundtypen von Schneekristallen beziehungsweise Schneeflocken, welche in der Natur angetroffen werden können. Die meisten Typen zeichnen sich durch eine hexagonale Geometrie aus.

Komponenten hat die Bildung teils hochkomplexer Strukturen zur Folge, wobei eine Anregung des Wachstums von Schneeflocken vor allem bei Durchtritt durch unterschiedliche Temperatur- und Feuchtigkeitszonen der Atmosphäre geschieht. Dieser Prozess der Größenzunahme beruht freilich auf zahlreichen

Zufallsereignissen, wodurch jede einzelne Schneeflocke letztendlich eine individuelle, in feinen Details von anderen Flocken abweichende Gestalt zu entwickeln vermag. Als Resultat dessen mag unter anderem der Umstand gelten, dass sich die Geometrie derartiger Gebilde am besten mithilfe der Chaostheorie approximieren lässt (KNIGHT & KNIGHT, 1973; HOBBS, 1974; PETRENKO & WHITWORTH, 2002; STURM, 2018a, 2018b).

Schneeflocken besitzen für gewöhnlich eine weiße Farbgebung. Bestehen sie jedoch aus reinsten Eiskristallen, führen diffuse Lichtreflexionen an den winzigen Kristallflächen zur Auftrennung des weißen Lichts in seine spektralen Farbanteile und dadurch zu einer punktuell unterschiedlichen, bunten Verfärbung der Objekte (MASON, 1971; KLESIUS, 2007). Erreichen sie nach Durchschreitung der unteren atmosphärischen Schichten schließlich den Boden, zeichnen sie sich durch eine enorme Formenvielfalt aus, wobei die wesentlichen Grundmorphologien in Abb. 1 zusammengefasst sind. Der Aufstellung zufolge gilt das hexagonale Prisma als bedeutendste Grundform, welche als Ausgangspunkt für Gebilde mit höherer geometrischer Komplexität dient. So können sich in weiterer Folge unter anderem sternartige, plattenförmige, dendritische oder nadelförmige Strukturen entwickeln und zudem verschiedene Mischformen zwischen den genannten Typen hervortreten (HOBBS, 1974; LIBBRECHT, 2007).

Besondere Erwähnung im Zusammenhang mit Schneekristallen und Schneeflocken gebührt dem Raureif, der sich unter entsprechenden atmosphärischen Bedingungen an einzelne Eiskristalle anzulegen und deren Oberfläche signifikant zu verändern vermag. Raureif entsteht dann, wenn Schneekristalle im Zuge des Transports durch einzelne Luftschichten eine mit stark unterkühlten Flüssigkeitströpfchen gesättigte Wolke passieren. Diese Tröpfchen besitzen in der Regel eine Größe von lediglich 10 µm und können noch bei Temperaturen von -40°C im ungefrorenen Zustand verharren. Treten sie jedoch mit den Schneekristallen in Kontakt, erfahren sie an deren Oberflächen eine schlagartige Gefrierung. Hier tritt ein durch Raureifbildung in Gang gesetzter Prozess des Kristallwachstums auf, der in der Eisforschung als Akkreszenz (engl. accretion) bezeichnet wird. Erfolgt eine kontinuierliche, über einen längeren Zeitraum anhaltende Bedeckung von Schneekristallen durch Raureif, geht die ursprüngliche Form dieser Strukturen verloren, was in letzter Konsequenz die Bildung von sogenanntem Graupel zum Ergebnis hat (MAGONO & LEE, 1966).

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der lichtmikroskopischen Analyse ausgewählter Grundformen von Schneekristallen, welche in Abb. 1 aufgelistet sind. Dabei soll insbesondere ein Grundverständnis der Kristallmorphologie vermittelt werden. Da Schneeflocken dreidimensionale Objekte mit unterschiedlich stark ausgeprägter Tiefenausdehnung repräsentieren, gelangt für exemplarische Fälle die Stereofotografie als unterstützende Methode zur Anwendung (SCHEIDEL, 2009; RAAP & CYPIONKA, 2011; STURM, 2015, 2016, 2017).

Methodik

Die mikroskopische Untersuchung von Schneekristallen stößt auf das Problem, dass sich diese Gebilde durch ihre hohe Fragilität auszeichnen. Darüber hinaus kann die Einwirkung von Licht erhebliche strukturelle Modifikationen herbeiführen und

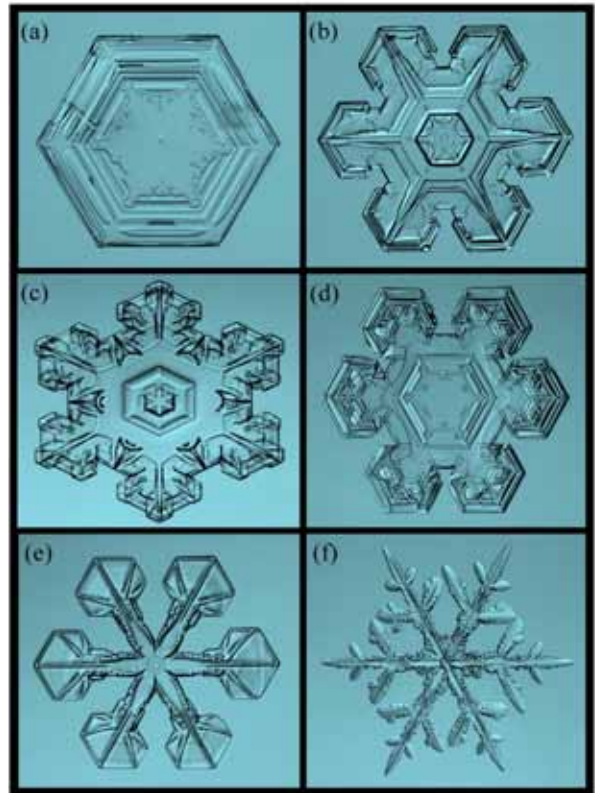
im Extremfall ein Schmelzen der im Verband befindlichen Eiskristalle zur Folge haben. Die Lichtmikroskopie solcher Strukturen setzt deshalb eine Überführung der Untersuchungsobjekte in geschlossene, auf -40°C bis -170°C abgekühlte und lichtdurchlässige Systeme voraus. Beim optischen Studium der Schneeflocken kann die herkömmliche Stereomikroskopie unter anderem durch die konfokale Lasermikroskopie ergänzt werden, bei welcher die Lichtstrahlen sehr schonend auf die zu analysierenden Gebilde gelenkt werden können. Die konventionelle Lichtmikroskopie nutzt für gewöhnlich moderate bis stärkere Vergrößerungen (30- bis 500-fach), wobei durch die Verwendung spezieller Objektiv-Okular-Kombinationen eine maximale Vergrößerung von 2000-fach zu erreichen ist. Dies hat freilich entsprechende Einschränkungen der Tiefenschärfe zum Ergebnis (LIBBRECHT, 2007; FIERZ et al., 2009).

Die Produktion stereoskopischer Aufnahmen erfolgt in der Regel unter Anwendung des sogenannten Kippverfahrens (STURM, 2016, 2017). Hier wird das zu untersuchende Objekt zuerst in seiner Grundposition und danach nochmals in leicht gekippter Stellung fotografiert, wobei sich der Kippwinkel zur Erzielung zufriedenstellender Resultate zwischen 2° und 10° bewegen sollte. Die beiden durch das Verfahren erhaltenen Aufnahmen können zu einem klassischen Stereogramm (Stereopaar) mit linkem und rechtem Halbbild angeordnet oder zu einer Farb-Anaglyphe überlagert werden (Rot-Cyan, Rot-Grün, Rot-Blau). Das Stereogramm kann durch Verwendung einer Stereobrille (Stereoskop) oder unter Zuhilfenahme autostereoskopischer Blicktechniken (Kreuz- und Parallelblick) betrachtet werden, während für die Inspektion der Farbanaglyphe eine entsprechende Farbbrille heranzuziehen ist.

Resultate

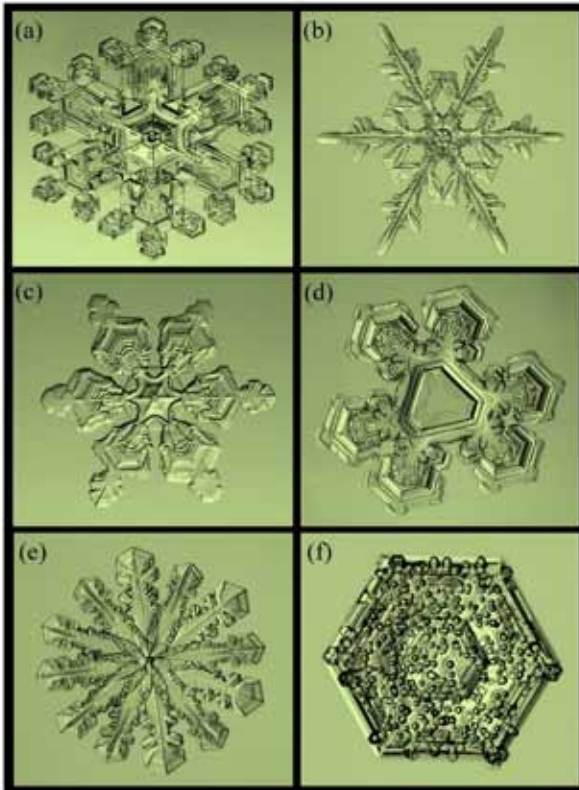
Ausgewählte Beispiele der Präsentation von Schneeflocken unter dem Lichtmikroskop sind in den Abb. 2 bis 5 zusammengestellt. Wie bereits in der Einleitung festgehalten wurde, stellt das hexagonale Prisma eine der simpelsten Grundformen dar, wobei im konkreten Fall eine Differenzierung zwischen tafeliger und säulenförmiger Gestalt vorgenommen werden kann. Prismatische Schneekristalle zeichnen sich durch ihre geringe Größe aus und sind mit bloßem Auge demnach nur sehr schwer zu erfassen (Abb. 2a). In der Natur trifft man sehr häufig auf sternförmige Tafeln, welche sechs hexagonal angeordnete Strahlen aufweisen und insbesondere bei atmosphärischen Temperaturen von -2°C oder -15°C zu beobachten sind (Abb. 2b-e). In den genannten thermischen Bereichen erreicht die Wachstumsdynamik dieser Strukturen ihr Optimum. Dendritische Schneekristalle verfügen ebenfalls über eine weite Verbreitung, wobei hier einzelne sternförmige Strahlen durch zum Teil komplexe Verzweigungen gekennzeichnet sind. Derartige Gebilde treten durch ihre mitunter beachtlichen Größen von 2 bis 4 mm besonders hervor und sind dadurch bereits mit freiem Auge relativ leicht erkennbar. Höchste Komplexität lässt sich bei den farnartigen Dendriten feststellen, welche einen Durchmesser von 5 mm und mehr erreichen können (Abb. 2f, Abb. 3a, b). Als Doppeltafeln zu klassifizierende Schneekristalle verfügen über zwei unterschiedlich große planare Elemente, die durch eine zentrale Säule miteinander in Verbindung stehen. Das in Abb. 3c präsentierte Exempel verfügt über eine obere tafelige Komponente, welche

Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen Schneekristallen:
 (a) hexagonales Prisma,
 (b)-(e) hexagonale Sternformen mit unterschiedlicher Komplexität der einzelnen Strahlen,
 (f) dendritische Sternform.
 Die Größen der einzelnen Objekte reichen von 0,4 mm im Falle des Prismas bis zu 4 mm im Falle der dendritischen Sternform.



wesentlich kleiner als die darunter befindliche sternförmige Struktur ist. Neben den hexagonal organisierten Schneekristallen treten in der Natur auch noch Gebilde mit dreizähliger Rotationssymmetrie auf. Derartige Strukturen werden meist bei Temperaturen nahe -2°C gebildet und zeichnen sich unter anderm durch sternförmige Varianten mit ungerader Anzahl an Hauptstrahlen aus (Abb. 3d). Als besondere Kristallformen können zwölfstrahlige oder zwölfseitige Schneeflocken angesehen werden. Diese setzen sich aus zwei planaren hexagonalen Elementen zusammen, die gegeneinander um einen Winkel von 30° verdreht sind. Hier liegt eine spezielle Form der Zwillingsbildung von Kristallen vor, welche in der Natur eher selten beobachtet werden kann (Abb. 3e). Bei ihrem Transport durch die Atmosphäre können sich winzige Partikel aus Raureif an die Schneeflocken anlegen, wobei ein geringer Bedeckungsgrad mit solchen Teilchen die Kristallgrundform noch leicht identifizieren lässt (Abb. 3f). Bei intensiver Auskristallisierung von Reifpartikeln entstehen hingegen kugelförmige Gebilde (Graupel).

Die stereoskopische Fotografie ergibt vor allem bei solchen Objekten einen Sinn, welche über einen verwertbaren Grad an räumlicher Tiefe verfügen. Als Paradebeispiele gelten hier sicherlich sternförmige und dendritische Strukturen mit ihren einzelnen horizontalen und vertikalen Komponenten. Derartige Schneekristalle zeigen gerade im zentralen Bereich oftmals ein verstärktes Höhenwachstum, welche mithilfe geeigneter Stereoaufnahmen besonders gut herausgearbeitet werden kann (Abb. 4, 5).

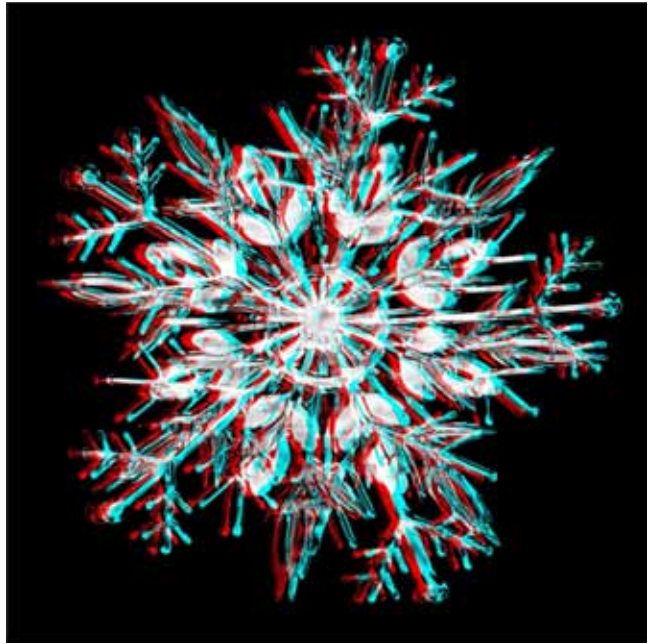


*Abbildung 3:
Lichtmikroskopische Aufnahmen
weiterer Schneekristallformen:
(a)-(b) dendritische Sternformen,
(c) Doppeltafel mit unterschiedlich
großen Planarkomponenten,
(d) trianguläre Geometrie,
(e) zwölfstrahlige Form,
(f) hexagonales Prisma, welches
über seine gesamte Fläche mit
Raureifpartikeln bedeckt ist.
Die Größen der einzelnen Objekte
schwanken wiederum zwischen 0,4
und 4 mm.*

Diskussion

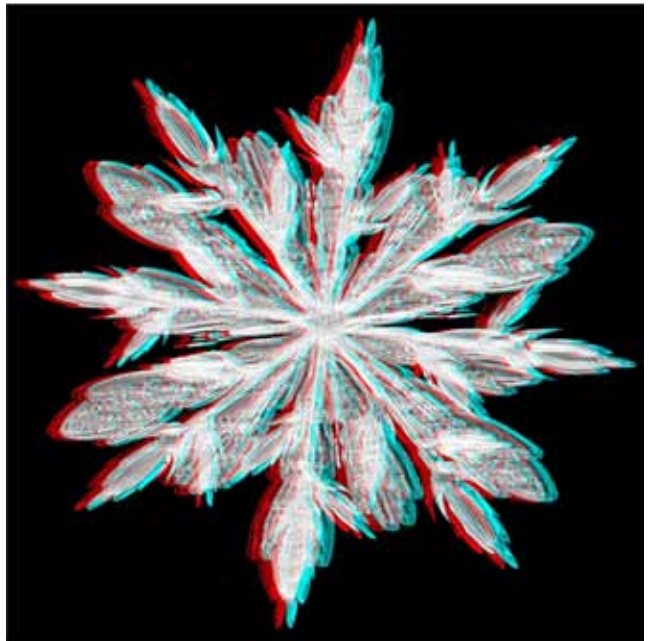
Die wissenschaftliche Dokumentation von Eiskristallen und Schneeflocken repräsentiert seit einigen Jahrzehnten ein bedeutendes Teilgebiet der Kristallografie. Diese Objekte werden zum Teil über mehrere Etappen durch die atmosphärischen Schichten transportiert, wodurch sie eine große Formenvielfalt zu entwickeln vermögen. Für die Untersuchung dieses Formenreichtums sind spezielle mikroskopische Techniken heranzuziehen (BAILEY & HALLETT, 2004; LIBBRECHT, 2007; FIERZ et al., 2009). Anhand experimenteller Studien ließ sich in der Vergangenheit der Nachweis dafür erbringen, dass sich einzelne Grundtypen wie hexagonale Prismen, sechsstrahlige Sterne oder dendritische Formen nur unter speziellen thermischen Bedingungen entwickeln können. Ein zweiter formbestimmender Faktor findet in der Luftfeuchtigkeit seine Repräsentation, wobei Eiskristalle mit prädestinierter Morphologie, welche eine atmosphärische Schicht mit erhöhter Feuchtigkeit passieren, eine teilweise signifikante Modifikation ihrer Gestalt erfahren (HOBBS, 1974; PETRENKO & WHITWORTH, 2002; BAILEY & HALLETT, 2004). Bei der Erforschung von Schneeflocken steht freilich nicht nur der in der Natur auftretende Formenreichtum im Mittelpunkt des Interesses, sondern finden auch jene mit dieser morphologischen Vielfalt in Verbindung stehenden Konsequenzen ihre Berücksichtigung. Anhand der Gestalt einzelner Eis- und Schneekristalle können wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Konsistenz einer Schneeschicht gewonnen werden, wobei diese Information wiederum als Grundlage für die Lawinenkunde zu dienen vermag (FIERZ et al., 2009).

*Abbildung 4:
Stereoskopische Aufnahme
(Rot-Cyan-Anaglyphe) einer
dendritischen Sternform mit
komplexer Tiefenausdehnung
(Größe ca. 3 mm).
Für die Wahrnehmung des
Raumeffektes ist eine Rot-
Cyan-Brille heranzuziehen.*



Die Mikroskopie von Schneeflocken stellt eine anspruchsvolle Tätigkeit dar, weil die Zerstörung der Untersuchungsobjekte mit allen Mitteln zu vermeiden ist. In Speziallabors, die mit der Analyse derartiger fragiler Strukturen befasst sind, werden die Gebilde auf Kupferplatten montiert und auf -196°C abgekühlt (LIBBRECHT, 2007). Dieser hohe präparative Aufwand hat zur Folge, dass sich die mikroskopische

*Abbildung 5:
Weitere Stereofotografie
(Rot-Cyan-Anaglyphe) eines
Schneekristalls, welcher sich
durch seine hochkomplexe
dendritische Sternform
auszeichnet (Größe ca. 4 mm).
Mithilfe des Raumbildes
lässt sich insbesondere
die Tiefenausdehnung im
Kristallzentrum näher
ergründen.*



Dokumentation von Schneeflocken nahezu allen Hobbymikroskopikern entzieht, da die Installation einer geeigneten Kühlvorrichtung hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand erfordert.

Zahlreiche Strukturtypen von Schneekristallen zeichnen sich dadurch aus, dass sie über eine verwertbare Tiefenausdehnung verfügen, wodurch die Anwendung der Raumfotografie für einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn sorgt (STURM, 2018a, 2018b). Insbesondere prismatische oder aus mehreren Tafeln beziehungsweise Ebenenzusammengesetzte Objekte können im stereoskopischen Bild morphologische Merkmale preisgeben, welche in der konventionellen zweidimensionalen Fotografie nur schwer erkennbar sind. Die Rasterelektronenmikroskopie mit ihrer hohen Tiefenschärfe bietet hier für die Stereofotografie sicherlich ein breiteres Betätigungsfeld als die Lichtmikroskopie, bleibt aber andererseits weitgehend auf den universitären Bereich beschränkt (STURM, 2018b). Es ist davon auszugehen, dass das optische Verfahren der räumlichen Bildgebung in Zukunft eine stärkere Nutzung in der Schneekristallforschung erleben wird.

Danksagung

Der Autor dankt Prof. Kenneth G. LIBBRECHT vom California Institute of Technology (Caltech) für die Bereitstellung der in Abb. 1 präsentierten Zusammenstellung von Schneekristalltypen und den in den Abb. 2 und 3 dargestellten Beispielfotografien (<http://www.snowcrystals.com/guide/guide.html>).

Literatur

BAILEY, M., HALLETT, J. (2004): Growth rates and habits of ice crystals between -20 and -70°C. - *Journal of Atmospheric Science* 61, 514-544.

FIERZ, C., ARMSTRONG, R. L., DURAND, Y., ETCHEVERS, P., GREENE, E., et al. (2009): The International Classification of Seasonal Snow on the Ground. 90 p., UNESCO, Paris.

HOBBS, P. V. (1974): *Ice Physics*. 837 p., Clarendon Press, Oxford.

KLESZIUS, M. (2007): The mystery of Snowflakes. - *National Geographic Magazine* 211, 20.

KNIGHT, C., KNIGHT, N. (1973): Snow Crystals. - *Scientific American* 228, 100-107.

LIBBRECHT, K. G. (2007): The Formation of Snow Crystals. - *American Scientist* 95, 52-59.

MAGONO, C., LEE, C. W. (1966): Meteorological Classification of Natural Snow Crystals. - *Journal of the Faculty Science* 7, 321-335.

MASON, B. J. (1971): *Physics of Clouds*. 671 p., Clarendon Press, Oxford.

PETRENKO, V. F., WHITWORTH, R. W. (2002): *Physics of Ice*. 392 p., Oxford University Press, Oxford.

- 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. (2018a): Stereofotografie in der Elektronenmikroskopie - Teil 3: Kristallografie. - Mikroskopie, 5/4, 188-199.
- STURM, R. (2018b): Stereofotografie in der Elektronenmikroskopie. 138 p.; Grin-Verlag, Hamburg.