

# Spezielle mikroskopische Methoden in den Geowissenschaften

von

Janet Schönmath, 5. BGM  
Peter – Schmohl - Str. 5  
09599 Freiberg

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Mikroskopie im Allgemeinen und in der Geologie im Besonderen ein breitgefächertes, sehr vielfältiges und interessantes Thema darstellt. Diese kurze Übersicht kann daher nur einen kleinen Einblick geben. Es werden die Kathodolumineszenzmikroskopie und die Nomarski (DIC) Mikroskopie vorgestellt. Diese zwei Methoden können auch nur im Überblick erläutert werden.

Die Nomarski Differentielle Interferenzkontrast (DIC) Mikroskopie ist eine moderne Technik, die in den Materialwissenschaften zum sichtbar machen von verschiedenen Phasen und/oder zum Abbilden des Oberflächenreliefs der Proben in der Größenordnung von  $500\text{\AA}$  angewendet wird. Es handelt sich hierbei um eine Methode, bei der die Differenzen in der optischen Weglänge in einen Reliefkontrast umgesetzt werden.

In der Kathodolumineszenzmikroskopie wird das Lumineszenzsignal durch einen Elektronenstrahl angeregt und aufgrund von verschiedenen Punktdefekten in dem Material erzeugt. Deshalb ist die Kathodolumineszenz eine leistungsstarke Methode zum Charakterisieren von Defektstrukturen von festen Materialien, zum Unterscheiden verschiedener Phasen und zum deutlich machen von detaillierten Informationen über die chemische Zusammensetzung. (Götze, 2007)

Welche Methode bei der Untersuchung und Analyse von Materialien zum Einsatz kommt, hängt von der Art der Probe, dem Ziel der Untersuchung und den analytischen Eigenschaften der Methode ab. Wichtige Kriterien zur Wahl der Methode sind weiterhin die Verfügbarkeit der Geräte, der Zeitaufwand und die Kosten des Verfahrens. Man benötigt auf jeden Fall einen Spezialisten, der sich mit der jeweiligen Methode auskennt, um die gewünschten detaillierten Erkenntnisse zu erlangen.

# 1. Mikroskopische Methoden in den Geowissenschaften

Als Mikroskopie wird jede Technik bezeichnet, die zur Erzeugung von Bildern von Strukturen und Details verwendet wird, die ansonsten zu klein wären um vom menschlichen Auge wahrgenommen zu werden. Die Entwicklung der Mikroskope begann mit der Lupe. Durch den technischen Fortschritt entstanden immer verfeinertete Untersuchungsmethoden. [1]

In keinem Feld der Mikroskopie ist die quantitative Messung ausgeprägter als bei den Geowissenschaften. Schon in der Mitte des 18. Jahrhunderts entstanden Aufsehen erregende Publikationen, bei denen die Beschreibung von Kieselalgen in organischen Sedimenten über den Vergleich von Formen hinausging. Die Vorläufer moderner Polarisationsmikroskope lieferten schon damals wichtige Beiträge zur Farbdifferenzierung.

Es werden immer neue Methoden zum Sichtbarmachen der kleinsten Bestandteile der Untersuchungsobjekte entdeckt und erforscht. Man nutzt die verschiedensten Eigenschaften der Materialien um die Strukturen, Defekte und Zusammensetzung erforschen zu können. [2]

Aufgrund der vielfältigen Untersuchungs- und Forschungsaufträge haben eine große Anzahl verschiedener mikroskopischer Methoden eine gleichwertige Daseinsberechtigung. Jede Methode ist für die Erzielung bestmöglicher Untersuchungsergebnisse auf einem bestimmten Gebiet ganz besonders gut geeignet.

Für die Untersuchung können die Teilchen des Materials durch vier unterschiedliche Varianten angeregt werden. Das geschieht entweder durch Beschuss mit infrarotem Licht, sichtbarem Licht, ultraviolettem Licht oder einem Elektronenstrahl.

# 2. Zusammenstellung spezieller mikroskopischer Methoden

Es gibt verschiedene mikroskopische Verfahren, die auf unterschiedlicher Anregung der Teilchen in den Untersuchungsmaterialien basieren.

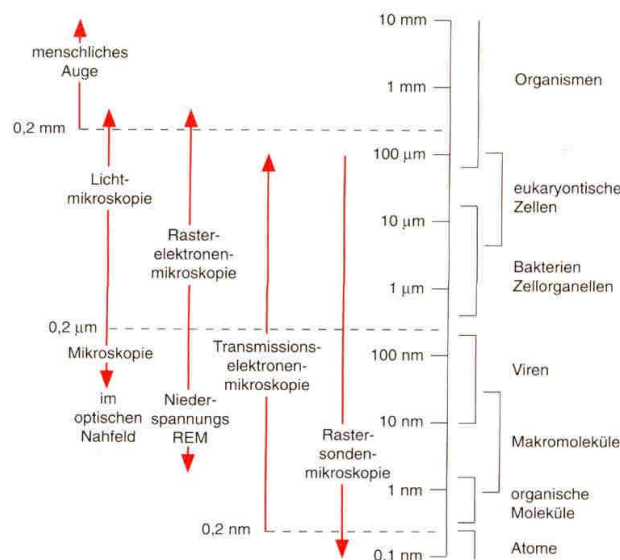


Abbildung 1: Auflösungsvermögen der Mikroskope [3]

## 2.1. Infrarotmikroskopie

Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge zwischen 400 und 750 nm. Das unsichtbare infrarote Licht hat eine höhere Wellenlänge bis 40.000 nm. Infrarot kann viele Materialien besser durchdringen als sichtbares Licht. Die Untersuchung dicker, wenig durchsichtiger Präparate im infraroten Licht liefert daher oft bessere Ergebnisse. Die Erfassung des Bildes erfolgt hier natürlich nicht über das Auge, sondern mit Hilfe einer infrarotempfindlichen Video- oder Fotokamera. Erzminerale sind im sichtbaren Licht völlig undurchsichtig und erfordern spezielle Auflicht-Erzmikroskope für ihre Untersuchung. Die Infrarot-Mikroskopie ist vielfach eine kostengünstige Alternative. Für kristallographische Zwecke kann sie mit der Polarisationsmikroskopie kombiniert werden. [4]

## 2.2. Lichtmikroskopie

Bei der klassischen Lichtmikroskopie wird Licht, das von dem zu betrachtenden Objekt reflektiert oder durch dieses hindurchgeleitet wird, durch eine Reihe von Linsen gelenkt um dann vom Auge oder einer Kamera aufgenommen zu werden. Klassische Polarisationsmikroskopie bleibt ein unverzichtbarer Bestandteil der quantitativen Geologie. Angefangen mit der Erfassung doppelbrechender Eigenschaften von Kristallen und Mineralstrukturen und ihren Zuordnungen über das Michel-Levy-Color-Chart bis hin zur Prüfung der Eigenschaften von Kokskohle über den Reflektionsanteil des polarisierten Lichtes, die Auswertung der Farb- und Helligkeitsanteile als Funktion von Drehwinkeln bleiben zentrale Kriterien in der Begutachtung geologischer Strata. [2]

## 2.3. UV Mikroskopie

Die Verwendung von monochromatischem Licht mit kurzer Wellenlänge bewirkt nach der Abbe'schen Gleichung eine höhere Auflösung.

$$d = 1,22 \times \lambda / (NA \text{ obj.} + NA \text{ cond.})$$

Eine besonders hohe Auflösung wird dabei mit Licht im UV-Bereich erzielt. Denn zum einen bewirkt die kurze Wellenlänge des UV-Lichts schon eine höhere Auflösung, zum anderen wird UV-Licht auch vom Präparat absorbiert (z.B. von Proteinen und Aminosäuren); dadurch erhält man auch mehr Kontrast als bei anderen Wellenlängen; Organellen und kleine Strukturen sind somit auch ohne zusätzliche Kontrastverfahren deutlich sichtbar. [5]



**Abbildung 2:** Calcit unter normalem Licht;  
Fundort: Schwarzwald (Bayern, Deutschland);  
Privatsammlung Lutz Geißler [6]



**Abbildung 3:** Calcit unter UV-Licht;  
Fundort: Schwarzwald (Bayern, Deutschland);  
Privatsammlung Lutz Geißler [6]

## 2.4. Elektronenstrahlmikroskopie

Da das Auflösungsvermögen von der Wellenlänge des Lichts abhängig ist, wurden seit den 1930er Jahren Elektronenmikroskope entwickelt, die Elektronenstrahlen anstelle von Licht verwenden. Weil Elektronenstrahlen eine kleinere de-Broglie-Wellenlänge haben, wird dadurch die erreichbare Auflösung stark erhöht. So kann man in einem Transmissionselektronenmikroskop einzelne Atomreihen sichtbar machen und Abstände unter 0.1nm bestimmen. Elektronenmikroskope lassen sich nach zwei grundsätzlichen Gesichtspunkten einteilen. Zum einen nach der Art der Bilderzeugung (Sekundärelektronenmikroskope (SEM) oder Ruhebildmikroskope) und zum anderen nach der Art der Geometrie der Anordnung (Transmissionselektronenmikroskop, Reflexionsmikroskop).

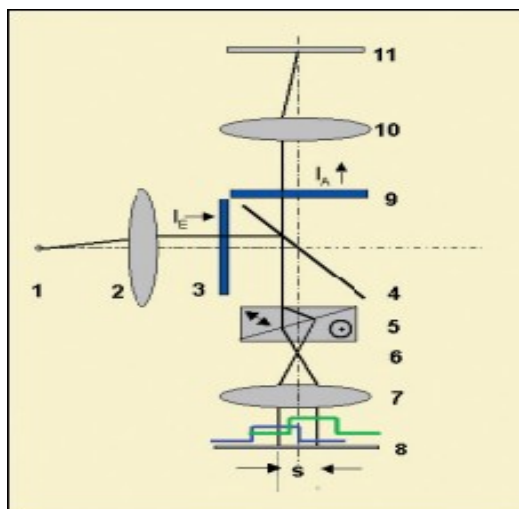
Im elektromagnetischen Bereich ist die Röntgenmikroskopie zu nennen. [2] [7]

## 3. Ausgewählte Mikroskopiemethoden

### 3.1. Nomarski DIC

#### 3.1.1. Grundlagen von Nomarski DIC

Der differentielle Interferenzkontrast (DIC) nach Nomarski stellt zur Zeit das am häufigsten verwendete interferenzmikroskopische Verfahren zur kontrastreichen Abbildung von geometrischen und physikalischen Phasenobjekten dar. Der DIC wurde in den 1950er Jahren von Georges Nomarski in Paris erfunden. Es handelt sich hierbei um eine Methode, bei der die Differenzen in der optischen Weglänge in einen Reliefkontrast umgesetzt werden. Diese Methode ist jedoch sehr kostenaufwendig, erfordert spezielle, spannungsarme Objekte und funktioniert nur, wenn keine doppelbrechenden Materialien im Probenraum angeordnet sind.



**Abbildung 4:**

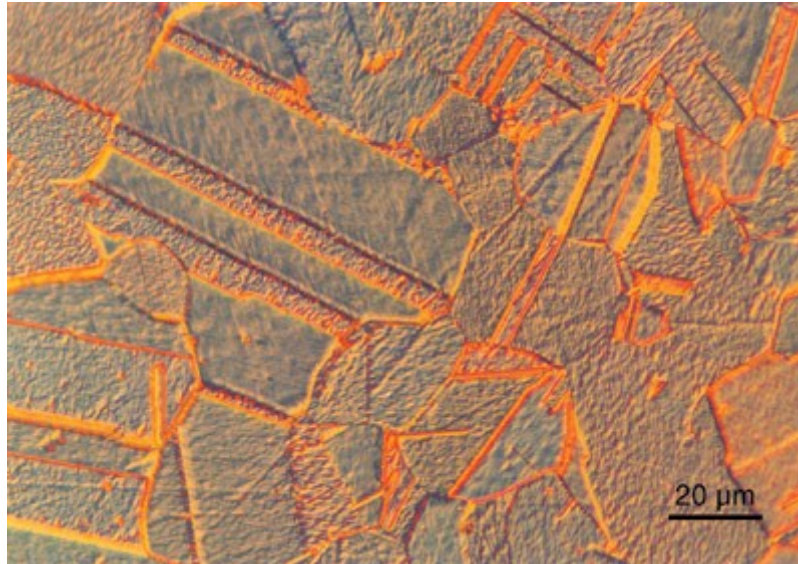
Optischeschema des differentiellen Interferenzkontrastes (DIC) nach Nomarski:

- 1 Lichtquelle,
- 2 Kollektor,  $I_E$  Eingangintensität,
- 3 Polarisator,
- 4 Planglas,
- 5 DIC-Prisma (modifiziertes Wollaston-Prisma1),
- 6 Objektiv-Austrittspupille,
- 7 Objektiv, „blau“ und „grün“: Bild und Zwillingsbild der reflektierten und vom Objekt deformierten Wellenfront,
- 8 Präparat,
- 9 Analysator,  $I_A$  Ausgangintensität,
- 10 Tubuslinse,
- 11 Zwischenbildebene

[8]

Zunächst durchläuft das Mikroskopierlicht einen Polarisationsfilter, der als Polarisator bezeichnet wird. Dieses polarisierte Licht wird durch ein so genanntes Nomarski-Prisma in zwei kohärente Strahlen gleicher Amplitude aufgespalten. Diese Aufspaltung erfolgt auf der Basis polarisationsoptischer Effekte. Der Polarisator stellt somit ein doppelbrechendes Element dar, bei dem zusätzlich die Teilstrahlen seitlich versetzt sind. Es werden so von jeder Objektstruktur völlig identische Zwillingsbilder erzeugt. Die entstehenden Strahlen bestehen aus polarisiertem Licht mit senkrecht zueinander orientierten Schwingungsebenen. [9] Je nach Dicke und Dichte der

Strukturen die die Strahlen durchlaufen, werden sie unterschiedlich stark abgebremst und so in ihrer Phase verschoben. An den Kanten von Strukturen verläuft ein Strahl durch die Struktur selbst, der andere hingegen durch das Umgebungsmedium. Besonders deutlich tritt der DIC an Kanten im Präparat hervor, wo die beiden Teilstrahlen in ihrer Phase unterschiedlich verschoben werden und so eine abweichende Amplitude erzeugen. Die Kanten erscheinen dadurch dunkler oder heller, was einen 3D-Effekt erzeugt. [10]



**Abbildung 5:** Cu, etched, Nomarski interference contrast [11]

Durch den Kondensator werden die Strahlen parallel zueinander ausgerichtet, wodurch sie die Objektebene in einem bestimmten Abstand zueinander passieren. Dieser Abstand ist sehr gering und liegt unterhalb der Auflösungsgrenze des Mikroskops. Im weiteren Verlauf passieren die beiden Lichtstrahlen noch ein zweites Nomarski-Prisma, wo sie wieder zusammengeführt werden. Dieses Prisma ist senkrecht zur optischen Achse des Mikroskops verschiebbar, aufgrund dessen ist der Gangunterschied zwischen den beiden Strahlen stufenlos veränderbar. Bei einem Gangunterschied von  $0\lambda$  erscheint der Hintergrund völlig dunkel. Mit steigendem Phasenunterschied erreicht man über mehrere Graustufen das Weiß der I. Ordnung und in weiterer Folge Interferenzfarben von gelb über rot bis blau. Den Phasenunterschied kann man durch das Verschieben des zweiten Prismas einstellen. Der Kontrast lässt sich aber auch so einstellen, dass sich ein Amplitudenkontrast ergibt. Wird der Gangunterschied so eingestellt, dass die beiden Strahlen das Prisma phasengleich verlassen, so erscheint der Untergrund dunkel und zwei gegenüberliegende Kanten des Objektes hell. Dies bezeichnet man als negativen Kontrast. Bei einem Gangunterschied von  $\lambda/2$  tritt der gegenteilige Effekt ein. Man erhält dann einen hellen Hintergrund und zwei dunkle Kanten. Dies bezeichnet man als positiven Kontrast. [10]

Oberhalb des zweiten Prismas befindet sich ein weiterer Polarisationsfilter, der Analysator. Dieser befindet sich in so genannter Kreuzstellung zum Polarisator. Nach dem Austritt aus dem Analysator kommt es zu Interferenzerscheinungen zwischen den zusammengeführten Strahlen. Um dabei ein homogenes Feld zu bekommen muss der Winkel zwischen den beiden Wellenzügen aber  $0^\circ$  betragen. Dazu muss die Vereinigung der beiden Teilstrahlen genau in der hinteren Brennebene des Objektivs erfolgen. Diese Erscheinungen sind von dem eingestellten Gangunterschied abhängig, dieser wiederum wird durch das Präparat zusätzlich modifiziert.

Daraus ergeben sich die folgenden Charakteristika des DIC:

- erstens bestimmt der durch das obere, verschiebbare Prisma eingestellte Gangunterschied die Helligkeit und die Farbe des Bilduntergrundes und
- zweitens wird der eigentliche, reliefartige Bildkontrast durch die beschriebene Modifizierung des Basisgangunterschiedes bestimmt. [9]

Für den Interferenzkontrast notwendigen Prismen bestehen aus zwei in Subtraktionsstellung miteinander verkitteten Kalkspatkeilen. Diese Teilprismen sind extrem flach, so dass das Prisma die Form eines Scheibchens besitzt. Der Interferenzkontrast wird wie auch bei anderen Kontrastverfahren eingestellt. Zuerst wird das Objekt im Hellfeld eingestellt und die Köhlersche Beleuchtung justiert. Anschließend werden die beiden Polfilter in Kreuzstellung sowie die beiden Prismen in den Strahlengang gebracht. Zuletzt können durch Verändern des Gangunterschiedes der gewünschte Kontrast und Kanteneffekt eingestellt werden. [10]

Zusammenfassend kann man sagen, dass die folgenden baulichen Merkmale in einem Mikroskop für DIC unbedingt vorhanden sein müssen. Der Kondensor muss mit den Nomarski-Prismen ausgestattet sein. Diese Prismen befinden sich meist auf einer drehbaren Revolverscheibe. Zusätzlich ist in den Kondensor meist noch der Polarisator integriert. Oberhalb der Objekte muss das zweite, verschiebbare Nomarski-Prisma mit dem Analysator vorhanden sein. Diese Baugruppe wird zwischen dem Stativ und dem Tubus angebracht. Unbedingt erforderlich ist eine intensive Lichtquelle (meist Halogenleuchte mit 50 oder 100 Watt). Es ist möglich ein  $\lambda/4$ -Plättchen einzubauen, welches einen zusätzlichen Farbkontrast erzeugt. [9]

### **3.1.2. Anwendung von Nomarski DIC**

Der DIC eignet sich für dünne und transparente Phasenobjekte sowie für fibrilläre Strukturen, weil man auch bei weit geöffneter Aperturblende immer noch ausreichend Kontrast erreicht.

Im DIC können optische Schnitte gemacht werden. Es werden einzelne Schichten des Objektes durch Verstellen des Feintriebels nacheinander untersucht. Daher kann er auch bei dickeren Präparaten verwendet werden.

Es können einerseits Objekte untersucht werden, die selbst nur eine extrem geringe Phasenverschiebung aufweisen, aber auch Objekte die sehr dick oder gefärbt sind und deswegen eine starke Phasenverschiebung erzeugen. Dies ermöglicht eine stufenlose Einstellmöglichkeit des Kontrastes.

Mit Hilfe des Amplitudenkontrastes können sehr schwache Farbtöne verstärkt werden, das man sich bei der Untersuchung mit sehr schwachen Vitalfärbungen zu Nutze macht. [10]

## **3.2. Kathodolumineszenz (KL) Mikroskopie**

### **3.2.1. Grundlagen von KL Mikroskopie**

Erstmals wurden Lumineszenzerscheinungen in Gesteinen vom Alchimisten Cascierolo im Jahr 1604 beobachtet. CROOKS untersuchte 1880 erstmals systematisch die Lumineszenz von Mineralen. Eine Erklärung für Lumineszenzerscheinungen wurde erst durch die Entwicklung der Quantentheorie und der Ligandenfeldtheorie möglich. [12]

Ein Kathodolumineszenzmikroskop ist eine Kombination eines optischen Mikroskops mit einer Kathodenstrahlröhre. Es dient zur Untersuchung der Kathodolumineszenz von polierten Dünnschliffen von Festkörperproben. Die Dünnschliffe, sollen mit einem wärmebeständigen Klebstoff präpariert und

nicht abgedeckt sein. Um eine Aufladung der Probe zu verhindern, muss die Oberfläche mit einer dünnen leitenden Schicht aus Gold oder Kohlenstoff beschichtet werden. Es können Strukturen innerhalb der Kristalle oder der Gefüge sichtbar gemacht werden, die unter normalen lichtmikroskopischen Bedingungen nicht erkennbar sind. [13]

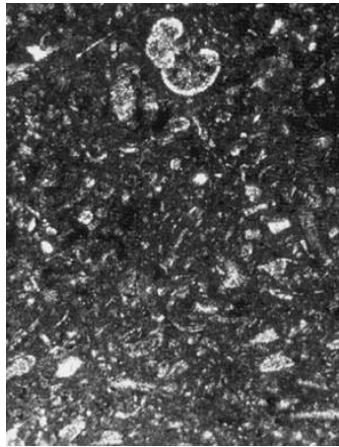


Abbildung 6: Kalk im Durchlicht [14]

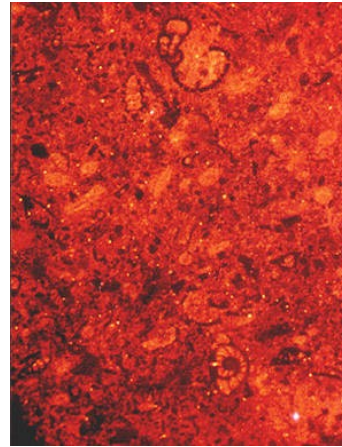


Abbildung 7: Kalk in der Kathodolumineszenz [14]

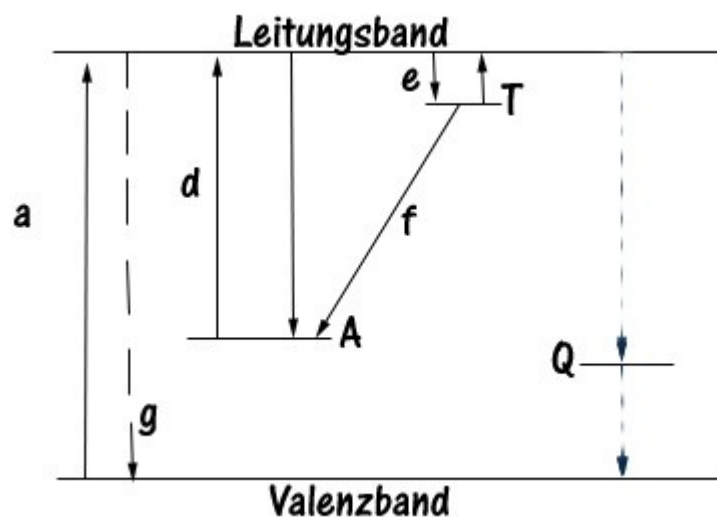
Lumineszenz ist die Emission von sichtbarem Licht aus einem Halbleiter oder Isolator, die durch Elektronensprung von einem höheren auf ein niedriges Energieniveau bewirkt wird. Die Anregung erfolgt immer durch eine Energie kürzerer Wellenlänge. Die Anregungsenergie liegt zwischen 10 und 20 kV mit Stromdichten von  $10\mu\text{A}/\text{mm}^2$ . Bei der Kathodolumineszenz erfolgt die Anregung durch Elektronenbeschuss von einer Kathode auf die Probe. Der Elektronenstrahl trifft auf ein Atom, Ion oder Molekül in der Probe. [15]

Dieser Beschuss führt zu unterschiedlichen Erscheinungen. Es kommt zur Absorption, Reflektion, der Bildung von Sekundärelektronen, Röntgenstrahlung, zur geringfügigen Beschädigung der Probenoberfläche und zur Bildung von Lumineszenzerscheinungen im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektrum.

Der Elektronenstrahl verursacht einen Quantensprung eines Elektrons, welches somit die Energie des Elektronenstrahls absorbiert. Das Elektron wird hierbei in ein höheres Niveau befördert. Es wandert dabei auf einem Zufallspfad durch den Festkörper. Nach einer Verweilzeit von ca. 8-10s fällt das Elektron von dem höheren in sein ursprüngliches Energieniveau zurück. Dabei kommt es zur Energieemission in Form eines Photons, wenn der Energiequant zwischen dem ursprünglichen und dem angehobenen Energieniveau einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Die Energie des Photons entspricht genau der Energiedifferenz des Übergangs. Reicht der Energiequant nicht aus, wird die Energie unter Wärmebildung absorbiert. Die Intensität der Lumineszenz hängt weiterhin von der Konzentration von Aktivator- und Unterdrückerionen im Gastmineral ab. Dabei kann ein Ion in dem einen Mineral als Aktivatorion fungieren, wohingegen es bei einem anderen Mineral als Unterdrückerion fungiert. Als Aktivatorion kommen  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen und Seltene Erden-Ionen in Frage. Die Unterdrückung von Lumineszenz hängt von drei Faktoren ab. Zum einen kann durch an das Aktivatorion angrenzende Verunreinigungen oder Kristallbaufehler die Emission unterdrückt werden. Zum anderen kann durch Unterdrückerionen die Energie des Elektronenstrahls absorbiert werden und zuletzt kann es durch eine zu hohe Konzentration an Aktivator- oder Unterdrückerionen ebenfalls zu einer Absorption des Elektronenstrahls kommen. [12]

Es gibt zwei Modelle mit denen die Lumineszenzprozesse beschrieben werden können. Zum einen das Konfigurationskoordinaten-Modell und zum anderen das Band-Band-Rekombinationsmodell. Das

Konfigurationskoordinaten-Modell wurde aus der Molekülphysik übernommen und charakterisiert das Lumineszenzzentrum als ein System von vibronischen und elektronischen Zuständen. Im Grundzustand befindet sich das Elektron auf dem Vibrationsniveau  $n=0$ . Durch Zuführung der Anregungsenergie erfolgt der Übergang aus diesem Niveau in den angeregten Zustand. Nach der Absorption relaxiert das System unter Emission von Photonen in das unterste Schwingungsniveau des angeregten Zustandes  $m=0$  und das Elektron kehrt strahlend mit einer Emissionsenergie über einen Franck-Condon-Übergang in den Grundzustand zurück. Das Bändermodell ist aus der Festkörperphysik hervorgegangen. Es basiert auf der Annahme von getrennten Bereichen der Elektronenenergie, die durch eine Bandlücke voneinander getrennt sind. Mit dem Bändermodell lassen sich Prozesse unter Beteiligung freier Ladungsträger, wie elektronische und optische Übergänge, beschreiben. Die Struktur eines idealen Kristalls führt zur Ausbildung eines Valenz- und eines Leitungsbandes ohne zusätzliche Energieniveaus. Durch Störungen der idealen Kristallstruktur kommt es zur Ausbildung weiterer Energieniveaus, die sich in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband befinden. Lumineszenzzentren in Festkörpern sind entweder reine Gitterdefekte oder extrinsische Defekte durch Spurenelementeinbau. Größere Defekte wie Dislokationen oder Cluster können ebenfalls am Lumineszenzprozess beteiligt sein. (Götze, 2002)



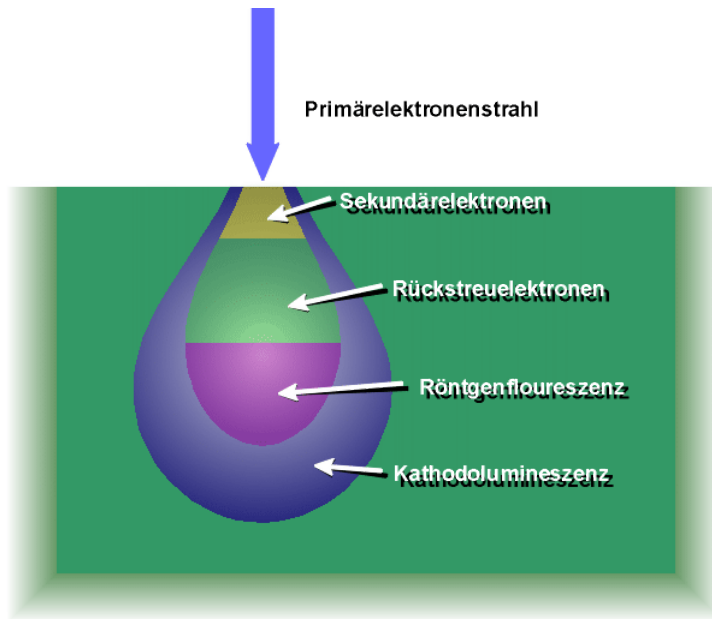
**Abbildung 8:** Erklärung der Lumineszenz mit Hilfe des Band-Modells (nach STEFFEN 2000) [6]

Farbe und Intensität der Kathodolumineszenz sind im wesentlichen von den Eigenschaften der Probe abhängig, sind aber auch stark durch die Arbeitsbedingungen der Elektronenquelle bestimmt

Ursachen für Kathodolumineszenz in Mineralen sind Fehler im Kristallgitter, Fremdatome im Kristallgitter und Chemismus stöchiometrisch reiner Kristalle.

Heute sind zwei Arten von Kathodolumineszenzmikroskopen im Umlauf. Eines arbeitet mit einer „kalten Kathode“, wobei der Elektronenstrahl durch eine Gasentladungsröhre erzeugt wird. Das andere erzeugt einen Elektronenstrahl mittels einer Glühkathode, wobei die Elektronen von einem glühenden Wolframdraht aus beschleunigt werden.





**Abbildung 9:** Wechselwirkungsmechanismen und -gebiete des Primärelektronenstrahls mit einem Festkörper [16]

Vorteil der heißen Kathode ist die hohe und exakt kontrollierbare Intensität des Elektronenstrahls, wodurch auch schwach lumineszierende Materialien zum Leuchten angeregt werden können. Lumineszenz kann noch aus Bereichen beobachtet werden, die bis zu 2 Mikrometer vom Auftreffpunkt des Strahls entfernt sind. Die erreichbare Ortsauflösung der Kathodolumineszenz wird durch die Primärstrahlenergie bestimmt. Je höher die Energie, desto größer die räumliche Ausdehnung der Lumineszenzkeule und desto geringer die Ortsauflösung. Die Struktur der Probe kann die Ortsauflösung insofern beeinflussen als dass die Bereiche mit einem attraktiven Potential im Leitungs- und Valenzband die erzeugten Elektron-Loch-Paare anziehen und so die Lumineszenzkeule deformieren. [13, 16]

### 3.2.2. Anwendung von KL Mikroskopie

Diese Untersuchungsmethode wird in vielen Bereichen der Geo- und Materialwissenschaften für die Identifizierung und Qualifizierung verschiedener Phasen in Gesteinen als Standardmethode verwendet. Sie wird zur Analyse der Realstruktur und Kristallchemie von Festkörpern sowie der mikrostrukturellen Charakterisierung von Gesteinen eingesetzt. (Götze, 2002)

Man kann mit der Kathodolumineszenzmikroskopie zum Beispiel eine Herkunftsanalyse von Quarz-Debritus durchführen. Weiterhin kann man Quarzzemente beobachten, den Zonarbau und das Bildungsmilieu von Karbontazementen ermitteln, die „Geisterstrukturen“ ehemaliger Komponenten in Dolomiten abbilden und Gitterfehler erkennen. [15]

Es wird eingesetzt, um eine Aussage über die Qualität der Erhaltung des Schalenmaterials machen zu können. Dies ist besonders wichtig, wenn man an Fossilien stabile Isotope messen will. [12]

## 5. Literatur

### Bücher:

- Götze, J.: Sonderdruck aus Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, „Kathodolumineszenz-Mikroskopie und –Spektroskopie in den Geo- und Materialwissenschaften“, Band 147, 2002
- Götze, J.: „APPLICATION OF NOMARSKI DIC AND CATHODOLUMINESCENCE (CL) MICROSCOPY TO BUILDING MATERIALS – A PRELIMINARY STUDY“, 2007
- Pavicevic M.K., Amthauer G.: Band 1, Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden, „Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften“, Stuttgart 2000, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung

### Web-Seiten:

- [1] [de.wikipedia.org/wiki/Mikroskopie](http://de.wikipedia.org/wiki/Mikroskopie)
- [2] [www.microspectro.de/fileadmin/templates/docs/Geo\\_Spektroskopie\\_d\\_V2.pdf](http://www.microspectro.de/fileadmin/templates/docs/Geo_Spektroskopie_d_V2.pdf)
- [3] [www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/Mikroskopie-Auflosun.jpg](http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/Mikroskopie-Auflosun.jpg)
- [4] [www.univie.ac.at/mikroskopie/4\\_advanced/ir/1\\_einleitung.htm](http://www.univie.ac.at/mikroskopie/4_advanced/ir/1_einleitung.htm)
- [5] [www.univie.ac.at/mikroskopie/4\\_advanced/uv/1\\_einleitung.htm](http://www.univie.ac.at/mikroskopie/4_advanced/uv/1_einleitung.htm)
- [6] [www.geoberg.de/text/geology/05111601.php](http://www.geoberg.de/text/geology/05111601.php)
- [7] [de.wikipedia.org/wiki/Elektronenmikroskop](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenmikroskop)
- [8] [www.photonik.de/fileadmin/pdf/fachaufsaetze/photonik\\_2003\\_04\\_50.pdf](http://www.photonik.de/fileadmin/pdf/fachaufsaetze/photonik_2003_04_50.pdf)
- [9] [www.mikroskopie.de/kurse/dic-theo.htm](http://www.mikroskopie.de/kurse/dic-theo.htm)
- [10] [www.univie.ac.at/mikroskopie/2\\_kontraste/interferenz/2\\_prinzip.htm](http://www.univie.ac.at/mikroskopie/2_kontraste/interferenz/2_prinzip.htm)
- [11] [www.imt.si/index.php?id1=2&id2=2&id3=2&lang=en](http://www.imt.si/index.php?id1=2&id2=2&id3=2&lang=en)
- [12] [www.fen-net.de/schulung/teilnehmerseiten/2002-12-17/CL.html](http://www.fen-net.de/schulung/teilnehmerseiten/2002-12-17/CL.html)
- [13] [de.wikipedia.org/wiki/Kathodolumineszenzmikroskop](http://de.wikipedia.org/wiki/Kathodolumineszenzmikroskop)
- [14] [www.pal.uni-erlangen.de/de/mitarbeiter/wiss-mitarbeiter/link/tuerkei-lykien.html](http://www.pal.uni-erlangen.de/de/mitarbeiter/wiss-mitarbeiter/link/tuerkei-lykien.html)
- [15] [www.geologie.uni-stuttgart.de/online\\_kurse/Kontinuum/08kl\\_01.htm](http://www.geologie.uni-stuttgart.de/online_kurse/Kontinuum/08kl_01.htm)
- [16] [sol.physik.tu-berlin.de/htm\\_group/research/cl\\_basics.html](http://sol.physik.tu-berlin.de/htm_group/research/cl_basics.html)