

# Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V.

29. Jg. 2024, Heft 2

ISSN 1433-3910

---

## Inhalt

Zur 79. Ausgabe der „Mitteilungen“ .....	3
Goethe und die Farben [Schlussartikel] <i>Wilhelm Ostwald</i> .....	4
Siegfried Rösch (1899-1984) – Ein farbwissenschaftlicher Bogenschlag zu Goethe <i>Eckhard Bendin</i> .....	8
Anspruchsvolle mathematische und naturwissenschaftliche Sachverhalte mit Farben aufbereitet – ein Einblick <i>Wolfgang Oehme</i> .....	27
Metal-organic frameworks by vapor deposition processes <i>Alexander John Cruz</i> .....	50
Die amerikanisch-englische Studentenvereinigung Leipzig von 1890 bis 1909 und Chemiestudenten als Mitglieder in den Jahren 1903-1905 <i>Lothar Beyer</i> .....	63
Gesellschaftsnachrichten .....	78
Weihnachts- und Neujahrswünsche .....	79
Autorenhinweise .....	80

---

© Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V. 2024, 29. Jg.

Herausgeber der „Mitteilungen“ ist der Vorstand der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V., verantwortlich:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Schmelzer/Ulrike Köckritz

Grimmaer Str. 25, 04668 Grimma, OT Großbothen

Postanschrift: Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V., Linnéstr. 2, 04103 Leipzig

Tel. 0341-39293714

IBAN: DE49 8606 5483 0308 0005 67; BIC: GENODEF1GMR

E-Mail-Adresse: [info@wilhelm-ostwald.de](mailto:info@wilhelm-ostwald.de)

Internet-Adresse: [www.wilhelm-ostwald.de](http://www.wilhelm-ostwald.de)

Der Nachdruck ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet.

Namentlich gezeichnete Beiträge stimmen nicht in jedem Fall mit dem Standpunkt der Redaktion überein, sie werden von den Autoren selbst verantwortet.

Wir erbitten die Autorenhinweise auf der letzten Seite zu beachten.

Der Einzelpreis pro Heft beträgt 6,- €. Dieser Beitrag trägt den Charakter einer Spende und enthält keine Mehrwertsteuer.

Für die Mitglieder der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft ist das Heft kostenfrei.

## Zur 79. Ausgabe der „Mitteilungen“

Liebe Leserinnen und Leser der „Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V.“,

in diesem Heft veröffentlichen wir einen weiteren Beitrag von W. Ostwald „Goethe und die Farben [Schlußartikel]“ von 1925. Hierin bedauert Ostwald, dass durch den frühen Tod Runges die Harmonie der Farben nicht weiterentwickelt wurde. Ein ganzes Jahrhundert später ist es erst gelungen, Maß und Zahl für Farben einzuführen, was wegen der „dreifaltigen Größenklasse“ nur im Raum möglich ist. Damit kann endlich eine Harmonielehre der Farben geschaffen werden.

Eckhard Bendin hebt in seiner Arbeit „Siegfried Rösch (1899-1984) - Ein farb-wissenschaftlicher Bogenschlag zu Goethe“ natürlich die Verdienste Röschs bei der Entwicklung der wissenschaftlichen Farbenlehre hervor, aber er verweist auch auf die intensive Beschäftigung mit der Kristallographie, Kristalloptik, Edelstein-kunde, meteorologischen Optik, Farbenphotographie, im Bibliotheks- u. Archiv-wesen, in der Astronomie, Zahlentheorie und der Genealogie.

Mit dem Beitrag „Anspruchsvolle mathematische und naturwissenschaftliche Sachverhalte mit Farben aufbereitet – ein Einblick“ vermittelt Wolfgang Oehme, wie Farben genutzt werden können, um anspruchsvolle mathematisch-naturwissenschaftliche Zusammenhänge zu veranschaulichen. Einleitend werden Farben dazu verwendet, die Einzugsgebiete eines Magnetpendels, einem typischen Beispiel der nichtlinearen Dynamik, zu entwickeln. Die „Mandelbrotmenge“ er-weitert diese Gedanken auf die komplexe Gauß'sche Zahlenebene. Bei der Darstel-lung komplexer Funktionen werden diese grundlegenden Ideen aufgegriffen und auf die Einfärbung der komplexen Ebene für Phasenporträts erweitert. In Anhän-gen wird sowohl der Wechsel vom RGB-Farbraum zu den verwandten HSV- und HSL-Farbsystemen detailliert dargestellt, bzw. die Kenntnisse über komplexe Zahlen aufgefrischt.

Der Wilhelm-Ostwald-Nachwuchspreisträger Alexander John Cruz (s. auch Heft 78) gibt hier unter dem Titel „Metallo-organic frameworks by vapor deposition process“ eine Zusammenfassung seines Vortrages vom März 2024 anlässlich der Preisverleihung. Er stellt anschaulich die von ihm entwickelten Methoden für Dünnschichtbeschichtungen mit metallorganischen Gerüstverbindungen vor, die eine aussichtsreiche Grundlage für Anwendungen mikroporöser Materialien in der Na-noelektronik, medizinischen Diagnostik, Energie- und Klimatechnologie darstellt.

In seinem Beitrag „Die amerikanisch-englische Studentenvereinigung Leipzig von 1890-1909 und Chemiestudenten als Mitglieder in den Jahren 1903-1905“ zeigt Lothar Beyer wie groß das Interesse dieser Studenten an einem Studienauf-enthalt in Leipzig gerade in dieser Zeit war. Besonders bemerkenswert ist, wie viele von ihnen bei Wilhelm Ostwald promoviert wurden.

Das Heft beschließen die Gesellschaftsnachrichten mit den Weihnachts- und Neujahrswünschen.

Jürgen Schmelzer

## Goethe und die Farben<sup>1</sup>

Wilhelm Ostwald

Leider fanden diese hoffnungsreichen Anfänge durch Runge's frühen Tod ein schnelles Ende. Die spätere Forschung des neunzehnten Jahrhunderts hat nicht viel im gleichen Sinne zuzufügen vermocht. Sie entwickelt sich wesentlich in physiologischer Richtung und Goethes Hauptproblem, die Harmonie der Farben, blieb unberührt. Goethe hatte sich nicht nur mit der Wissenschaft seiner Zeit, sondern auch mit der der folgenden Zeiten in Widerspruch gesetzt. So mußte er, der mit Recht von der Notwendigkeit der Wissenschaft für die Lösung dieser künstlerischen Aufgabe überzeugt war und der das deutliche Bewußtsein hatte, in dieser Beziehung klarer und weiter zu sehen als die berufenen Vertreter des zeitgenössischen Wissens, sich doch darauf beschränken, nur die allgemeine Richtung zu weisen ohne den besonderen Weg aufzeigen zu können, der zur Erreichung seines Zieles führt.

Ein ganzes Jahrhundert war nach dem Erscheinen von Goethes Hauptschrift vergangen und die Wissenschaft war ihm die Lösung seiner Aufgabe noch immer schuldig geblieben. Doch sind in dieser Zeit, welche an Reichtum und Bedeutung der wissenschaftlichen Fortschritte mehr geleistet hat, als alle früheren Zeiten, allmählich die Bausteine hergerichtet worden, aus denen ein haltbares Gebäude aufzuführen möglich war. Es bedurfte nur eines Kopfes, in welchem sich diese verschiedenartigen Elemente einmal zu einem Ganzen zusammenfinden konnten. Diese Elemente waren von mathematischer und psychologischer, von physikalischer, physiologischer, chemischer, technischer und auch ein wenig von künstlerischer Natur. Kein Wunder daher, daß in unserer Zeit der Spezialisierung sich nicht gleich eine Schädeldecke finden wollte, unter der so verschiedenartige Bestandteile alle einigermaßen heimisch waren. Aber nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung mußte auch dieser Fall einmal eintreten, und als die Voraussetzung erfüllt war, gelang die Synthese der neuen Farbenlehre mit einer beinahe automatischen Notwendigkeit.

Das Los fiel diesmal auf die andere Seite. Es konnte nicht mehr der Künstler sein, der in vorgreifender Einsicht des notwendigen Entwicklungsganges die Wissenschaft zu Hilfe gerufen hatte, sondern es mußte der Wissenschaftler sein, den freilich die nüchterne Denkarbeit das lebendige Fühlen für die Kunst nicht unterdrückt haben durfte. Denn der Anteil der Wissenschaft an dieser Synthese ist zu groß, als daß er von einem beigebracht werden könnte, der sie nicht im Hauptberuf kennen und anwenden gelernt hätte. So ist es ganz erklärlich, wenn auch nicht entschuldbar, daß nunmehr die Künstler sich in großer Mehrzahl ebenso energisch gegen die Farbenlehre des Wissenschaftlers aussprachen, wie vor einem Jahrhundert die Wissenschaftler gegen die Farbenlehre des Künstlers. Und auch insofern

---

<sup>1</sup> Abschrift von: OSTWALD, W.: Goethe und die Farben [Schlußartikel]. Neue Freie Presse 62 (1925), 21663 vom 04.01., S. 5.

findet eine vollständige Symmetrie statt, als damals die Wissenschaftler mit ihrer Waffe kämpften, nämlich mit Gründen, während gegenwärtig die Künstler und ihre entfernten Vettern, die Kunstschreiber, ihr eigenes Rüstzeug zur Anwendung bringen, nämlich das Gefühl, und auf die Anwendung der gegnerischen Waffe ganz verzichten.

Doch dies sind zeitliche Erscheinungen, die zum Verschwinden bestimmt sind, falls die wissenschaftliche Grundlage gesund ist. Und hierfür spricht der Umstand, daß nun endlich die Welt der Farben der Allgewalt von Ordnung und Maß unterworfen worden ist. Die Ordnung der Farben wurde von Goethe angebahnt, von den deutschen Forschern Mayer und Lambert entwickelt und von Runge so weit vollendet, als es ohne Anwendung des Maßes möglich war. Der letzte und entscheidende Schritt, die Durchführung von Maß und Zahl, ist aber unserer Zeit vorbehalten geblieben. Ebenso wie man jede Länge, jedes Gewicht, jede Temperatur, jede Tonhöhe messen und durch ihre Maßzahl für immer kennzeichnen kann, kann man jetzt die Farbe messen und so mit einer Kennzahl bezeichnen, daß sie mit keiner anderen verwechselt werden kann. Nur besteht der Unterschied, daß Längen, Gewichte, Temperaturen, Tonhöhen je durch eine einzelne Zahl gekennzeichnet werden. Zur Kennzeichnung einer Farbe gehören aber drei unabhängige Zahlen. Die Farben gehören also einer besonderen Größenklasse an, der dreifaltigen oder der dreidimensionalen, deren Gesetze viel verwickelter sind, als die der einfältigen gewöhnlichen Größen. Auch der Raum ist dreifaltig. Deshalb kann man die Gesamtheit aller Farben nicht auf einer Linie abbilden, wie die Gewichte oder Tonhöhen, sondern bedarf dazu eines Raumes, wie die Farbkugel von Runge. Dies ist auch die Ursache, weshalb es so lange gedauert hat, bis man die Farben messen lernte, denn eine Farbe hat nicht eine Maßzahl, sondern deren drei, die gleichzeitig bestimmt werden müssen, um eine Farbe zu messen.

Man kann nun grundsätzlich verstehen, daß auf diesem Wege das Goethesche Problem endlich lösbar und eine Harmonielehre der Farbe endlich möglich geworden ist. Auf der Grundlage der Maßzahlen der Farben läßt sich ebenso eine Farbenharmonik aufbauen, wie eine Tonharmonik auf Grund der Maßzahlen der Töne, der Schwingungszahlen möglich gewesen war. Die wissenschaftliche Grundlegung der Tonkunst geschah durch Pythagoras schon zu einer Zeit, wo nur eben der Begriff der Wissenschaft zu gestalten begann. Die wissenschaftliche Grundlegung der Farbkunst gelang hingegen erst in jüngster Zeit, und der Aufbau der entsprechenden Farbharmoneilehre, jener von Goethe so bestimmt geforderte „Generalmaß“ der Farbkunst, ist soeben erst begonnen worden.

Hieraus ergibt sich ein einzigartiges Verhältnis unserer Zeit zur Farbkunst und allgemein zur Lichtkunst. Beide gehören ihrer Entwicklung nach wesentlich der Zukunft an. Was es bisher davon gibt, ist vergleichbar dem Gehalt der Tonkunst vor Pythagoras. Dieser hat bekanntlich das Grundgesetz der Tonkunst entdeckt, daß nämlich solche Töne, und nur solche harmonisch sind, deren Schwingungszahlen in einfachen Verhältnissen stehen. Schon vor Pythagoras gab es eine Tonkunst und die Sage von Orpheus bezeugt, wie starke Wirkungen sie zu erzielen vermochte. Aber erst nach Entdeckung jenes Grundgesetzes konnte die methodi-

sche Entwicklung eintreten, welche schrittweise die Tonkunst zu ihrer gegenwärtigen erstaunlichen Höhe geführt hat. Ebenso besitzen wir heute schon einen Schatz wertvoller Werke der Farbkunst. Ihre stetige Entwicklung kann aber erst jetzt beginnen, nachdem das Grundgesetz der Farbkunst entdeckt worden ist, daß nämlich solche, und nur solche Farben harmonisch zueinander sind, deren Kennzahlen in einfachen Verhältnissen stehen.

Wohin diese Entwicklung führen wird, läßt sich heute kaum andeutend ahnen, denn wer wollte die Werke eines künftigen Genius vorausschen. Nur so viel dürfen wir mit vollem Vertrauen sagen: daß sie alles übertreffen werden, was unsere kühnste Farbenphantasie sich träumen läßt.

Wohl aber kann eine andere Frage ahnend und hoffnungsvoll beantwortet werden, die uns heute besonders am Herzen liegt. Nämlich die Frage, welchem Volke voraussichtlich in der bevorstehenden Entwicklung die Palme zufallen wird. Wir denken daran, daß seit Newtons Zerlegung des weißen Lichtes in die Farben des Spektrums der Hauptteil der Fortschritte in der wissenschaftlichen Farbenlehre durch deutsche Forscher bewirkt worden ist. Deutsche waren Mayer, Lambert und Runge, welche die Ordnung aller Farben endgültig aufgestellt haben. Deutsche waren Großmann, Helmholtz, Fechner, Schulze und Hering, denen wir die wesentlichsten Fortschritte seitdem verdanken. In Deutschland war es endlich, wo unter dem Getöse des Weltkrieges und unter dem Drucke des ungerechten „Friedens“, den die Weltgeschichte kennt, der letzte wesentliche Schritt vollzogen wurde, nämlich die Einführung von Maß und Zahl und die Aufstellung der Harmoniesetze.

Aber, wird man vielleicht sagen, das betrifft nur die wissenschaftliche Seite der Farbenlehre; die künstlerische Entwicklung der Möglichkeiten steht aber auf einem ganz anderen Blatt. In natürlicher Begabung für die harmonische Anwendung der Farbe aber sind uns unleugbar die Franzosen überlegen, auch wenn man die besonders günstigen Verhältnisse in Rechnung setzt, unter denen sich ihr Farbengeschmack hat ausbilden können.

Hier können wir wieder einmal den Vergleich mit der Tonkunst heranziehen. In natürlicher Begabung für die Musik sind uns gleichfalls andere Völker überlegen, vor allen die Italiener. Aber im internationalen Wettbewerb um die höchsten Leistungen in der Tonkunst siegen die Deutschen leicht und sicher in großem Abstände. Und zwar nicht nur gestern und heute, sondern seit anderthalb Jahrhunderten. Nämlich so lange, als die wissenschaftliche Vertiefung der Tonkunst in Harmonie-, Satz- und Formenlehre dauert. Hat die Kunst diese Stufe erreicht, so genügt nicht mehr die natürliche Begabung, um höchste Leistungen zu ermöglichen; dazu ist vielmehr die freie Beherrschung des ganzen wissenschaftlichen Rüstzeuges erforderlich. Und diesen Vorzug kann uns kein nationaler Neid bestreiten und nehmen, daß wir für wissenschaftliche Betätigung besser organisiert sind als andere Völker.

Nun vollzieht sich soeben die Verwissenschaftlichung der Farbenlehre und damit die der Farbkunst. Hierdurch gelangt auch dieses Gebiet auf jene Entwicklungsstufe, auf welcher es uns Deutschen am handgerechtesten liegt. In tiefer Be-

wunderung beugen wir uns vor der alldurchdringenden Einsicht Goethes, der vor einem Jahrhundert diesen Weg als den einzigen erkannt hatte, der ihn und uns zum Ziele führen konnte und kann, und ehfurchtsvoll übernehmen wir die Arbeit aus seiner Hand, um sie auf Grund der inzwischen geleisteten Forschung eines ganzen Jahrhunderts zum Ziele zu führen.

## Siegfried Rösch (1899-1984) - Ein farbwissenschaftlicher Bogenschlag zu Goethe

Eckhard Bendin



Abb. 1. GOETHE und RÖSCH, symbolisch verbunden mit der ‚Augenvignette‘ v. GOETHE 1781 (Montage E. B.).

Es mag nur Zufall sein, dass sich in diesem Jahr der 125. Geburtstag von Siegfried RÖSCH (1899-1984), Nestor der wissenschaftlichen Farbenlehre in Deutschland, und der 275. Geburtstag des Begründers der lebensweltlichen Farbenlehre Johann Wolfgang v. GOETHE (1749-1832) nur um wenige Tage entfernt berühren. Zwischen beiden Exponenten liegen 150 Jahre, in denen sich aus einem umfassend angelegten Wissenschaftsentwurf eine eher spezifisch sich differenzierende Farbwissenschaft herausbilden konnte. Und doch erscheint dieser Zufall willkommen, exemplarisch einen farbwissenschaftlichen Bogenschlag zwischen den Exponenten zu wagen, der neben manch namhaftem Wegbegleiter RÖSCHS auch Wilhelm OSTWALD (1853-1932), den Schöpfer der ersten quantitativen Ordnung der Körperfarben einschließen soll. Es gibt nur wenige Beispiele, die uns so erfreulich vor Augen führen, dass mit historischem Fortschreiten und differenziertem Verzweigen unserer Erfahrungen und Erkenntnisse nicht zwangsläufig perspektivische Einengungen einhergehen müssen.

### Historisches und grenzüberschreitendes Bewusstsein

RÖSCH und GOETHE verbanden offensichtlich das Anliegen, scheinbar Unvereinbares organisch zu verbinden. Bei GOETHE entsprach dies einer phänomenologischen Ausrichtung auf die Lebenswirklichkeit und seinem Ideal von ‚Wissenschaft als Kunst‘, wobei keine der menschlichen Kräfte ausgeschlossen werden sollten, wie er in der ersten Abteilung seiner ‚Materialien zur Farbenlehre‘ forderte: „Da im Wissen sowohl als in der Reflexion kein Ganzes zusammengebracht werden kann, weil jenem das Innere, diesem das Äußere fehlt, so müssen wir uns die Wissenschaft notwendig als Kunst denken, wenn wir von ihr irgendeine Art von Ganzheit erwarten...“

Neben der Vielseitigkeit und Aktivität RÖSCHs auf unterschiedlichsten Gebieten ist in der Tat jene Gerichtetheit beeindruckend. Sie umfasst intensive theoretische und praktische Auseinandersetzungen in der Kristallographie, Kristalloptik, Edelsteinkunde, meteorologischen Optik, Farbenphotographie, im Bibliotheks- u. Archivwesen, in der Astronomie, Zahlentheorie, der Genealogie und nicht zuletzt auf dem weiten Feld der Farbenlehre. Zahlentheorie und Farbenlehre verführten RÖSCH zudem auch zu Ausflügen in die Kunsttheorie und Ästhetik bzw. in das Reich der Philatelie.

Dabei wurden dem Mineralogen die grenzüberschreitenden Exkursionen in benachbarte Wissensfelder zunehmend zum befruchtenden, blickweitenden Korrelat und vermochten die Erkenntnis zu fördern, dass aus dem Verständnis und der wechselseitigen Bedingtheit unseres Wissens neue schöpferische Potenzen hervorgehen und gegenseitige Achtung erwächst. So hob Manfred RICHTER (1906-1990), der etwas jüngere Weggefährte auf dem Feld der Farbwissenschaft, den man gleichermaßen als Exponenten der Farbmétrie in Deutschland bezeichnen darf, in seinem Nachruf hervor, dass Siegfried RÖSCH im Streit der Meinungen stets um Ausgleich bemüht war. Es sei nicht zuletzt auch das Verdienst RÖSCHs, dass sich auf dem Gebiet der Farbenlehre - seit GOETHES Zeiten ein streitbares Feld - immer größere Friedfertigkeit ausbreiten konnte. RÖSCH, der nach eigenen Angaben mehrfach das außerordentliche Glück erleben durfte, in geistiges Neuland vorzustoßen, baute zahlreiche Brücken zwischen Natur- und Geisteswissenschaften und sah wissenschaftliche Arbeit stets auch eingebettet in die Folge der Bemühungen von Generationen. Dies äußerte sich nicht nur in seiner Verehrung eines GALILEI, KEPLER, NEWTON oder GOETHE, sondern auch in der Wertschätzung seiner wichtigsten Lehrer, Prof. Victor GOLDSCHMIDT (1853-1933) in Heidelberg, Prof. Friedrich RINNE (1863-1933) in Leipzig und Prof. Max BEREK (1886-1949) in Wetzlar, denen er jeweils biographische Veröffentlichungen widmete. Mit seinem Aufsatz „Farben in der Kunst“ (1980) setzte er noch im hohen Alter insbesondere Victor GOLDSCHMIDT ein Denkmal, dessen Analogiebetrachtungen und Komplikationstheorie ihn nachhaltig beeinflusst und angeregt hatten.

### **Spiel und Feuer des Lichts, Brillanzproblem, Reflexphotographie und Regenbogen, Farbenlehre für Mineralogen - Grundstein einer Bibliographie zur Farbenlehre**

Für RÖSCH war die Beschäftigung mit dem Licht ein zentrales Thema. Analog zu GOETHES freudiger Beobachtung „Am farbigen Abglanz haben wir das Leben“ (Faust II) faszinierte ihn das Licht der Sonne als Anlass für leuchtende Farben, insbesondere das farbige Spiel und Feuer edler Mineralien. Das Interesse am Zusammenhang von Licht und Stoff, insbesondere von Mineralien und Farberscheinungen manifestiert sich in seiner „als programmatische Einleitung zu einem klar geplanten Lebenswerk gedachten Habilitationsschrift „Darstellung der Farbenlehre für Zwecke der Mineralogen“ (Leipzig 1929, s. Abb. 2). Die öffentliche Probevorlesung als Privatdozent widmete er dem Brillanzproblem; dem lagen Messungen u.a. auch des berühmten Dresdner „Grünen Diamanten“ zugrunde. 1926 bereits

beschrieb RÖSCH die von ihm errechneten idealen Proportionen eines Diamant-Brillanten, dessen Schliff man seither auch als „Rösch-Brillant“ bezeichnet.

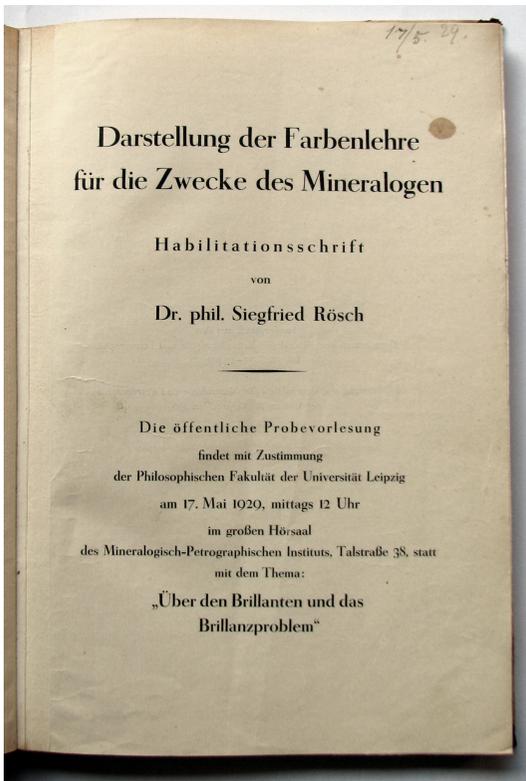


Abb. 2.  
Titelblatt der Habilitationsschrift.  
Leipzig, 1929.

Die über die ‚Zwecke der Mineralogie‘ weit hinausweisende Habilitation bezeugt durch die Aufführung von über 900 relevanten Literaturquellen auch die ausgeprägte wissenschaftshistorische Orientierung des Verfassers. RÖSCH knüpft damit gewissermaßen auch an GOETHE'S Farbenlehre an und legte den Grundstein zu einer umfassenden Bibliographie zur Farbenlehre (s. Abb. 3), die erst später durch Manfred RICHTER aufgegriffen und realisiert werden sollte.

Gebürtig in Ludwigshafen a. R. hatte Siegfried RÖSCH zunächst in Heidelberg und München studiert, bevor er in Leipzig bei Prof. RINNE am Mineralogischen Institut das Studium fortsetzte und 1926 seine Dissertation „Über Reflexphotographie“ vorlegte (s. Abb. 4, S. 12), einer neuen Methode zur Auswertung von Reflexbildern. Schon hier zeigte sich ein besonderes Interesse am Spiel des Lichtes, was u.a. auch zur reflektographischen Untersuchung künstlicher Regenbogen und der Beschäftigung mit der Theorie der Edelsteinbrillanz führte. Der Regenbogen sollte zum Ausgangspunkt der Farbforschungen RÖSCH'S werden (s. Abb. 5, S. 12). Jener Bogen wurde ihm „...wissenschaftliche Brücke zur Farbe ...und auch geisti-

ge Brücke zu Goethe“. 1927 veröffentlicht RÖSCH gemeinsam mit seinem Leipziger Lehrer RINNE die Arbeit „Über den Polarisationszustand des Regenbogens“. Von einer fortgesetzten Beschäftigung mit dem Phänomen des Regenbogens werden später noch drei Veröffentlichungen zeugen: ‚Der Regenbogen in Wissenschaft und Kunst‘ (1958), ‚Der Regenbogen in der Malerei‘ (1960) und ‚Physik des Regenbogens‘ (1977).

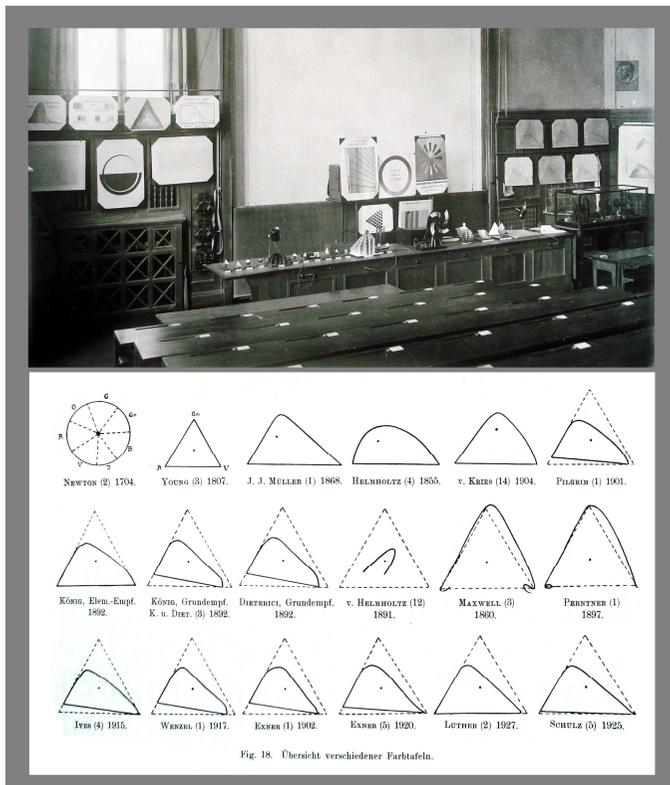


Abb. 3. Hörsaal im Mineralogischen Institut der Universität Leipzig zu RÖSCHS Probevorlesung 1929, darunter: Übersicht verschiedener Farbtafeln (Fig.18 der Habilitationsschrift).

### Optimal-Kolorimeter, Relativhelligkeit, Rösch-Maßzahlen, Rösch-Farbenkörper

Die Zeit am Mineralogischen Institut in Leipzig war Mitte der 20er Jahre zunächst vom Bemühen erfüllt, Material zur exakten Mineral-Farbestimmung zu sammeln und bessere Möglichkeiten zur Farbmessung zu schaffen. RÖSCH entwarf in dieser Zeit das ‚Optimal-Kolorimeter‘ (s. Abb. 6, S. 13), sein erstes eigenes Farbmessgerät unter Verwendung der sogen. ‚Optimalfarben‘ und stand dazu in enger Fühlung vor allem in Dresden mit Robert LUTHER (1868-1945), in Jena mit Carl PULFRICH (1858-1927) und in Berlin mit Erwin SCHRÖDINGER (1887-1961).

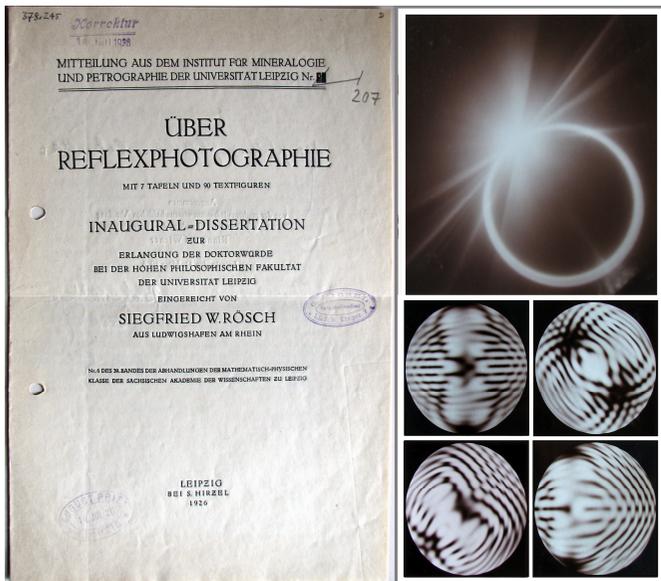
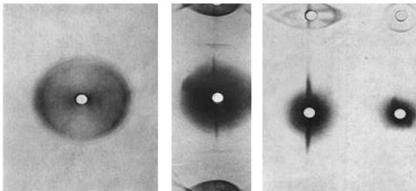


Abb. 4.  
Titelblatt der Dis-  
sertationsschrift,  
Leipzig 1926 und  
Reflexfotografie-  
Beispiele.

Experimente zum künstlichen Regenbogen  
In: Rösch, S., Über Reflexphotographie. S.36ff, 1926:



In: 'Applied Optics' Vol 7, Nr.2, 1958:

Der Regenbogen in Wissenschaft und Kunst

S. Rösch

In: 'Studium Generale' 13. Jahrg. H. 7, 1960:

Der Regenbogen in der Malerei

Von  
S. RÖSCH

Abb. 5.  
Zu RÖSCHS Arbeiten über Reflexfotografie und den Regenbogen.

1926 lernte RÖSCH auch Wilhelm OSTWALD (1853-1932) auf dessen Landsitz „Energie“ in Großbothen/b. Lpz. kennen. Dass sich in jener Begegnung verschiedene Auffassungen zu Spektralfarben offenbarten, erwähnt RÖSCH später einmal in einer Fußnote, auch dass OSTWALD ihn 1928 bei einer Feier zum Geburtstag von Prof. RINNE vor Publikum begrüßt habe: “Nun, Sie haben ja das Pferd geradezu von hinten aufgezümt! [18].

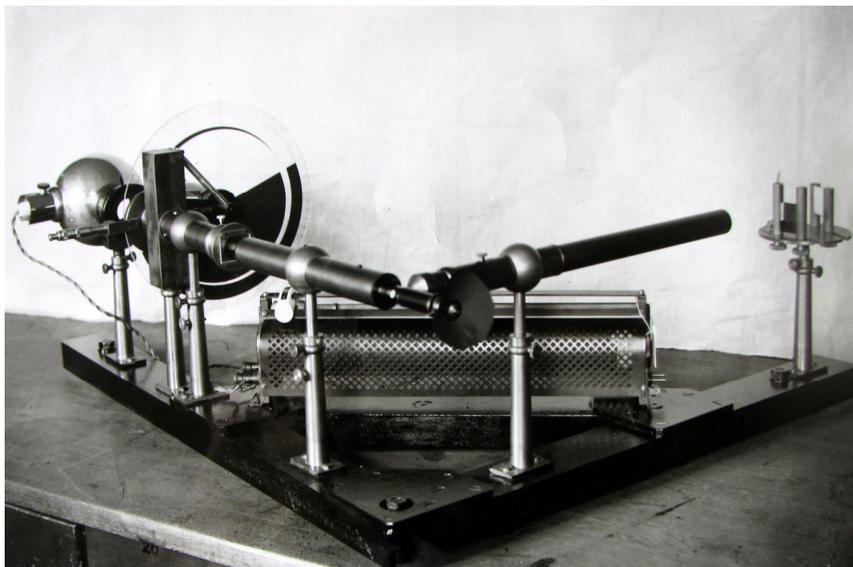


Abb. 6. RÖSCHS ‚Optimal-Kolorimeter‘, Leipzig um 1929.

Im RÖSCH-Nachlass befinden sich auch einige seltene Farbaufträge aus der OSTWALD'schen ‚Flüssig-Organ‘, die RÖSCH 1930 von OSTWALDS Mitarbeiter Manfred ADAM (1901-1987) erhalten hatte (s. Abb. 7, S. 14).

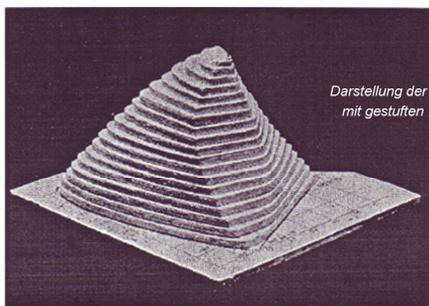
Zur Aufbereitung des verfügbaren Farbwissens gehörte auch, dass RÖSCH den gerade erschienenen ‚Munsell-Color-Tree‘ nachbaute, wovon ebenfalls noch Teile erhalten sind.

Ein Dresden-Aufenthalt Ende Mai 1927 bescherte Siegfried RÖSCH auch die erste Begegnung mit Manfred RICHTER, der damals als Assistent von August KLUGHARDT (1887-1970) an der Deutschen Werkstelle für Farbkunde in Dresden ebenfalls an einer verlässlichen Methode zur Farbmessung arbeitete. Am selbigen Tag trat Siegfried RÖSCH in Dresden-Loschwitz, dem Heimatort seiner Frau Amalie, geb. v. STÜRENBURG, auch in den Stand der Ehe ein. Das weit vom „Blauen Wunder“ gelegene Elternhaus seiner Ehefrau wird später im Zusammenhang mit RÖSCHS besonderer Hinwendung zu Sonnenuhren noch Erwähnung finden.

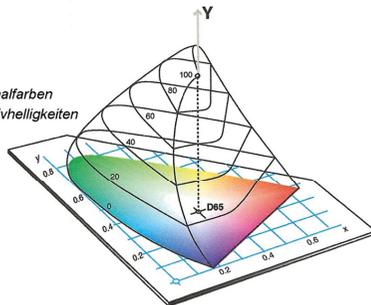
In engem fachlichem Austausch mit LUTHER, KLUGHARDT und RICHTER leistete RÖSCH bei der Entwicklung seines Optimal-Kolorimeters eigene Beiträge zu der noch jungen Wissenschaft der Farbmetrik. Aus LUTHERS Theorie der ‚Optimal-farben‘ leitete er den ‚Rösch-Farbenkörper‘ ab (s. Abb. 8, S. 14), ebenso aus seinem Messverfahren den Begriff der ‚Relativhelligkeit‘ wie drei Maßzahlen, die später als ‚Rösch-Maßzahlen‘ bezeichnet wurden.



Abb. 7.  
 Musterblatt mit Farbaufträgen aus OSTWALDS 'Flüssig-Organ', für S. R. gefertigt von Manfred ADAM, 1930 (NL RÖSCH, Univ.-Bibliothek Gießen).



Farbkörper x-y-A nach Siegfried Rösch 1928 (aus: Richter, M.: Grundriss d. Farbenlehre d. Gegenwart. 2.Aufl.)



CIE-Normvalenzkörper 1931 (nach Rösch 1928)

Abb. 8. Der Optimal-Farbkörper von S. RÖSCH (1928) als Grundlage des CIE-Normvalenzkörper von 1931 (Montage E. B.).

## Polarisations-Interferenzfarben, Polarisations-Farbmessgerät

Vor und nach seiner Habilitation 1929 in Leipzig zeigten sich bei RÖSCH nicht nur hinsichtlich des Regenbogens enge Verbindungen zu GOETHE'S Beschäftigungen mit farbigen Phänomenen. Bekanntlich wandte sich GOETHE in seinen letzten Lebensjahren verstärkt den ‚entoptischen Farben‘ und damit Polarisationserscheinungen zu (s. Abb. 9, 10). Mit Hilfe des Physikers Thomas Johann SEEBECK (1770-1831), der 1818 auch die optische Aktivität (Drehung der Polarisations Ebene) von Zuckerlösungen entdeckt hatte, führte GOETHE Experimente an Kalkspat und Glimmerplättchen durch.

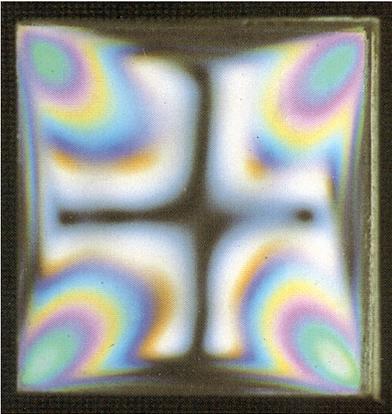
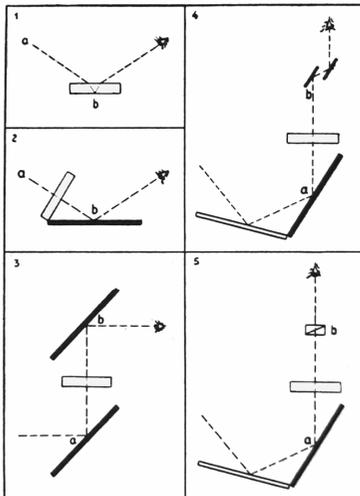


Abb. 9.

Beispiel ‚entoptischer Farben‘ nach Versuchen GOETHE'S mit Th. J. SEEBECK.



Schemata der 5 Typen der in Goethes Besitz befindlichen Polarisationsapparate (nach Matthaei 1941 u. Rösch 1961)

Goethes "Vierter Apparat" von Schweiger, 1818 (nach Matthaei 1941/ Rösch 1961)

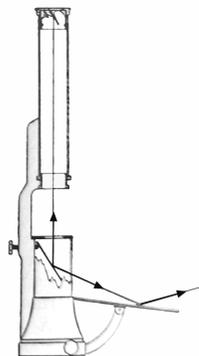


Abb. 10.

Schemata zu GOETHE'S Polarisationsapparaten nach MATTHAEI 1941 u. RÖSCH 1961.

Für RÖSCH stand bereits in Leipzig neben der farbmetrischen Bearbeitung der Mineral- und Edelsteinfarben zunehmend auch die systematische Erforschung der weiten Vielfalt der Polarisations-Interferenzfarben sowie die Schaffung exakter quantitativer Grundlagen hierzu auf dem Programm. Außer gelegentlichen Vorstößen kam es aber erst Mitte der 50er bis Mitte der 60er Jahre zu einer intensiveren Aufarbeitung mit entsprechenden Veröffentlichungen:

1954 Zur Systematik der Farben, insbesondere der Interferenzfarben.

1955 Interferenzfarben als Vergleichsnormalien bei der Farbmessung.

1958 Gießen und die Polarisation des Lichtes.

1959 Über die Farben sehr dünner Plättchen.

1961 Zur Frühgeschichte der Polarisationsapparate (u.a. GOETHES Apparate)

1962 Über Interferenzfarben im polarisierten Licht an Substanzen mit Dispersion der Doppelbrechung.

1965 Geschichte der Polarisationsapparate in Hessen.

Bereits 1933 war RÖSCH dem Ruf von Prof. BEREK an die optischen Werke E. LEITZ in Wetzlar zur Mitarbeit an kristalloptischen Problemen gefolgt und hatte dort maßgeblich Anteil an der Geräteentwicklung. Auf der Grundlage des Vergleichs mit Polarisationsinterferenzfarben entwickelte RÖSCH u. a. das Quarzfarbmessgerät „Leipo“ (s. Abb. 11) sowie ein Gerät zur Herstellung beliebiger Farben mittels Polarisation (1949).

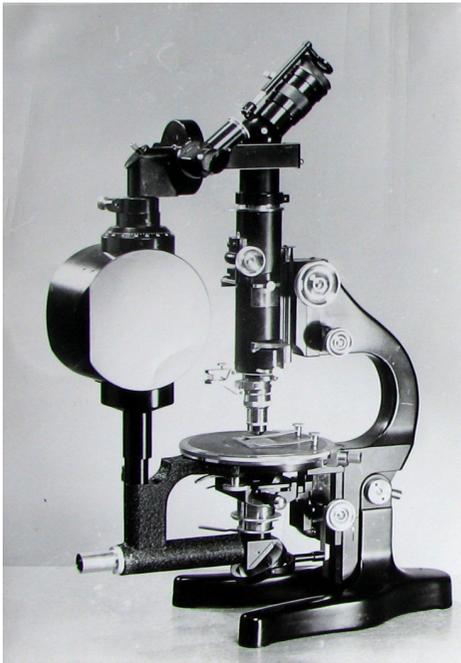


Abb. 11.  
Das Quarzfarbmessgerät ‚Leipo‘ von S. RÖSCH, 2. Modell, Gießen 1951.

Inzwischen war auch eine Umhabilitierung des Privatdozenten an die Universität Gießen erfolgt, wo er ab 1942 schließlich als a. o. Professor für Mineralogie bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1964 gewirkt hat. Es entsprach der Natur RÖSCHS, dabei den wissenschaftlichen Austausch mit benachbarten Disziplinen zu pflegen. Beispielsweise widmete er die oben aufgeführte Systematik der Interferenzfarben in einer Festschrift dem Giessener Zoologen W. J. SCHMIDT unter Berufung auf die engsten Beziehungen zwischen Zoologie und Mineralogie. RÖSCH verweist darin auf die zoologische Optik, die morphologische Symmetriellehre, das Grenzgebiet großer Molekülkristalle und kleinster Lebewesen, auch auf die Farberscheinungen an Vogelfedern und Schmetterlingsschuppen.

### **Wissenschaftlicher Austausch, Expertisen, Förderung und Anerkennung**

Wie dieses Beispiel zeigt, erschöpfte sich die Arbeit RÖSCHS nicht nur in hoher Konzentration auf eigene Studien, sondern war ebenso geprägt durch fachlichen Austausch. Er korrespondierte mit vielen Fachkollegen, die sich für Farbenfragen interessierten und so war es fast selbstverständlich, dass er 1941 zur Mitbegründung des „Deutschen-Farben-Ausschusses“ aufgerufen wurde. Er brachte in dieses interdisziplinäre Gremium, das nach Kriegsende im ‚Fachnormenausschuss Farbe‘ des Deutschen Normenausschusses aufging, seine hohe Fachkompetenz ein, z.B. bei der Farbmetrik-Norm DIN 5033 und der DIN-Farbenkarte DIN 6164. RÖSCHS besonderes Interesse auch an Systematik und Dokumentationstechnik beförderte zudem den nachhaltigen Ausbau der Dezimal-Klassifikation 535.6 (Farbenlehre). RÖSCH gehörte 1952 auch zu den Herausgebern der Zeitschrift ‚Die Farbe‘, die er mit vielen Beiträgen bis in die letzte Zeit seines Lebens begleitete. Anlässlich seines 80. Geburtstages erschien in Band 27 (1978/79) auch eine Rösch-Bibliografie zur Farbenlehre, an der er selbst noch auf Bitten des Herausgebers mitgearbeitet hat.

Beispielhaft für den fruchtbaren Austausch mögen auch zahlreiche Expertisen sein, die zu besonderen Artefakten der Farbenlehre erstellt wurden und unter den Experten abgeglichen wurden, z.B. Analysen von Siegfried RÖSCH und Manfred RICHTER zu den originalen ‚Hering-Papieren‘. Es handelte sich dabei um Farbmuster, die der einst in Leipzig wirkende Physiologe Ewald HERING (1834-1918), dem wir die ‚Lehre vom Lichtsinn‘ und die ‚Opponententheorie‘ verdanken, seinen Farbkreisen zugrunde gelegt hatte. Eine derartige Analyse nahm RÖSCH 1958 auch im Austausch mit dem Erlanger Physiologen und bedeutenden Goethe-Forscher Rupprecht MATTHAEI (1897-1976) an GOETHES Farbkreis von 1810 vor, ebenso an MATTHAEIS Rekonstruktion des Kreises von 1932 (s. Abb. 12). RÖSCH war es auch, der einige Jahre später dem Düsseldorfer Goethe-Museum der Stiftung Kippenberg die Übernahme der Privatsammlung von Rupprecht MATTHAEI für eine ständige Ausstellung zu Goethes Farbenlehre in Düsseldorf vermitteln konnte.

Für seine außergewöhnlichen Leistungen wurden Siegfried RÖSCH hohe Ehrungen zuteil. Bereits 1930 verlieh ihm die Photographische Gesellschaft Wien für die Arbeiten zur Reflexphotographie die Silbermedaille. Ihr folgte 1961 der ‚Ordre du

Mérite pour le Recherche et l'Invention' durch die Internationale Vereinigung für die Farbe (AIC).

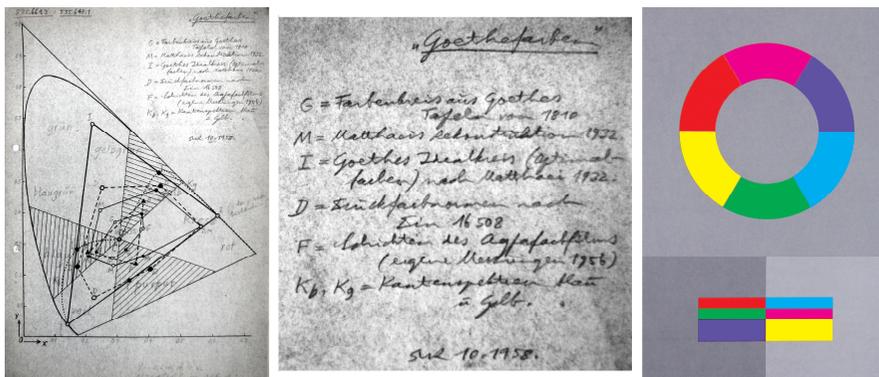


Abb. 12. Zu RÖSCHS Untersuchung der „Goethe-Farben“ im Okt. 1958, rechts: Farbkreis-Rekonstruktion von Rupprecht MATTHAEI 1932, NL RÖSCH, Univ.-Bibliothek Gießen (Montage E. B.).

Aber auch für hohe Verdienste auf anderen Gebieten wurde er geehrt. Für seine grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der Genealogie, die u. a. eng mit der Person GOETHES verbunden waren und auf die näher noch eingegangen wird, wurden ihm 1973 die Johann Heinrich Merck-Medaille der Darmstädter Goethe-Gesellschaft sowie 1979 die Johannes Christoph Gatterer-Medaille der Genealogisch-Heraldischen Gesellschaft in Göttingen verliehen. Schließlich erhielt Siegfried RÖSCH 1983 in der Stadt, in der er über 50 Jahre seines Lebens wirkte, durch die Wetzlarer Goethe-Gesellschaft die Goethe-Gedenkplakette für seine Verdienste um den Aufbau der Goethe-Werther-Bücherei im Stadtarchiv.

### Genealogie als Brücke zwischen Natur- und Geisteswissenschaft

Als besonders fruchtbares Feld für den Ordnungswissenschaftler, Zahlentheoretiker und professionellen Mineralogen sollte sich auch die Genealogie erweisen. Naturgemäß stand am Anfang die Erforschung der eigenen verwandtschaftlichen Wurzeln. Die Ahnenschaft seiner Ehefrau Amalie, geb. v. STÜRENBURG, führt RÖSCH zunächst auf hessische Goethe-Ahnen (ORTH), später entdeckt er auch Goethe-Ahnen bei den eigenen Vorfahren (GRÄTER und EISENMÄNGER). Befördert durch den lokalen Bezug zu Wetzlar stehen für ihn bald die Familie BUFF und GOETHES Verwandtschaft im Mittelpunkt seines genealogischen Interesses. Er entwickelt und erprobt an deren bekannter Ahnenschaft eine neue „Quantitative Genealogie“. Das Ergebnis legte er 1954/56 mit seinem Buch „Goethes Verwandtschaft“ vor, das auf mehr als 500 Seiten über 4000 Seitenverwandten GOETHES verzeichnet und viele graphische Darstellungen enthält.

War zunächst GOETHE ein zentraler Bezugspunkt für RÖSCH, um eine europäische Gemeinschaftsgenealogie einzuleiten, so erschien ihm hierfür später Carolus MAGNUS (CM) als sinnvollster Bezug für seine Verwandtschafts-Mathematik (s. Abb. 13) und er bearbeitete mit Eifer die erste Lieferung der Neuauflage des "Brandenburg 1935".

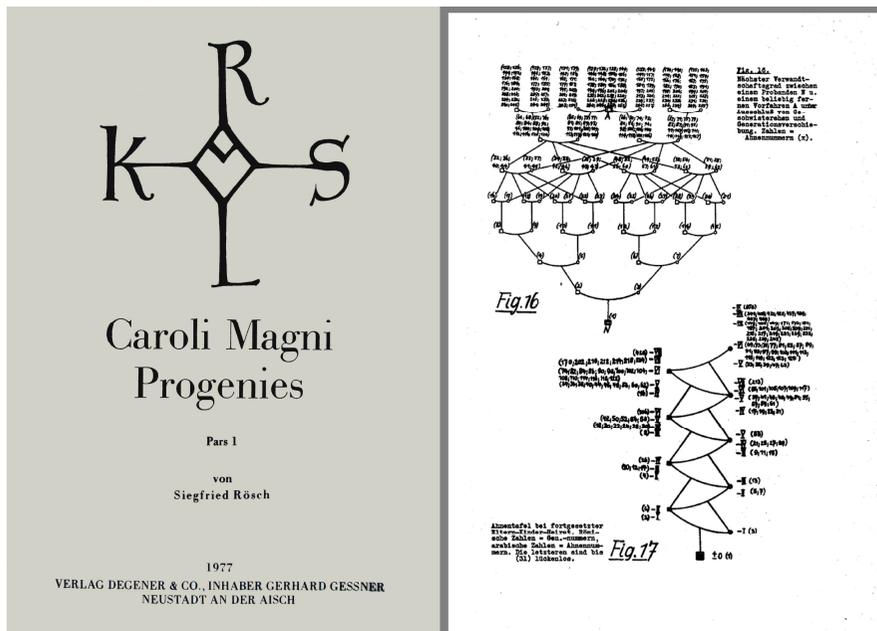


Abb. 13. Zur ‚Quantitativen Genealogie‘ (Titelblatt und Beispieldarstellungen).

Für den Mathematiker und Mineralogen begeisternd war dabei die Ähnlichkeit der graphischen Darstellung der gefundenen CMD-Spektren (Caroli Magni Descendens) mit GAUß'schen Verteilungskurven zu bestimmten Erscheinungen der Optik. Der angesehene Goethe-Genealoge Theodor GÜNTHER würdigte 1970 RÖSCHS Beitrag zur Genealogie auf dem Wege von einer beschreibenden zur exakten Wissenschaft, indem er ihn als „führenden Wegbereiter für eine wissenschaftlich-exakte Gestaltung der modernen Genealogie“ bezeichnet. Theoretisch untermauert und ausgebaut wurde RÖSCHS ‚Quantitative Genealogie‘ durch den Fachmathematiker Hermann ATHEN.

Auf RÖSCH geht auch die Gründung einer familienkundlichen Arbeitsgemeinschaft im Stadtarchiv Wetzlar zurück, die schließlich zur dortigen genealogischen Abteilung führte.

Mitte der 70er Jahre wird RÖSCH im Rahmen seiner Familienforschung ein weiteres Mal zu GOETHE'S Spuren geführt, als er im Nachlass eines Zweiges seiner Familie auf ein Gemälde stößt, das einem bekannten Jugendporträt des 16jährigen

GOETHE auffallend ähnelt. Es hatte sich über Generationen vererbt und soll sich heute im Frankfurter Goethe-Museum befinden.

**Sonnenuhren – Vererbte Freude und späte Leidenschaft**

1964 erhielt RÖSCH als Geburtstagsgeschenk eine Sonnenuhr, die sein schwäbischer Pfarrer-Ahn Nathanael Gottlieb RENZ selbst gefertigt hatte. Eine aufschlussreiche Überraschung, denn es stellt sich bald heraus, dass auch dessen Schwiegersohn, RÖSCHS Urgroßvater, der Pfarrer Johann Georg RÖSCH in seinen Mußestunden gern Uhren gebaut hat. Offensichtlich wurde Siegfried RÖSCH die Freude am Instrumentenbau, an Optik und Chronometrie mit in die Wiege gelegt. So erscheint es auch nicht verwunderlich, dass RÖSCH bereits ein Jahr vor diesem Geburtstagsgeschenk mit Begeisterung das Angebot des Malers Paul MEYER-SPEER (Schüler und Anhänger der Farbenlehre von Wilhelm OSTWALD) annimmt, die Berechnung der astronomischen Daten für eine große Farben-Sonnenuhr in Gravenbruch /b. Frankf./M. zu übernehmen (s. Abb. 14). RÖSCH ist von der beabsichtigten Parallelsetzung der Tages- und Jahreszeiten mit der Folge des Farbtonkreises begeistert: Morgendlich kühles Blaugrün „Seegrün“ (Osten)...leuchtendes „Laubgrün“ (Osten, Morgen, Frühling)...Gelb und Rotgelb (Mittag, Süden, Sommer)...Feuerrot, Weinrot, „Veil“ (Abend, Herbst, Westen)...Tiefblau, „Eisblau“ (Winter, Norden, Nacht).

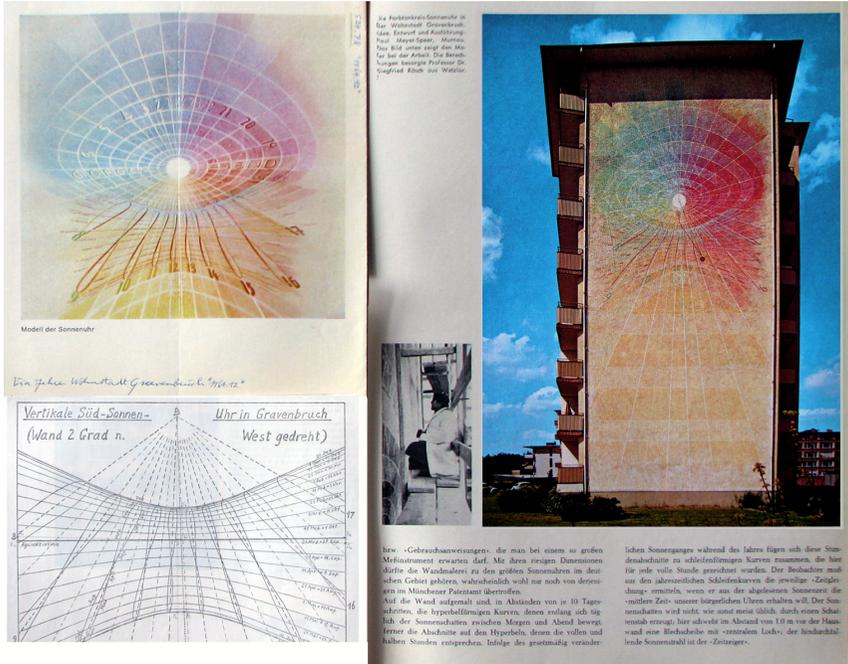


Abb. 14. Zur großen Sonnenuhr von P. MEYER-SPEER u. S. RÖSCH in Gravenbruch 1963/64.

So entsteht 1964 unter Mitwirkung von Siegfried RÖSCH an einem Giebel eines achtgeschossigen Wohnhauses eine der größten gemalten Sonnenuhren in Deutschland. Eine Blechscheibe mit zentralem Loch macht den Sonnenstrahl zum Zeitzeiger (leider musste diese wohl einzigartige Gemeinschaftsarbeit einer verbesserten Wärmedämmung des Gebäudes weichen). Siegfried RÖSCH aber fand derart Gefallen an der chronometrischen Nutzung der Präzision des Sonnenlaufes, dass sie auch Eingang in seine Wohnungen am Philosophenweg in Wetzlar fanden. Er registrierte akribisch und fixierte erfinderisch auf Wänden und Möbeln (bzw. später in der 2. Wohnung auf der Zimmerdecke mittels Spiegelreflexion) die Sonnenstände im Jahreszeitraum. Wer ihn in seinem häuslichen Arbeitszimmer besuchte, konnte sich der Faszination jener Konstruktionen, für die er ebenfalls Lochscheiben als Schattenzeiger nutzte, nicht entziehen. Jürgen ABELER notiert in seinem Uhrmacher-Lexikon von 1977 über RÖSCHs 1. Zimmer-Sonnenuhr, dass die „Hohl-Sonnenuhr“ einzigartig sei und in Fachkreisen Aufsehen erregte. So bleibt es auch nicht aus, dass RÖSCH für mehrere Jahre Vorsitzender des „Fachkreises Sonnenuhren in der Deutschen Gesellschaft für Chronometrie“ wurde und sich mit Beiträgen auch in die historischen Sonnenuhr-Forschung einbrachte. Neben der täglich anwachsenden Herausforderung zu vielseitiger wissenschaftlicher Arbeit fand er auch Zeit, sich um die Erhaltung der ihm vertrauten Sonnenuhr an der alt ehrwürdigen Winzersäule zu kümmern, die seit Generationen den Garten neben dem Elternhaus seiner Ehefrau in Dresden-Loschwitz ziert.

RÖSCH entwarf schließlich auch für den Domplatz in Wetzlar das Projekt einer begehbaren Sonnenuhr. Auf eine sinnvoll gestaltete Pflasterung des Platzes sollte der Doppeladler des Staufferhauses einen zeitmessenden Schatten werfen. Leider kam es nicht zur Realisierung des Vorhabens.

### **Die Farbenordnung Hickethier (FOH) und Röschs ‚Vektorfarbkörper‘**

Einem Freundesdienst RÖSCHs verdanken wir schließlich auch die Bewahrung der Lebensleistung des aus Zwickau/Sa. stammenden Drucktechnikers Alfred HICKETHIER (1903-1967). Dieser hatte einen Farbenwürfel als Referenzmodell für den Dreifarbendruck sowie die Dreischichten- Buntphotographie entworfen (Hannover 1952) und zu dessen experimenteller Entwicklung RÖSCH um Unterstützung hinsichtlich der farbmetrischen Begründung gebeten. Daraus entwickelte sich eine jahrzehntelange freundschaftliche Zusammenarbeit, die 1967 durch den Tod HICKETHIERS ein vorzeitiges Ende fand. RÖSCH setzte die Arbeit fort, so dass er das Werk seines Freundes der Fachwelt bewahren und 1972 als ‚Große Farbenordnung Hickethier (FOH)‘ herausgeben konnte (s. Abb. 15).

Von jener Auseinandersetzung mit der Problematik des Farbendrucks angeregt hat RÖSCH schließlich mit dem ‚Vektorfarbenkörper‘ (s. Abb. 16) auch ein eigenes, komplexes Modell für den Mehrfarbendruck entwickelt, das für die Mischung der Farben eine variable Anzahl zwischen drei und zwölf nutzbaren Vektoren anbietet.

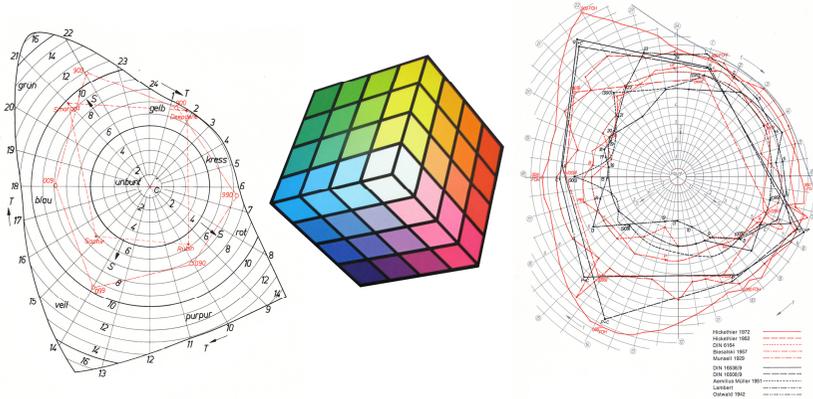
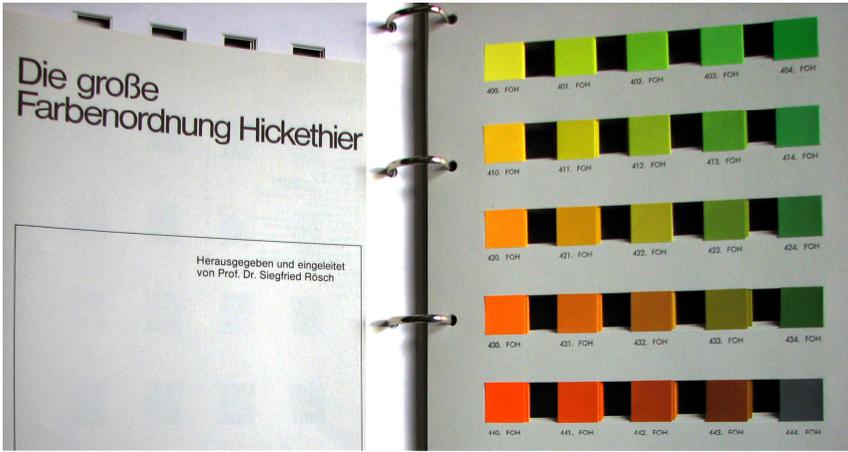


Abb. 15. Zur 'Großen Farbenordnung Hickethier', hrsg. v. S. RÖSCH, Ravensburg 1972. (Montage E. B.).

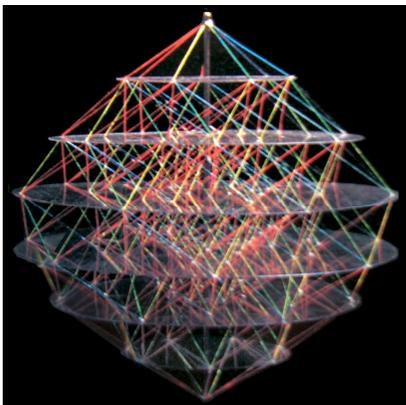


Abb. 16. Fadenmodell des 'Siebenvektor-Farbkörpers' von RÖSCH (aus S. R.: Vektorfarbkörper für Mehrfarbendruck 1970).

## Zahlentheorie, Ästhetik und Kunsttheorie

Wie für GOETHE schon war auch für Siegfried RÖSCH insbesondere Johannes KEPLER (1571-1630) ein Wahlverwandter. Ihn verband mit dem großen Astronomen und Mathematiker aber nicht nur die geistige Aufgeschlossenheit für einen allumfassenden Zusammenhang von Gesetz und Harmonie, sondern, wie sich durch seine Ahnenforschung erwies, auch ein familiengeschichtlicher Hintergrund. Johannes KEPLER war einst von RÖSCHs direktem Ahn, Michael MÄSTLIN (1550-1631), Astronom und Mathematiker in Tübingen, mit der Lehre von KOPERNIKUS vertraut gemacht worden und blieb seinem einstigen Lehrer in lebenslanger Freundschaft verbunden.

RÖSCHs Aufgeschlossenheit für das geheime Wirken der Natur und sein Interesse an dessen mathematisch fundierten Indizien, an „erstaunlichen Mustern und ästhetisch schönen Ordnungen im Reiche der Zahlen“, kommt nicht nur in seiner Hinwendung zu der Zahl Phi ( $\varphi = 1,6180339\dots$ ), dem damit eng verbundenen Goldenen Schnitt und der KEPLER'schen Zahlenreihe (auch Lamésche- oder Fibonacci-Reihe genannt) zum Ausdruck, sondern ebenso in seiner Beschäftigung mit den Primzahlen, der Ulam-Spirale oder dem PASCAL'schen Dreieck (s. Abb. 17). RÖSCH zog aus den klaren Beziehungen des PASCAL'schen Dreiecks zur Dreifarbenlehre praktisch nützliche Folgerungen (1964).

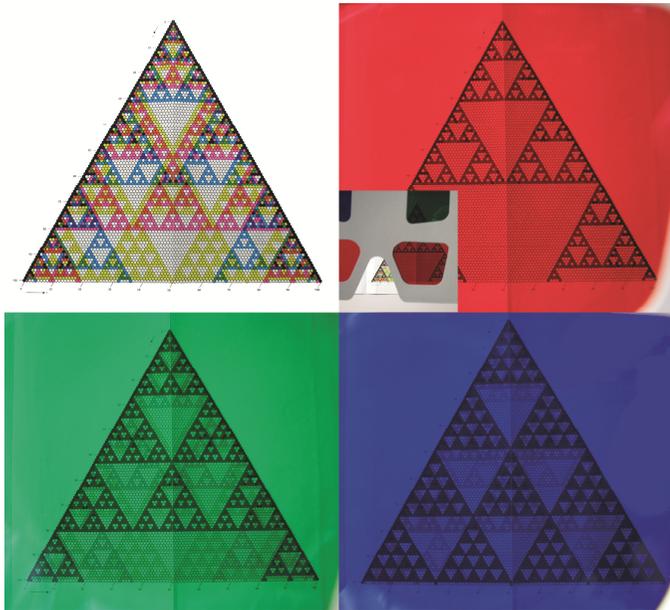


Abb. 17. 100zeiliges Pascal-Dreieck mit farbiger Kennzeichnung des Faktors 30 und aller darin enthaltenen Teiler. (aus: S. R.: Farbenlehre auf die Mathematik angewandt, Studien zum P.-D., 1964) *Durch Farbfilter kann man Symmetriemuster der jeweiligen Verteilung für die Faktoren 2 (rot), 3 (grün) und 5 (blau) erkennen.* (Montage E. B.).



er damit auch an althergebrachte Auffassungen von 'Kunst als etwas Naturgemä-  
ßes' an - auch im Sinne der von GOETHE wie OSTWALD wertgeschätzten Bezie-  
hungen zwischen Wissenschaft und Kunst.

### **Zum Schluss**

Allein das, was RÖSCH in der Kristallographie, Kristalloptik, Farbenlehre und Edelsteinkunde geleistet hat - seine Gesamtbibliographie umfasst insgesamt über 300 Beiträge zu 13 verschiedenen Fachgebieten - würde ausreichen, ihm einen bleibenden Platz in unserem Gedächtnis zu bewahren. Dem universal denkenden Wissenschaftler war es jedoch vergönnt, noch weit darüber hinaus zu wirken und Maßstäbe zu setzen. Seine vielen Brückenschläge zwischen Natur- und Geisteswissenschaften werden wohl sein größtes Vermächtnis bleiben.

In Bezug auf die Farbenlehre als moderne, fachübergreifende Wissenschaft soll noch einmal Manfred RICHTER zu Wort kommen: „Rösch hat es verstanden, das Gedankengut vieler seiner Vorgänger für die neue Zeit zu bewahren und aufzubereiten, mit eigenen wertvollen Ideen zu bereichern und unser heutiges Verständnis von der Welt der Farben zu vervollkommen.“

Ein letzter Beleg für die enge Beziehung des universalen Gelehrten RÖSCH zu einem seiner großen Vorgänger soll hier noch Erwähnung finden: Kurz vor seinem 85. Geburtstag regte RÖSCH für das Stadtarchiv Wetzlar noch den Nachbau einer ‚Schusterkugel‘ als Originallichtquelle für GOETHES Versuche zum Regenbogen an. Obwohl RÖSCH deren Übergabe nicht mehr erlebte, sorgte er damit zuletzt noch für einen durchaus symbolischen Bogenschlag über Zeit und Raum.

Auch der in diesem Beitrag skizzierte Bogen gleicht einem reich facettierten Band, das sich offenbar wie von selbst zwischen universalen Geistern entzündet und zu leuchten vermag.

### **Werkauswahl zu Rösch**

- [1] Über Reflexphotographie. Abh. Math.-physik. KL. Sächs. Akad. Wiss 39 (1926), S. 1-62 (Diss., Leipzig, 1926).
- [2] Über den Polarisationszustand des Regenbogens. (mit F. RINNE). Cbl. Mineral. (1927), A, S. 33-38.
- [3] Eine neue Methode der Farbenmessung: Vortrag, Breslau 1927. Fortschr. Mineral. 12 (1927), S. 70-71.
- [4] Die Kennzeichnung der Farben. Physik. Ztg. 29 (1928), S. 83-91.
- [5] Darstellung der Farbenlehre für die Zwecke der Mineralogen. In: Fortschritte der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie. Bd. 13. Berlin, 1929, S. 753-902 (Habilitationsschrift, Leipzig, 1929).
- [6] Farbfilmprüfungen. Optik 8 (1951), S. 444-448, auch Kinotechnik 8 (1954), S. 148-149.
- [7] Zur Systematik der Farben, insbesondere der Interferenzfarben: Festschrift für W. J. Schmidt. In: Ber. der oberhess. Ges. f. Natur- u. Heilkunde zu Gießen. N.F., Naturwiss. Abt. Bd. 27 (1954).

- [8] Goethes Verwandtschaft: Versuch einer Gesamtverwandtschaftstafel mit Gedanken zu deren Theorie. Neustadt a. Aisch, 1954, 460 +76 S., 43 Fig. - Neudruck 1966.
- [9] Farbe und Farbphotographie als Forschungshilfsmittel. Bildmessung u. Luftbildwesen 37 (1969), S. 75-86.
- [10] Doppelbrechungs-Interferenzfarben sehr dünner Blättchen. Optica acta 6 (1959), S. 186-195.
- [11] Farbmatrik zusammengesetzter Interferenzfarben. Fortschr. Mineral. 29/30 (1952), S. 387 sowie: Binäre und polynäre Polarisationsinterferenzfarben und ihre Bedeutung in der neuesten Farbphotographie. Optik 23 (1965), S. 109-112.
- [12] Gedanken zur Genealogie. Familie u. Volk (1961), H. 1, S. 291-292.
- [13] Expedition in unerforschtes Zahlenland. Das neue Universum 79 (1962), S. 93-98.
- [14] Neues vom Pascal-Dreieck. Bild d. Wiss. 4 (1965), S. 758-762.
- [15] Die Farbtonkreis-Sonnenuhr in Gravenbruch. Heimatbote z. Sonntag, Stadt im Wald Gravenbruch 3 (1964), Nr. 50 / (Farbtonsonnenuhr von Gravenbruch. Mappe (München) 82 (1968), S. 304-306.
- [16] 50 Jahre im Dienst der Wissenschaft: Vortrag zum 70. Geburtstag 1969, Festkolloquium Gießen (mit Bibliografie).
- [17] HICKETHIER, A.: Die große Farbenordnung Hickethier. Hrsg. u. eingeleitet von Prof. Dr. S. RÖSCH. Ravensburg: Maier, 1972.
- [18] Rück- und Ausblicke auf Farbmeßversuche: Manfred Richter zum 75. Geburtstag gewidmet. Die Farbe 28 (1980), Nr. 3/6, S. 207-216.

### **Ergänzende Quellenhinweise**

- [1] Farbe + Design 19 (1981), S. 19: Prof. S. Rösch 82 Jahre.
- [2] Farbe + Design 31/32 (1984), S. 77: Prof. Dr. Siegfried Rösch verstorben.
- [3] RICHTER, M.: Der Farbmetriker Siegfried Rösch. In: Siegfried W. Rösch (1899-1984). Jahresgabe der Wetzlarer Goethe-Ges. e.V., 1986, S. 111-121.
- [4] MARTIN-KONLE, C.; REUTER, P.; SCHNEIDE, O.: Farbforschung exemplarisch: Siegfried Rösch. In: BAUMGARTNER, M.; LEPPER, M.; REUTER, P. (Hrsg.): Die Farben wollen wir nicht den Blumen überlassen. Universitätsbibliothek u. Inst. f. Kunstgeschichte der Justus-Liebig-Universität Gießen, 2011, S. 23-44.
- [5] Korrespondenz BENDIN, E. 2011 mit Rösch-Nachkommen (Sammlung Farbenlehre TU Dresden).
- [6] BENDIN, E.: Siegfried Rösch 1899-1984. In: BENDIN, E.: Schnittstelle Farbe. Beiträge zur Farbenlehre im Mitteldeutschen Raum. Dresden: Edition Bendin, 2021.
- [7] Bibliographischer Nachlass von Siegfried RÖSCH, Universitätsbibliothek Gießen.

# Anspruchsvolle mathematische und naturwissenschaftliche Sachverhalte mit Farben aufbereitet – ein Einblick

Wolfgang Oehme

Farben besitzen Signalwirkung, vermitteln uns ästhetische und emotionale Empfindungen und helfen uns, Formen richtig wahrzunehmen. Der vorliegende Beitrag soll einen Einblick vermitteln, wie Farben genutzt werden, um anspruchsvolle mathematisch-naturwissenschaftliche Zusammenhänge zu veranschaulichen. Einleitend werden Farben dazu verwendet, die Einzugsgebiete eines Magnetpendels, einem typischen Beispiel der nichtlinearen Dynamik, zu entwickeln. Die Mandelbrotmenge erweitert diese Gedanken auf die komplexe GAUß'sche Zahlenebene. Bei der Darstellung komplexer Funktionen werden diese grundlegenden Ideen aufgegriffen und auf die Einfärbung der komplexen Ebene für Phasenporträts erweitert. Hilfreich ist es dabei, vom RGB-Farbraum zu den verwandten HSV- und HSL-Farbsystemen zu wechseln. In einem Anhang wird dieser Wechsel detailliert dargestellt. Ein weiterer Anhang soll die Kenntnisse über die komplexen Zahlen auffrischen.

## 1. Einstieg

Farben helfen, Gegenstände gegen einander abzugrenzen, Übergänge zu betonen und selbst kleine Objekte vor einem vielgestaltigen Hintergrund zu erkennen. Sie erlauben, kontinuierliche Verläufe zu erfassen und von sprunghaften Veränderungen zu unterscheiden (s. auch [1]).

Häufig werden Farben dazu eingesetzt, um mehrere Graphen in einem Diagramm gegenüberzustellen und gleichzeitig zu unterscheiden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Teile der  $x$ - $y$ -Ebene nach vorgegeben Regeln gezielt einzufärben. Dieser Weg soll in diesem Beitrag an ausgewählten Beispielen demonstriert werden. Dabei führen die Betrachtungen bis zur GAUß'schen Zahlenebene, damit komplexe Zahlen dargestellt werden können. Während für die Einzugsgebiete eines Magnetpendels die konventionelle  $x$ - $y$ -Ebene ausreicht, muss auf die GAUß'sche Ebene gewechselt werden, um die zur Mandelbrotmenge gehörenden komplexen Zahlen vom Umfeld abzugrenzen. Komplexwertige Funktionen bilden komplexe Zahlen eindeutig auf einander ab. Da jede komplexe Zahl aus einem Real- und einem Imaginärteil besteht, müsste die Darstellung des Zusammenhangs vierdimensional sein. Ein wesentliches Ziel des Beitrages besteht darin, aufzuzeigen, wie Farben helfen, diese vierdimensionale Darstellung zu vermeiden. Bewährt hat es sich dabei, die exponentielle Form der komplexen Zahl zu wählen und die farbige Gestaltung der GAUß'schen Ebene von der Phase (Phasenporträt) oder von Phase und Betrag abhängig zu machen. Um diese Einfärbung mit kontinuierlichen Variablen vornehmen zu können, muss der vertraute RGB-Farbraum verlassen und zu den verwandten HSV- und HSL-Farbsystemen gewechselt werden. Da die Ergebnisse auf dem Farbbildschirm dargestellt werden, muss es sowohl einen eindeu-

tigen Hin- als auch Rückweg geben. Der entsprechende Anhang widmet sich ergänzend dem Prinzip dieser Schrittfolge.

## 2. Magnetpendel

Ein ausgelenktes und dann freigegebenes Fadenpendel kommt stets in senkrechter Lage zur Ruhe. Daran ändert sich auch nichts, wenn ihm eine Anfangsgeschwindigkeit mit auf den Weg gegeben wird; so erwarten wir es auch bei einem Lot.

Ganz anders verhält sich ein Pendel, wenn die Symmetrie gebrochen wird. Dies erfolgt z.B. bei einem Magnetpendel. Dabei wird ein wesentlicher Teil des Fadens durch einen dünnen Stab ersetzt, der einen Dauermagneten als Pendelkörper trägt (s. Abb. 1, [2]). In der Grundfläche werden üblicherweise drei weitere Dauermagnete symmetrisch zum ursprünglichen Ruhepunkt in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet, die den Pendelkörper anziehen. Ist die Anordnung gut abgestimmt, so entsteht eine Potentiallandschaft mit einem Sattelpunkt über dem ursprünglichen Ruhepunkt und drei Senken in der Nähe der drei Magnete. Konsequenterweise kommt das Pendel nun stets über einem der Magnete zur Ruhe. Selbst wenn das Pendel ohne Anfangsgeschwindigkeit gestartet wird, verläuft seine Bahn unvorhersehbar, bevor es über einem der Magnete zur Ruhe kommt (s. Abb. 2). Schon geringe Abweichungen des Startpunktes können zu völlig anderen Trajektorien führen.



Abb. 1. Aufbau eines Magnetpendels.

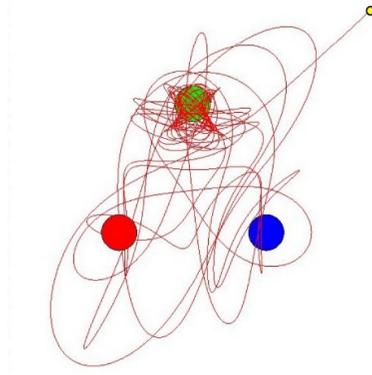


Abb. 2. Typische Trajektorie eines Magnetpendels.

Um diese Sensitivität zu studieren, bietet es sich an, das System zu modellieren und zu simulieren [2, 3]. Als Kräfte sind neben der Gewichtskraft die Magnetkräfte der drei Dauermagneten und eine (variable) Reibungskraft zu beachten (s. Abb. 3). Für die Simulation wird vereinfachend angenommen, dass sich die Magnetkräfte analog dem Coulomb-Gesetz mit dem magnetostatischen Kraftgesetz beschreiben lassen:  $\vec{F} = c \cdot \frac{\vec{P}_1 + \vec{P}_2}{r^2}$ , wobei  $\vec{P}_1$  für die Polstärke des Pendelmagneten und  $\vec{P}_2$  für die des jeweiligen Magneten auf der Grundfläche steht [2]. Verwendet man

stattdessen für die Beschreibung ein Cosinus-Potential, so ändert dies nichts an den prinzipiellen Aussagen.

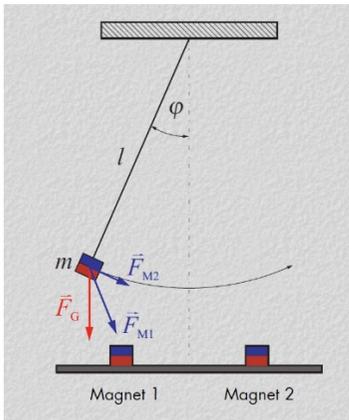


Abb. 3.  
Kräfte am Pendelkörper.

Auf den Pendelkörper wirken Kräfte mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften: die konstante Gewichtskraft, die drei ortsabhängigen Magnetkräfte und die geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft. Dadurch entsteht ein sensitives nichtlineares System. Um die Einzugsgebiete und den Reibungseinfluss zu studieren, wurden etwa 66.000 Startpunkte gewählt, die die gesamte Ebene bedecken (s. [2, 4]). Bestimmt wurde der Magnet, über dem das Pendel zur Ruhe kommt. Die farbigen Einzugsgebiete entstehen, wenn jedem Magneten eine andere Farbe zugeordnet wird und der Startpunkt die Farbe des erreichten Ziels erhält. Dabei wurden die Startpunkte auf die Grundfläche ( $x$ - $y$ -Ebene) projiziert.

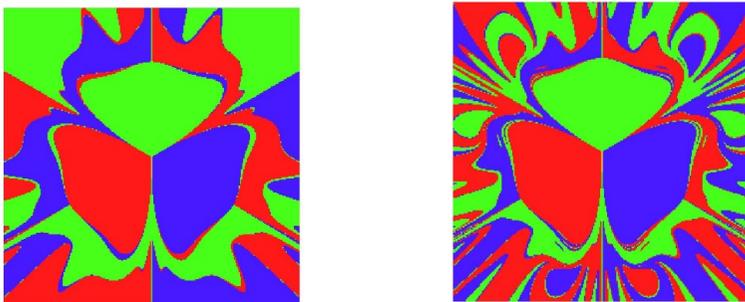


Abb. 4. Einzugsgebiete und Reibungseinfluss.

Die Gestalt der Einzugsgebiete hängt stark von der angesetzten Reibung ab. Bei geringer Reibung (s. Abb. 4, rechts), die etwa dem Realexperiment entspricht, genügen in manchen Startbereichen bereits geringste Abweichungen am Start, um einen anderen Magneten als Ziel anzusteuern. Die farbige Darstellung lässt auf

einen Blick die Sensitivität des Systems Magnetpendel erkennen. Außerdem kann man ihr nicht eine gewisse Ästhetik absprechen.

### 3. Mandelbrot-Menge

Für das nächste Beispiel benötigen wir die GAUß'sche Zahlenebene, um die verwendeten komplexen Zahlen darzustellen. Dazu wird auf der x-Achse der Realteil und auf der y-Achse der Imaginärteil der komplexen Zahl abgetragen (s. Abb. 5). Dabei steht  $i$  für die imaginäre Einheit mit  $i^2 = -1$ .

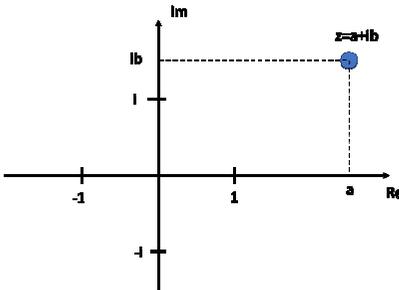


Abb. 5.  
GAUß'sche Zahlenebene und komplexe Zahl.

Benoit MANDELBROT (1924-2010) studierte u.a. das Verhalten der Iteration  $z_{n+1} = z_n^2 + c$ , um zu erkennen, für welche Punkte  $c$  der komplexen Ebene die Zahlenfolge zu endlichen Beträgen führen. Diese Punkte sind dann Elemente der Mandelbrot-Menge. Punkte  $c$ , für die der Betrag gegen  $\infty$  strebt, liegen außerhalb. Bevor wir die Iteration an einen Computer übergeben, wollen wir an zwei einfachen Beispielen testen, ob die Zuordnung leicht durchschaubar ist.

Das Bildungsgesetz lautet:  $z_0 = 0, c = a + b * i, z_{n+1} = z_n^2 + c$ . Wir wählen zwei Zahlen, die gleich weit vom Ursprung entfernt sind.

Beispiel 1:  $c = 1$

$$z_0 = 0,$$

$$z_1 = 0^2 + 1 = 1, z_2 = 1^2 + 1 = 2, z_3 = 2^2 + 1 = 5, z_4 = 5^2 + 1 = 26$$

Bereits jetzt ist zu erkennen, dass die Iteration zu einem unendlichen Betrag führt. Die komplexe Zahl  $c = 1 + 0 * i$  gehört nicht zur Mandelbrot-Menge.

Beispiel 2:  $c = i = \sqrt{-1}$ ,

$$z_0 = 0$$

$$z_1 = 0^2 + i = i, z_2 = i^2 + i = -1 + i, z_3 = (-1 + i)^2 + i = -i, z_4 = (-i)^2 + i = -1 + i = z_2, z_5 = (-1 + i)^2 + i = -i = z_3$$

Die Iteration führt zu einer Schleife. Der Betrag wechselt zwischen 1 und  $\sqrt{2}$ . Der Punkt  $c = 0 + i$  gehört zur Mandelbrot-Menge.

Beide betrachteten Punkte sind gleich weit vom Ursprung entfernt, zeigen aber offenbar unterschiedliche Zugehörigkeit. Aus der Lage einer komplexen Zahl in der GAUß'schen Zahlenebene kann also nicht sofort geschlussfolgert werden, ob sie zur Mandelbrot-Menge gehört.

Im einfachsten Fall benötigt man zwei Farben, um die Zugehörigkeit zu unterscheiden. Meist wird aber durch weitere Farben zusätzlich charakterisiert, wie schnell die Iteration über die gewählte Betragsgrenze führt (s. Abb. 6). Die Mandelbrot-Menge blieb schwarz. Für die weit außen liegenden Startpunkte wurde der vorgegebene maximale Betrag bereits nach wenigen Zyklen überschritten.

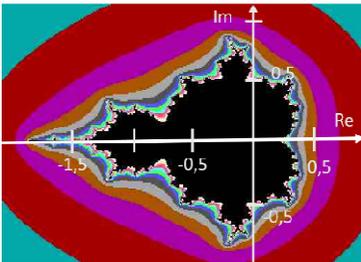


Abb. 6. Prinzipbild der Mandelbrot-Menge.

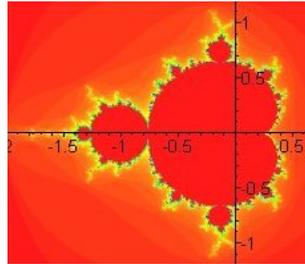


Abb. 7. Mandelbrot-Menge mit kontinuierlicher Farbabstufung.

Wählt man eine feinere Farbpalette und eine genauere Iteration, so entstehen ästhetische Abbildungen. Für eine mehrschrittige Iteration muss eine Grenze für den Betrag und/oder die Anzahl der Iterationsschritte vorgegeben werden. In der Literatur finden sich Beispiele mit einer Betragsgrenze von  $10^8$  (statt  $\infty$ ) und 500 Iterationsschritten. Wir begnügen uns bei unseren Beispielen mit 100 Iterationsschritten und dem Betrag 2 für  $250 \times 250$  Punkte der komplexen Ebene (s. Abb. 7 bis 9).

Wie filigran die Grenze ist, wird noch deutlicher, wenn einige Bereiche herausgezoomt werden (s. Abb. 8). Jetzt wird auch erst ersichtlich, dass unser zweiter Startpunkt der Iteration  $z = i$  auf einem „Nebenzweig“ liegt und wirklich zur Mandelbrot-Menge gehört, wie ein Ausschnitt bestätigt (s. Abb. 9). Schon geringfügige Abweichungen führen aus der Mandelbrot-Menge heraus. Unser erstes Beispiel  $z = 1$  liegt dagegen weit außerhalb der Menge.

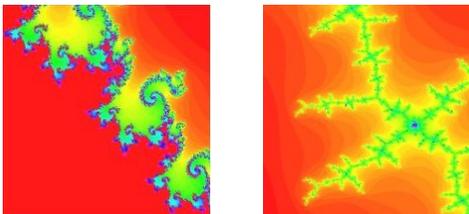


Abb. 8. Ausschnitte aus der Grenze der Mandelbrot-Menge.

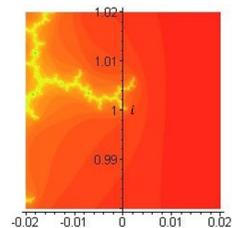


Abb. 9. Extremer Zoom auf  $z=i$ .

Die Grenze der Mandelbrot-Menge ist keine Linie, aber auch noch keine Fläche. Ihre Dimension liegt zwischen 2 und 3. Benoit MANDELBROT führte für Gebilde mit „gebrochenen Dimensionen“ den Begriff Fraktale ein (s. [5]). Die Mandelbrot-Menge birgt vielfältige Überraschungen und wurde deshalb intensiv untersucht (s. z.B. [6]).

#### 4. Darstellung komplexwertiger Funktionen

Um das Ergebnis komplexwertiger Funktionen darstellen zu können, gilt es, einige Schwierigkeiten zu überwinden. Zunächst sollen die Probleme und Lösungsansätze aufgezeigt werden, ehe ausgewählte Beispiele die verschiedenen Möglichkeiten illustrieren.

##### Schwierigkeiten und Lösungsansätze

Der Graph reeller Funktionen  $y=f(x)$  veranschaulicht den eindeutigen Zusammenhang zwischen den reellen Zahlen der x-Achse (Definitionsbereich) und dem Wertebereich auf der y-Achse. Abb. 10 zeigt diesen Sachverhalt für eine verschobene Normalparabel  $y = f(x) = (x + 2)^2 - 3$ . In dieser zweidimensionalen Darstellung wird jeder Zahl des Definitionsbereichs eindeutig eine Zahl des Wertebereichs zugeordnet.

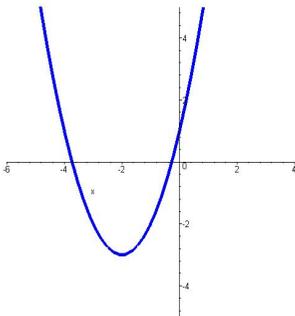


Abb. 10. Verschobene Normalparabel.

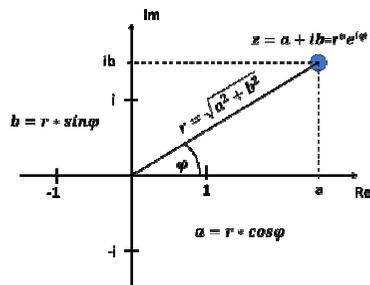


Abb. 11. GAUß'sche Zahlenebene.

Geht man zu den komplexen Zahlen über, so beanspruchen bereits die Ausgangszahlen  $z = a_1 + i * b_1 = r_1 * e^{i*phi_1}$  die zweidimensionale GAUß'sche Zahlenebene (s. Abb. 11). Ihre Abbildung  $w = f(z) = a_2 + i * b_2 = r_2 * e^{i*phi_2}$  erfordert zwei weitere Dimensionen. Ein vierdimensionaler Raum ist uns aber nicht zugänglich. Es müssen also Wege gefunden werden, die gewünschten Informationen drei- oder zweidimensional darzustellen. Da die Ergebnisse meist auf Bildschirmen betrachtet oder auf Papier ausgedruckt werden, ist insbesondere die ebene Darstellung anzustreben.

##### Dreidimensionale Darstellung

Computeralgebrasysteme, wie z.B. Mathematica [7] oder Maple [8], bieten eine dreidimensionale Darstellung komplexer Funktionen an. Bereits Ende der 1990er Jahre war diese Möglichkeit bei Maple mit dem Befehl `complexplot3d` zugänglich

[9]. Standardmäßig wird als dritte Dimension der Betrag der zweiparametrischen Funktion dargestellt; der Phasenwinkel bestimmt die Kolorierung. Abb. 12 zeigt das Beispiel  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$ . Blickt man senkrecht auf die Darstellungen, so bleibt nur die Einfärbung erhalten.

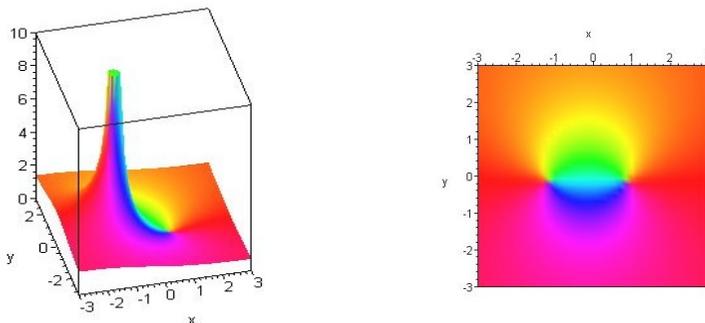


Abb. 12. Dreidimensionale Darstellung und Projektion der Funktion  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$ .

### Zweidimensionale Darstellungen

Verwendet man Farben, um die Funktionen zu veranschaulichen, dann genügen bereits zwei Dimensionen. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, die nachfolgend beschrieben werden.

Zunächst zur Grundidee (s. Abb. 13): Die z-Ebene, der Definitionsbereich, wird in eine diskrete Domäne aus Pixeln überführt. Jeder Pixel entspricht einem Punkt  $z$  in dieser Domäne (domain coloring). Ausgehend von der komplexen Zahl in der z-Ebene wird ihr Bildpunkt  $w=f(z)$  berechnet. Seine Eigenschaften (Betrag  $r$ , Phase  $\varphi$ ) bestimmen, wie der Ausgangspunkt der z-Ebene einzufärben ist. Dies ähnelt dem Vorgehen bei den Einzugsgebieten des Magnetpendels (s. Abschnitt 2), wo der Startpunkt danach eingefärbt wurde, über welchem Magneten das Pendel zur Ruhe kam. Auch beim „Apfelmännchen“ (s. Abschnitt 3) erhielt der Startpunkt erst nach Ablauf des Rechenzyklus seine definierte Farbe.

### Farbcodes

### Vorbemerkungen

Leider wird bei dieser Einfärbung nicht einheitlich vorgegangen. Häufig wird Rot als Nullpunkt im Farbkreis gewählt und auf die positive reelle Achse gelegt. Aber man findet auch Rot auf der positiven imaginären Achse oder der negativen reellen Achse. Einheitlich wird jedoch der Durchlauf des Farbkreises von Rot in Richtung Gelb entgegen dem Uhrzeigersinn (math. positiver Drehsinn) verwendet. Auch die Übergänge zwischen Schwarz, Weiß und den Farben des Farbkreises werden bei Betragsbetrachtungen unterschiedlich kodiert (s. u.).

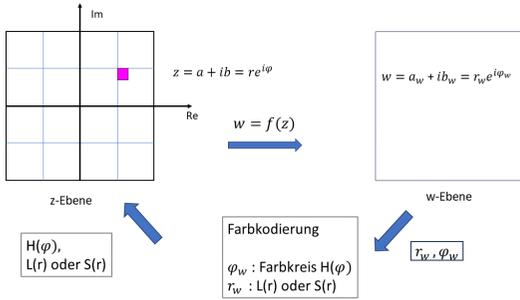


Abb. 13. Einfärben der komplexen Ebene.

a) Phasenporträt und Farbkreis

Für das Kodieren der Phase bietet sich der Farbkreis an (s. Abb. 14). Alle Punkte  $w$  mit der gleichen Phase  $\varphi_w$  führen zu Punkten mit der gleichen Farbe in der  $z$ -Ebene, die auf einem Strahl vom Ursprung bis Unendlich liegen. Die Information über den Betrag wird nicht transportiert. Festgelegt werden muss nur noch, welche Farbe des Farbkreises der Phase  $0^\circ$  zugeordnet wird. Wir schließen uns der häufigsten Wahl an: Rot bei  $\varphi = 0^\circ$ , Grün bei  $\varphi = 120^\circ$ , Blau bei  $\varphi = 240^\circ$ .

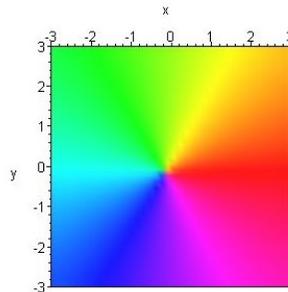
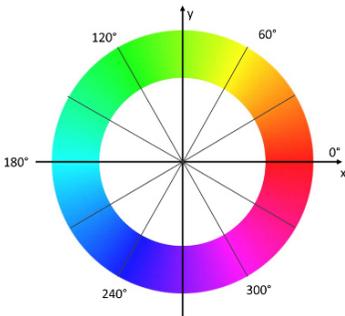


Abb. 14. Farbkreis mit der Winkelzuordnung.    Abb. 15. Identität  $w = f(z) = z$ .

Phasenporträts ausgewählter komplexwertiger Funktionen

1) Identität  $w = f(z) = z$

Hier legt die Zahl  $z$  direkt fest, welche Einfärbung erfolgt:  $w = z = a + i * b = r * e^{i\varphi}$ . Abb. 15 entspricht dem auf die gesamte GAUß'sche Ebene ausgedehnten Farbkreis. Das Beispiel zeigt uns den direkten Vergleich zum Farbkreis. Es kann auch als Vergleich dienen, um Abbildungen durch komplizierte Funktionen besser zu erfassen.

2)  $w = f(z) = \bar{z}$

Die Abbildung erzeugt die konjugiert komplexe Zahl  $\bar{z}$ :  $\bar{z} = a - i * b = r * e^{-i\varphi}$ . Die komplexen Zahlen werden an der reellen Achse gespiegelt (s. Abb. 16).

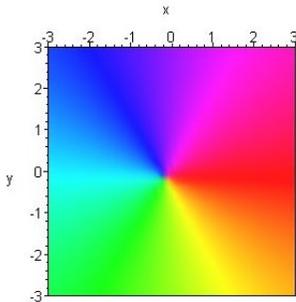


Abb. 16. Spiegelung an der reellen Achse durch  $w = f(z) = \bar{z}$ .

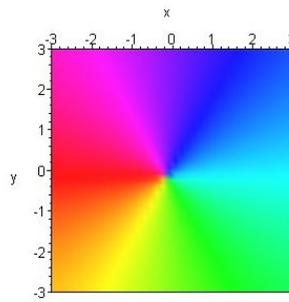


Abb. 17. Punktspiegelung am Ursprung durch  $w = f(z) = -z$ .

3)  $w = f(z) = -z$

Aus  $z = a + i * b$  entsteht  $w = -a - i * b$  oder  $w = -z = i^2 z = e^{i\pi} z$ ; woraus sich  $\varphi_w = \varphi + \pi$  ergibt. Es erfolgt eine Punktspiegelung am Ursprung bzw. eine Drehung um den Winkel  $\pi$  (180°, s. Abb. 17).

4)  $w = f(z) = (z - 1)/(z + 1)$

Für dieses Beispiel kehren wir zu der bei der dreidimensionalen Darstellung verwendeten Abb. 12 zurück. Die Projektion in die GAUß'sche Ebene ist das Phasenporträt. Es ist ersichtlich, dass sich zwei Farbwirbel bilden. Einen solchen Wirbel kennen wir vom Ursprung  $z=0$  der Identität  $w = f(z) = z$  (s. Abb. 15). Ein genauerer Blick offenbart, dass sich die Farben in beiden Wirbeln in entgegengesetztem Sinn drehen.

Die dreidimensionale Darstellung der Funktion zeigt, dass im Punkt  $z=+1$  eine Nullstelle und im Punkt  $z=-1$  eine Polstelle vorliegt. Allgemein gilt: An Nullstellen folgen die Farben dem Farbkreis, an Polstellen verlaufen sie entgegengesetzt.

#### b) Domäneneinfärbung mit den Farbsystemen HSL und HSV

Um Phase und Betrag gleichzeitig zu codieren, wird neben dem Farbton eine weitere Eigenschaft der Farbe benötigt. Die beiden Farbsysteme HSV und HSL bieten dazu jeweils zwei Möglichkeiten an (s. Abb. 18). Die Abkürzungen HSV und HSL stehen dabei für den Farbton (**H**ue), die Sättigung (**S**aturation) und die Dunkelstufe (**V**alue) bzw. Helligkeit (**L**ightness). Üblicherweise wird vom HSV-System die Sättigung S, der Übergang in der Deckfläche des Zylinders vom Farbkreis zum

Weiß oder auch umgekehrt, verwendet; manchmal aber auch die Dunkelstufe V entlang des Zylindermantels. Beim HSL-System (nahezu) einheitlich der Übergang vom Schwarz über den Farbkreis zum Weiß auf dem Zylindermantel, die Helligkeit L (s. Abb. 18)). Der entsprechende Anhang stellt den Zusammenhang zwischen dem RGB-Farbwürfel und diesen Farbzylindern dar (s. Anhang 2):

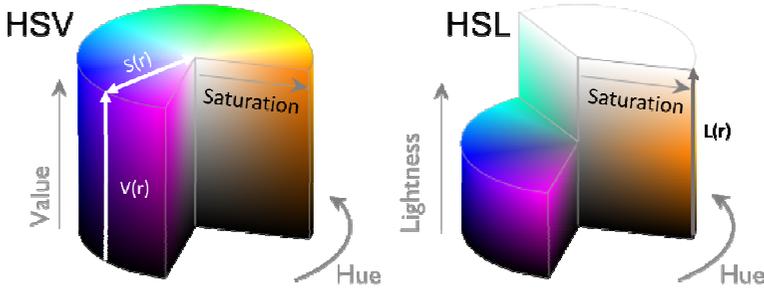


Abb. 18. Farbsysteme HSV und HSL, typische Wege (nach [10]).

Unabhängig von der Wahl des Farbsystems gilt es, noch eine Schwierigkeit auszuräumen: Sowohl die Sättigung S als auch die Helligkeit L und die Dunkelstufe V nehmen nur Werte zwischen 0 und 1 (bzw. 0% und 100%) an, der Betrag der komplexen Zahlen liegt aber zwischen 0 und  $\infty$  (s. Abb. 19).

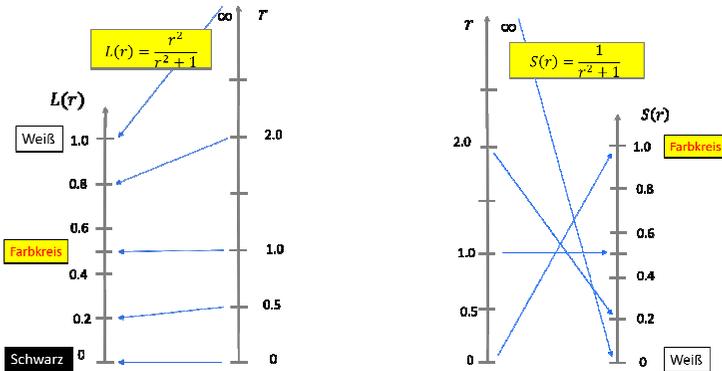


Abb. 19. Zusammenhang zwischen Radius r und der Helligkeit L des HSL-Systems bzw. der Sättigung S des HSV-Systems.

In der Literatur werden für die Umrechnung unterschiedliche Funktionen gewählt. Wir wählen eine der einfachsten Funktionen:

$L(r) = \frac{r^2}{r^2+1}$  bzw.  $S(r) = 1 - \frac{r^2}{r^2+1} = \frac{1}{r^2+1}$ . Die Funktionen bewirken, dass erst große Beträge dem Weiß nahekommen (s. Abb. 19 und 20).

Abb. 20 stellt für einige ausgewählte Punkte die Einfärbung mit den entsprechenden Variablen gegenüber. Die erste Variante haben wir bei den Phasenporträts verwendet. Hier erfüllt der Farbkreis die gesamte komplexe Ebene; die Variable ist allein der Farbton (H). Bei der zweiten Variante (HSV) wurde hier der Übergang in der Deckfläche vom Farbkreis zum weißen Zentrum gewählt. Hier liegt der Farbkreis direkt am Schwarz eingefärbten Ursprung und die Farben verblassen nach außen hin. Bei der dritten Variante (HSL) entsteht der schwarze Ursprung konsequent durch die Funktion  $L(r)$ . Vom Schwarz erfolgt ein kontinuierlicher Übergang zum Farbkreis bei  $r=1$  und von dort bis zum Weiß im Unendlichen.

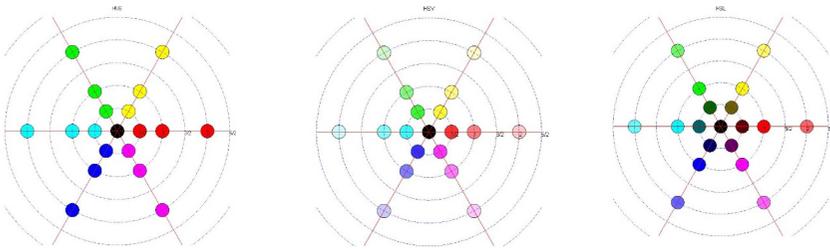


Abb. 20. Gegenüberstellung der Einfärbungen (Prinzip; links: Farbton **H**, Mitte: **HSV**, rechts: **HSL**).

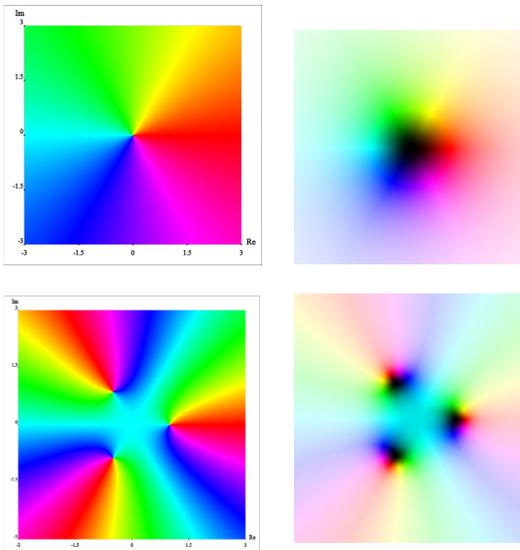


Abb. 21.

Vergleich des unterschiedlichen Einfärbens der komplexen Ebene an den Beispielen  $f(z) = z$  (oben) und  $f(z) = z^3 - 1$  (unten); berechnet mit [11, 12].

Abb. 21 stellt das Phasenporträt der Funktionen  $f(z) = z$  und  $f(z) = z^3 - 1$  (links) der zusätzlichen Betragscodierung durch die Helligkeit L im HSL-Farbsystem gegenüber (rechts). Für die Radiusabhängigkeit  $L(r)$  wurde bewusst der in Abb. 19 dargestellte Zusammenhang  $L(r) = \frac{r^2}{r^2+1}$  verwendet.

## 5. Ausblick

Phasenporträts bestechen durch ihre farbliche Brillanz und Detailtreue. Ihre Aussagekraft kann durch zusätzliche Konturlinien für die Phase und den Betrag weiter erhöht werden. Am vertrauten Beispiel der Funktion  $w = f(z) = z^3 - 1$  soll dies demonstriert werden. Spezielle Programme gestatten es, wahlweise den Verlauf der Phase, des Betrages oder beider zu betonen (s. z.B. [11]).

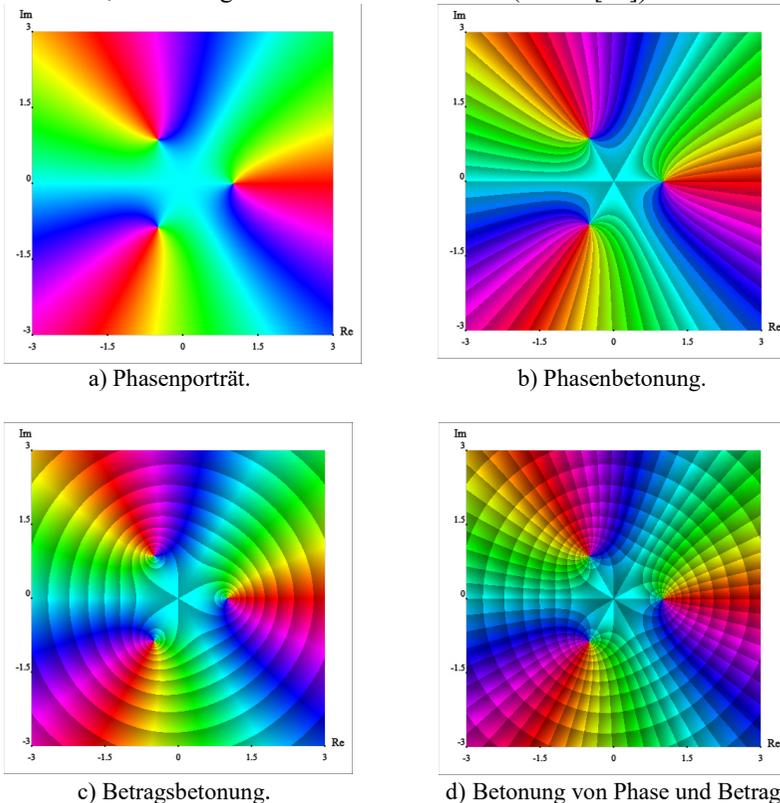


Abb. 22. Phasenporträt der Funktion  $f(z) = z^3 - 1$  mit zusätzlichen Konturlinien.

Für die Funktion  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$  soll hier das entsprechende Ergebnis näher betrachtet werden (s. Abb. 12 und 23). Die Ähnlichkeit mit den Feld- und

Äquipotentiallinien zweier ungleichnamiger elektrischer Ladungen ist offensichtlich; womit die Feldtheorie als ein weiteres Anwendungsfeld aufgezeigt wird. Die Identität  $f(z) = z$  steht dann für eine isolierte Ladung.

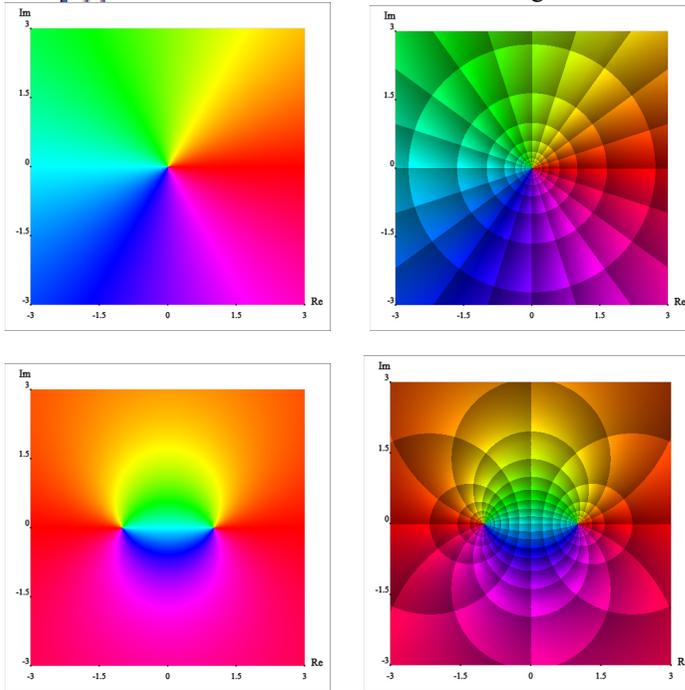


Abb. 23. Phasenporträt der Funktionen  $f(z) = z$  (oben) und  $f(z) = (z - 1)/(z + 1)$  (unten) und ihre Modifikation.

Auf der Homepage of Visual Quantum Mechanics [13] stellt die Universität Graz ein umfangreiches mit Mathematica erstelltes Softwarepaket vor, mit dem man komplexwertige Funktionen, Lösungen der Schrödinger- und der Diracgleichung und weitere Sachverhalte veranschaulichen kann. Abb. 24 stellt eines der dokumentierten Beispiele dar.

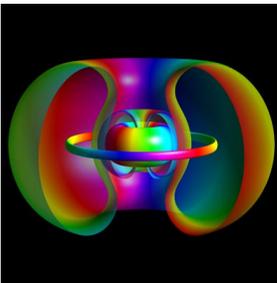


Abb. 24.  
Zustand des Wasserstoffs ( $n=4, l=2, m=2$ , aus [13]).

Abschließend soll anhand zweier Beispiele noch einmal die Schönheit der Phasenporträts in den Mittelpunkt gestellt werden (s. Abb. 25, 26). Die wenig anspruchsvoll anmutende komplexe Funktion  $f(z) = \sin(1/z^2)$  führt zu einem interessanten Farbenspiel. Ästhetische Phasenporträts wesentlich anspruchsvollerer Funktionen, die mit dem Leben bekannter Mathematiker verbunden sind, publizierte Elias WEGERT (geb. 1955) mit Kollegen im Mathematikkalender “Complex Beauties“ bis einschließlich diesem Jahr [14]. Abb. 26 zeigt das Titelblatt von 2017.

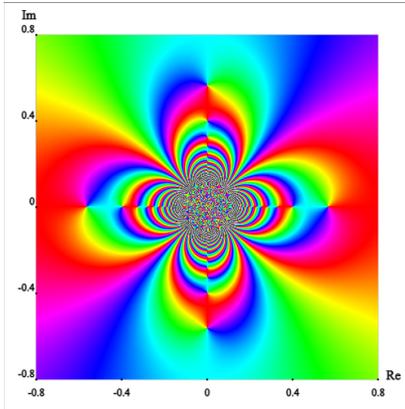


Abb. 25. Phasenporträt der Funktion  $f(z) = \sin(1/z^2)$ .

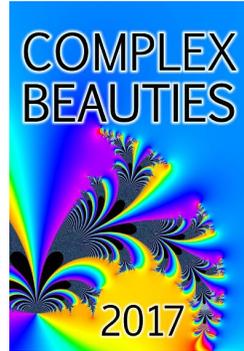


Abb. 26. Titelbild des Kalenderblatts von 2017 [14].

Im vorliegenden Beitrag wurden Farben dazu eingesetzt, berechnete Zusammenhänge zu veranschaulichen. Farben werden aber auch dazu verwendet, Luftbildaufnahmen und Satellitenbilder nachzubearbeiten und aufgenommenes infrarotes und ultraviolettes Licht in den sichtbaren Bereich zu transformieren. Auch bei der Thermographie nutzt man die Falschfarbendarstellung (s. [22]). Bei vielen bildgebenden Verfahren der Medizin, z.B. der Magnetresonanz- und der Röntgentomographie, setzt man die Farbcodierung dazu ein, die Graustufen der Aufnahmen durch unterschiedliche Farben zu repräsentieren. Da das menschliche Auge nur einige hundert Grautöne, aber etwa ein Million Farbnancen unterscheiden kann (s. [1, 15]), wird dadurch die Diagnostik entscheidend unterstützt.

## Anhang

### Anhang 1: Darstellung komplexer Zahlen in der Gauß'schen Zahlenebene

Komplexe Zahlen können in drei Formen in der GAUß'schen Ebene dargestellt werden. Dazu zeichnet man in der Ebene ein kartesisches Achsenkreuz und trägt auf der x-Achse die Realteile der komplexen Zahl in der üblichen Weise ab, auf der y-Achse die imaginären Zahlen mit  $i$  als Einheit ab (s. Abb. 27).

#### a) Arithmetische Form

Die komplexe Zahl  $z = a + b \cdot i$  besteht aus der Summe des Realteils  $a$  und des Imaginärteils  $b \cdot i$  mit der imaginären Einheit  $i = \sqrt{-1}$ . Diese Darstellung hat ihre Stärken bei der Addition und Subtraktion komplexer Zahlen:

$$z_1 \pm z_2 = (a_1 + b_1 \cdot i) \pm (a_2 + b_2 \cdot i) = (a_1 \pm a_2) + (b_1 \pm b_2) \cdot i$$

#### b) Trigonometrische Form

Die Darstellung  $z = r(\cos\varphi + i \cdot \sin\varphi)$  benötigt den Winkel  $\varphi$  zwischen dem Radius  $r$  der komplexen Zahl und der positiven reellen Achse (Phase bzw. Argument). Der Radius bzw. Betrag berechnet sich mit  $r = |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ .

Produkte können über die bekannten Additionstheoreme trigonometrischer Funktionen berechnet werden:

$$\text{werden: } z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos[\varphi_1 + \varphi_2] + i \cdot \sin[\varphi_1 + \varphi_2]).$$

Für Potenzen folgt daraus der wichtige MOIVRE'sche Formel:

$$z^n = r^n (\cos n\varphi + i \cdot \sin n\varphi), \text{ die auf Wurzeln erweitert werden kann.}$$

#### c) Exponentielle Form

Die Exponentialform  $z = r e^{i\varphi}$ , die sogenannte EULER'sche Darstellung, ergibt sich aus der Reihenentwicklung der trigonometrischen Form. Sie bewährt sich bei Produkten und Quotienten sowie beim Potenzieren und Radizieren. Den Radius gewinnt man wieder mit  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ ; das Argument aus der arithmetischen und der trigonometrischen Form mit

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} = \arctan \frac{b}{a}.$$

Als Beispiele sollen das Produkt zweier komplexer Zahlen und die  $n$ -te Potenz einer komplexen Zahl dienen:

$$z_1 z_2 = r_1 e^{i\varphi_1} \cdot r_2 e^{i\varphi_2} = r_1 r_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} \text{ und } z^n = r^n e^{in\varphi}.$$

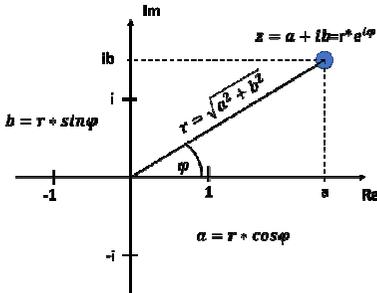


Abb. 27. Komplexe Zahlen in der GAUß'schen Ebene.

## Anhang 2: Vom RGB-Würfel zum HSL- und HSV-Zylinder

In diesem Anhang werden bewusst Gedanken des Hauptteils und des Artikels im Juli-Heft 2024 [15] nochmals aufgegriffen. Ziel ist es, den Zusammenhang zwischen dem RGB-Farbwürfel und den Zylindern des HSL- und HSV-Farbsystems aufzuzeigen. Dieser Zusammenhang muss in beide Richtungen eindeutig sein, damit die in beiden Farbsystemen erstellten Abbildungen auf Farbmonitoren, die im RGB-System erfolgt, korrekt erfolgen kann. Hier sollen nicht die Schritte der exakten mathematischen Ableitung im Mittelpunkt stehen, sondern die grundlegenden Ideen des Weges. Jedoch sollen die Umrechnungsvorschriften in ihren Grundzügen erfasst werden.

Abb. 28 stellt den Arbeitsauftrag bildlich dar. Es gilt also, die Koordinaten Rot, Grün und Blau in die Koordinaten Farbton (Hue), Sättigung (Saturation) und Dunkelstufe (Value) bzw. Helligkeit (Lightness) umzurechnen. Anlass ist, dass die Änderung des Farbtons, der Sättigung und der Helligkeit im RGB-System nicht intuitiv beschrieben werden kann.

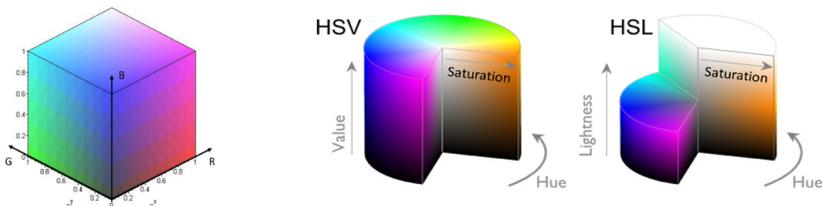


Abb. 28. Vergleich des RGB-Würfels mit dem HSL- und dem HSV-Farbzylinder (nach [10, 15]).

Zum Einstieg wählen wir den mit seiner Grauachse senkrecht auf der Projektionsfläche stehenden RGB-Farbwürfel (s. Abb. 28 und 29 sowie [15]). Beim Übergang

zum HSL-Farbsystems gilt es zunächst, den Würfel in eine Doppelpyramide bzw. einen Doppelkegel umzuformen. Danach erfolgt der Übergang zum Zylinder.

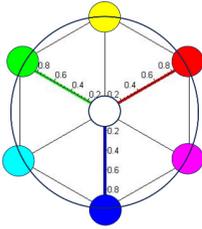


Abb. 29. Projektion des Farbwürfels in die Ebene.

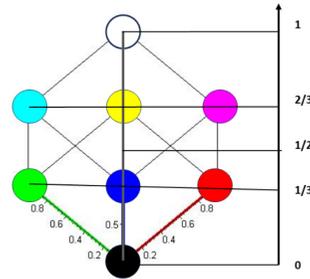


Abb. 30. Blick auf den Farbwürfel mit senkrechter Grauachse.

Die bei der Projektion des Farbwürfels das regelmäßigen Sechseck bildenden Farben liegen im Farbwürfel mit senkrechter Grauachse in unterschiedlichen Höhen (vergl. Abb. 29 und 30). Werden die Verbindungen dieser Farben zum mittleren Grau in eine gemeinsame Ebene geklappt, so entsteht eine Doppelpyramide. Formt man die gemeinsame sechseckige Basis zu einem Kreis um, indem die Kanten in Kreisbögen umgeformt werden, dann ergibt sich ein Doppelkegel (s. Abb. 31). Diese gemeinsame Basis beinhaltet den kontinuierlichen Übergang vom mittleren Grau zu den Farben des Farbkreises. Allerdings haben nicht alle Farben dieser Farbscheibe den gleichen Abstand vom Weiß- bzw. Schwarzpunkt. Weitet man diese Bezugspunkte zu Ebenen aus, dann wird dieser Mangel behoben (s. Abb. 28). Der Zylinder des HSL-Systems erlaubt es, Farben intuitiv auszuwählen und quantitativ zu beschreiben. Durch die Verformung des RGB-Würfels ist jedoch auch ein Nachteil entstanden: Im Farbkreis folgen Farben aufeinander, die wir als unterschiedlich hell empfinden. Im RGB-Würfel hatten z.B. die Farben Rot und Gelb wegen ihrer unterschiedlichen Abstände zum Schwarzpunkt unterschiedlich lange Ortsvektoren (s. [15]).

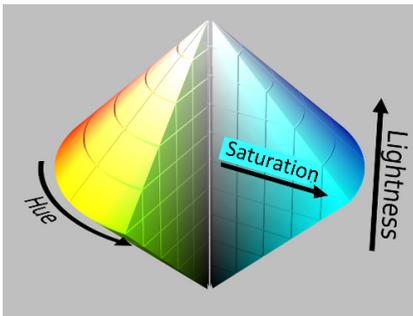


Abb. 31. Doppelkegel des HSL-Farbsystems (nach [10]).

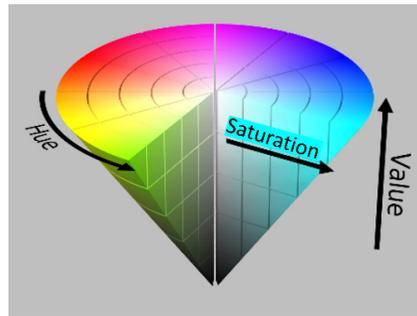


Abb. 32. Kegel des HSV-Farbsystems (nach [10]).

Um zum Farbkegel des HSV-Systems zu kommen, muss die Grauachse bei fixiertem Farbkreis so lange verschoben werden, bis der Weißpunkt im Zentrum der neuen Grundfläche des Kegels liegt. Diese Grundfläche veranschaulicht jetzt den kontinuierlichen Übergang vom Weiß zu den Farben des Grundkreises (s. Abb. 32). Der entsprechende Zylinder hat eine schwarze Grundfläche und eine farbige Deckfläche (s. Abb. 28).

### Betrachtungen zum Farbkreis; Farbton H

Der drastischste Schritt der Umformung des RGB-Würfels erfolgte auf dem Weg zum Farbkreis. Dies muss konsequenterweise zu aufwendigen Umrechnungsvorschriften führen (s. Gl. 1). Andererseits gewinnt man eine einfache Beschreibung des Farbverlaufs durch die Koordinate H, den Farbton.

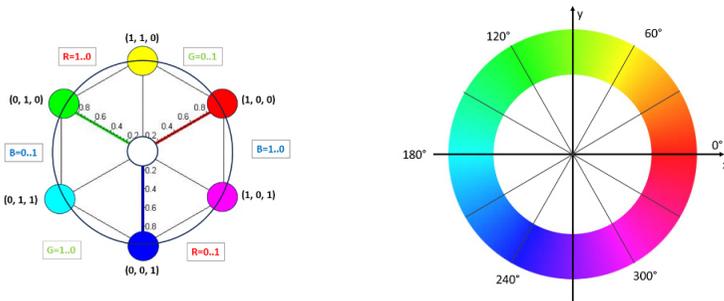


Abb. 33. RGB-Koordinaten im Vergleich zu Farbton H.

Abb. 33 vergleicht den Weg in RGB-Koordinaten und in der Koordinate Farbton H. Bei der RGB-Beschreibung wächst oder fällt je eine der Koordinaten im  $60^\circ$ -Intervall. Die Umrechnungen müssen diesen  $60^\circ$ -Rhythmus besitzen. Durch diese im Hintergrund erfolgenden Umrechnungen läuft der Farbton H kontinuierlich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ .

Auf dem Farbkreis liegen alle Farben, bei denen mindestens eine RGB-Koordinate den Wert 1 und andererseits mindestens eine den Wert Null hat: hat:  $\max(R, G, B) = 1$  und  $\min(R, G, B) = 0$ . So liegt z.B. der Punkt  $(1/2, 1, 0)$  auf dem Farbkreis, der Punkt  $(1/2, 1/2, 1)$  nicht darauf.

### Betrachtungen zu Sättigung S und Dunkelstufe V im HSV-System

Hier sollen nur die Farbverläufe auf der Deckfläche und dem Mantel des Zylinders näher betrachtet werden. Abb. 33 zeigt, dass die Dunkelstufe V auf dem Zylindermantel von Schwarz zum Farbkreis verläuft, in der Deckfläche die Sättigung S vom Weiß zum Farbkreis. Diese Wege wurden bereits im vorhergehenden Beitrag (s. [15]) beschrieben. Die dort dafür entwickelten Gleichungen können helfen, den Bezug zwischen beiden Koordinatensystemen aufzuzeigen.

Im RGB-Farbsystem galt für den Übergang vom Schwarzpunkt zum Farbpunkt:

$$\vec{F} = c \cdot \vec{F}_0 \text{ mit } c = 0..1.$$

Für den Übergang von einem Farbpunkt zum Weißpunkt gilt:

$$\vec{F} = (1 - w) \cdot \vec{F}_0 + w \cdot \vec{W} \text{ mit dem Weißanteil } w = 0..1.$$

Jetzt gilt  $V=0..1$  bzw.  $S=0..1$ .

Der Zusammenhang kann anhand der Umrechnungsvorschriften (s. Gln. 1) vom RGB- ins HSV-bzw. HSL-System offengelegt werden. Wir wählen als Beispiel eine Farbe zwischen Rot und Gelb auf dem Farbkreis:  $(R, G, B) = (1, v, 0)$  mit  $0 < v < 1$  und verfolgen ihren Weg vom Schwarz über den Farbkreis bis zum Weiß.

Ihre Farbkoordinate lautet  $H = v \cdot 60^\circ$ . Der Pfad auf dem Zylindermantel des HSV-Systems wird in RGB-Koordinaten durch den Übergang von  $(0, 0, 0)$  zu  $(1, v, 0)$  beschrieben:

$$(R, G, B) = (c, c \cdot v, 0) \text{ mit } c = 0..1.$$

Für den Weg auf der Deckfläche gilt:

$$(R, G, B) = (1 - w) * (1, v, 0) + w * (1, 1, 1) = (1, (1 - w) * v + w, w) \quad \text{mit } w = 0..1. \text{ Im HSV-System genügen } V = 0..1 \text{ und } S = 0..1.$$

Wendet man die Umrechnungsgleichungen an, so wird der Zusammenhang zwischen beiden Darstellungen offensichtlich (s. Gln. 1). Auf dem Zylindermantel gilt:  $\max(R, G, B) = c$  und  $\min(R, G, B) = 0$ , woraus mit  $V = \max(R, G, B)$  dann  $V = c$  folgt-

Auf der Deckfläche gilt:

$$\max(R, G, B) = 1 \text{ und } \min(R, G, B) = w,$$

woraus sich mit

$$S = (\max(R, G, B) - \min(R, G, B)) / \max(R, G, B)$$

dann  $S = 1 - w$  ergibt. Ein erfreuliches Ergebnis!

Umrechnung von RGB in HSV/HSL (nach [16])

Sei  $R, G, B \in [0, 1]$

$$MAX = \max(R, G, B), \quad MIN = \min(R, G, B)$$

$$H = \begin{cases} 0, & \text{falls } MAX = MIN \leftrightarrow R = G = B \\ 60^\circ \cdot \left(0 + \frac{G - B}{MAX - MIN}, \text{ falls } MAX = R \right) \\ 60^\circ \cdot \left(2 + \frac{B - R}{MAX - MIN}, \text{ falls } MAX = G \right) \\ 60^\circ \cdot \left(4 + \frac{R - G}{MAX - MIN}, \text{ falls } MAX = B \right) \end{cases}$$

*falls  $H < 0^\circ$ , dann  $H = H + 360^\circ$*

Gln. 1

$$S_{HSV} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad \text{falls } MAX = 0 \leftrightarrow R = G = B = 0 \\ \frac{MAX - MIN}{MAX}, \text{sonst} \end{array} \right\}$$

$$S_{HSL} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad \text{falls } MAX = 0 \leftrightarrow R = G = B = 0 \\ 0, \quad \text{falls } MIN = 1 \leftrightarrow R = G = B = 1 \\ \frac{MAX - MIN}{1 - |MAX + MIN - 1|}, \text{sonst} \end{array} \right\}$$

$$V = MAX$$

$$L = \frac{MAX + MIN}{2}$$

wobei  $H \in [0^\circ, 360^\circ]$  und  $S, V, L \in [0, 1]$

Gln. 1. Umrechnung der RGB-Koordinaten in das HSV- und HSL-Farbsystem (nach [16]).

Beim HSL-Farbsystem verläuft der Weg von der schwarzen Grundfläche über den Farbkreis zur weißen Deckfläche ausschließlich auf dem Zylindermantel (s. Abb. 34). Hier sind die beiden Gleichungen analog anzuwenden: Für  $L = 0.05$  gilt die erste Gleichung, danach die zweite für  $L = 0.5.1$ .

Mit  $L = (\max(R, G, B) + \min(R, G, B))/2$  folgt für den Übergang vom Schwarz zum Farbkreis  $L = c/2$  und im oberen Bereich  $L = (1 + w)/2$ .

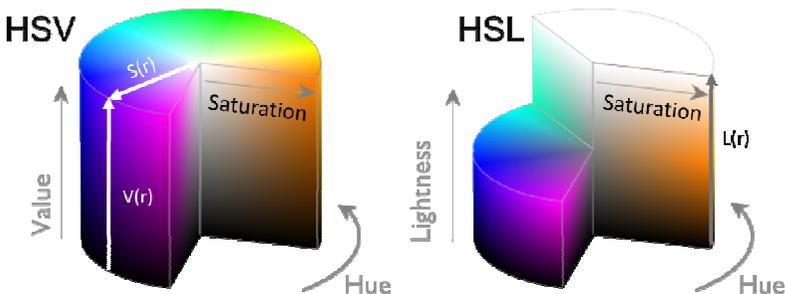


Abb. 34. Wege auf den Farbzylindern.

Tab. 1 beinhaltet für ausgewählte Farben die Koordinaten in allen drei betrachteten Farbsystemen. Dies unterstreicht noch einmal, dass es möglich ist, zwischen den drei Farbsystemen eindeutig umzurechnen.

Tab. 1. Farbkoordinaten ausgewählter Farben im HSV-, HSL- und RGB-System (nach [16]).

Farbe	H	S	V	H	S	L	R	G	B
Rot	0°	100%	100%	0°	100%	50%	100%	0%	0%
Grün	120°	100%	100%	120°	100%	50%	0%	100%	0%
Blau	240°	100%	100%	240°	100%	50%	0%	0%	100%
Gelb	60°	100%	100%	60°	100%	50%	100%	100%	0%
Cyan	180°	100%	100%	180°	100%	50%	0%	100%	100%
Magenta	300°	100%	100%	300°	100%	50%	100%	0%	100%
Weiß	-	0%	100%	-	-	100%	100%	100%	100%
Zinnober	15°	100%	100%	15°	100%	50%	100%	25%	0%
Braun	20°	75%	36%	20°	60%	22,5%	36%	18%	9%

Neben den vertrauten Farben liegt auch Zinnober auf dem Farbkreis; während Braun im Innern der Farbkörper liegt. Weiß nimmt aus zwei Gründen eine Sonderstellung ein: Lage in Zentrum der Deckfläche des HSV-Zylinders bzw. gesamte Deckfläche des HSL-Zylinders.

Ein Blick in das Innere der Farbkörper bestätigt, dass bei den Umrechnungen grundlegende Bezüge der Farben erhalten bleiben. Der Blick auf einen Schnitt durch den RGB-Würfel und den HSL-Doppelkegel zeigt dies beispielhaft (s. Abb. 35 und auch [15]).

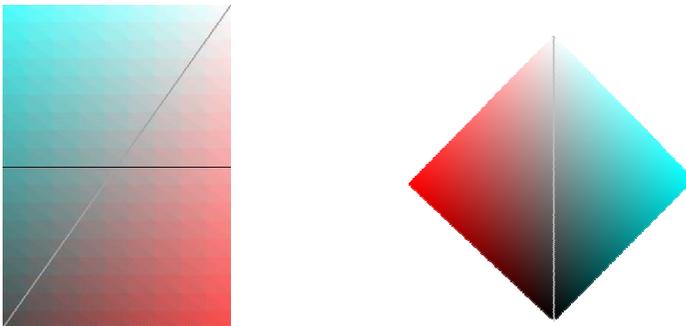


Abb. 35. Schnitt durch den RGB-Würfel und den HSL-Doppelkegel mit Rot, Cyan und Grauachse (s. auch [15]).

### Bezug zum Ostwaldschen Doppelkegel

Betrachtet man den Doppelkegel des HSL-Systems, so drängt sich ein Vergleich mit dem Doppelkegel des Farbsystems von Wilhelm OSTWALD (1853-1932) auf (s. Abb. 36).

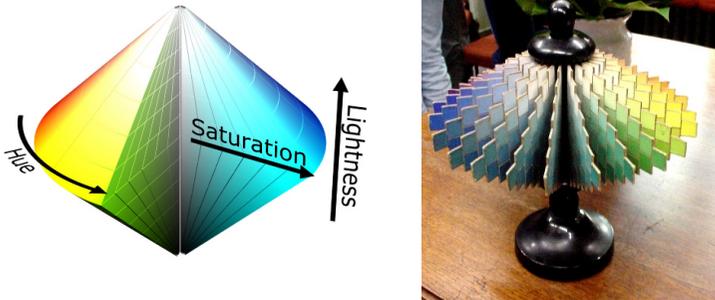


Abb. 36. Vergleich des HSL- und des Ostwald-Doppelkegels.

Das HSL-Farbsystem wurde erst in den 1970er Jahren entwickelt, während W. OSTWALD seinen Doppelkegel bereits in seiner Farbenfibel über 50 Jahre zuvor vorstellte (s. [17]). W. OSTWALD versuchte bereits, einen Zusammenhang zwischen den trichromatischen Koordinaten des Young-Helmholtz-Systems und seinen Koordinaten Vollfarbe V, Weißgehalt W und Schwarzgehalt S zu finden [18, S. 211]. Sein Gedankengang war, wie sich später herausstellte, allerdings nicht schlüssig [19]. Jedoch gelang es Manfred RICHTER (1905-1990) noch zu OSTWALDs Lebzeiten, nachzuweisen, dass es einen solchen Zusammenhang tatsächlich gibt. Auf den Vorleistungen von Robert LUTHER (1868 (greg.)-1945) aufbauend, zeigte er zwei Wege auf, die Farbanteile  $v$ ,  $w$ ,  $s$  aus den trichromatischen Koordinaten  $R$ ,  $G$ ,  $B$  zu berechnen [19, 20]. Damit war der Traum Wilhelm OSTWALDs erfüllt, sein Farbsystem an das gebräuchlichste Farbsystem seiner Zeit anzuschließen. Jedoch ist der umgekehrte Weg, von den Vollfarb-, Weiß- und Schwarzanteilen einer Pigmentfarbe zu den  $(R, G, B)$ -Koordinaten, nicht möglich [19]. Noch heute greifen wir zu technischen Hilfsmitteln: Scannen der Farbprobe und Bestimmen der RGB-Werte mit Computerhilfe (s. z.B. [21]).

### **Danksagung**

Dr. Jürgen BÖHM und Dr. Wolfgang MEILER haben mich mit anregenden Diskussionen in meinem Anliegen bestärkt.

Mit seinem Vortrag „Farben aus mathematischer Sicht“ beim 146. Ostwald-Gespräch im September 2023 regte Dr. Matthias KUDRA zu diesem Beitrag an.

### **Literatur**

- [1] GOLDSTEIN, E. B.: Wahrnehmungspsychologie. 2. Aufl. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akad. Verl., 2002.

- [2] RADEMACHER, S.; RIEGER, W.; OEHME, W.: Deterministisches Chaos: studiert mit Kugelbahn und Magnetpendel. Poster DPG-Tagung Münster, 2011.
- [3] Maplesoft: Mathematics, Modeling, Simulation; [www.maplesoft.com](http://www.maplesoft.com)
- [4] RADEMACHER, S.: Besondere Lernleistung im Fach Physik „Untersuchung des Deterministischen Chaos an Magnetpendel und Kugelbahn“. Geschwister-Scholl-Gymnasium Taucha, 2010.
- [5] MANDELBROT, B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, 1987, 2001.
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot-Menge>
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mathematica>
- [8] <https://de.maplesoft.com>
- [9] KOFLER, M., BITSCH, G., KOMMA, M.: Maple: Einführung, Anwendung, Referenz. 5. Aufl. Pearson Studium, 2002.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/HSL\\_and\\_HSV](https://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV)
- [11] <https://complex-analysis.com/content/domain-coloring.html>
- [12] <https://tesertcode.github.io/DC.html>
- [13] <https://vqm.uni-graz.at/gallery.html>
- [14] <https://blogs.hrz.tu-freiberg.de/mathekalender/>
- [15] OEHME, W.: Vom Spektrum des weißen Lichts zu den RGB- und CMY-Farben. Mitt. Wilhelm-Ostwald-Ges. 29 (2024), 1, S. 8-32.
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/HSV-Farbraum>
- [17] OSTWALD, W.: Die Farbenfibel. 2.-3., verb. Aufl. Leipzig: Unesma, 1917.
- [18] OSTWALD, W.: Die Farbenlehre. Bd. 2. Physikalische Farbenlehre. Leipzig: Unesma, 1919.
- [19] RICHTER, M.: Die Transformation der trichromatischen Koordinaten einer Farbe auf Ostwaldkoeffizienten. Z. f. techn. Physik (1931), Nr. IIa, S. 582 - 587.
- [20] LUTHER, R.: Aus dem Gebiet der Farbreiztechnik. Z. f. techn. Physik 8 (1927), S. 540 - 558.
- [21] OSTWALD, W.: Die Farbenfibel. Mit einem Nachwort von Eckhard Bendin. Berlin: Favoritenpresse, 2023.
- [22] <https://de.wikipedia.org/wiki/Falschfarben>

## Metall-organic frameworks by vapor deposition process

Alexander John Cruz<sup>1</sup>

### Abstract

NANOSCIENCE AND ENGINEERING have become the skeletal framework of materials innovation. Processing at these *nano*-scales has led to high-performance materials to meet growingly demanding commercial specifications of advanced products – electronics, telecommunications, food science, medicine, cosmetics, chemical processing, energy and industrial technology, *etc.* Metal-organic frameworks (MOFs) are a subclass of porous materials comprising inorganic metal-containing nodes connected by polytopic organic linkers and are gaining attention in materials science. With diverse properties such as high specific surface areas, periodicity, and chemical diversity, MOFs have earned their place in the research and development roadmaps of gas storage and transport, catalysis, molecular separations, and, recently, electronic devices. MOF thin film fabrication methods compatible with production facilities are prerequisites to integrating these materials into electronic devices. This work employs the chemical vapor deposition (CVD) and molecular layer deposition (MLD) processes to grow MOF layers entirely from the vapor phase. Spatial uniformity, coating quality, and precise control are advantageous attributes of CVD and MLD. The study enabled by this work – reported in the form of a dissertation, tackles the *chemistry lab-to-cleanroom* approach: from mechanistic insights unraveled by various techniques to process development and scale-up. Through the *lab-to-fab* transition, this work contributes to fully exploiting the colossal potential of MOFs in solid-state devices.

THE RAPID miniaturization of electronic device components **requires cutting-edge materials**. By processing at very small dimensions (*i.e.*,  $10^{-9}$  a meter), nanotechnology paved the way for better everyday-life consumer products [1-3]. An important challenge in materials engineering is **processing, controlling, and fine-tuning the chemistry and physical properties of these nanovoids**. In this context, porous materials have garnered tremendous interest within the academic community and industry due to their exceptional gas sorption performances, catalytic capabilities, and other captivating features for various application fields [4]. Microporous materials with measurable porosities are important in this family of constituents.

**METAL-ORGANIC FRAMEWORKS** are comprised of metal-based nodes (ions or clusters) and organic multitopic ligands [5-9]. These building blocks are connected

---

<sup>1</sup> Dr. Alexander John CRUZ received the Wilhelm Ostwald Young Talent Award 2023 for his dissertation entitled, “Metal-organic frameworks by vapor deposition processes”. A short version of his lecture from March 2024 is printed here. This material is an excerpt based on the original dissertation of Dr. CRUZ, completed in April 2021, with KU Leuven (Belgium) and Vrije Universiteit Brussel (Belgium) in collaboration with imec.

by coordination bonds, creating open (crystalline)<sup>2</sup> frameworks exhibiting potential voids [4]. **MOFs possess desired characteristics such as very high specific surface areas<sup>3</sup> and functionalizable pore interiors** [13], which makes them prime candidates for gas storage [14], molecular separations [15], and catalytic [16, 17] applications. One subclass of MOFs, which has garnered substantial limelight for its potential industrial applications, is the **zeolitic imidazolate framework (ZIF)** family. It shares the zeolite topologies (*e.g.*, sodalite topology, space group  $I43m$  for ZIF-8) [19] with the transition metals (*e.g.*, iron, cobalt, copper, and zinc), forming coordination bonds with imidazolate rings. ZIFs are well-recognized in the arena for their thermal and chemical stability, making them attractive for many potential applications [20, 21]. ZIF-8, a MOF material consisting of  $Zn^{2+}$  centers connected by 2-methylimidazolate (mIM) ligands [20], is one canonical example. In this work, MOF vapor processing will be developed using ZIF as a base case. Throughout the study, evidence will be provided to showcase that the method and protocols can be extended to a broader class of MOFs for various industrially relevant applications.

### ***Vapor deposition processes: basic concepts of CVD and ALD***

While solution deposition processes prove to be a simple and efficient method to deposit MOF films and layers, there is a pressing need to explore vapor deposition technologies to gain better control over the MOF thin film fabrication process, among the previously mentioned advantages. **Physical vapor deposition (PVD)** is a process of transferring material from a source or target to another surface, usually by a stimulus, such as heating or through high-energy modes such as laser, electron beam, or ionized gas (plasma), typically under low pressure or vacuum conditions. **Chemical vapor deposition (CVD)** is known to be one of the *workhorses* in microfabrication and semiconductor technology [22-24], is a method based on the formation of a deposit *via* gas-phase reaction or coating enabled by surface reactions. The coating process is enabled by generally simultaneously introducing gaseous precursors to form layers in a precisely controlled manner. Over the past decades, the catalog of CVD materials evolved from inorganics and metals to organics and hybrid materials. The scope of R&D work diversified from precursor and materials development to equipment design and process engineering [25, 26]. A subclass of CVD is **atomic layer deposition (ALD)**, a method based on surface reactions of two or more vaporized precursors supplied alternately either as functions of time (temporal ALD), space (spatial ALD), or a combination thereof [27].

### ***Vapor deposition of MOF thin films***

Chemical solution deposition methods in MOFs are widely implemented for simplicity, cost, and flexibility. Nonetheless, some shortcomings are still related to scalability, *e.g.*, substrate swelling, corrosion, and large-area layer inhomogeneity.

<sup>2</sup> MOFs are not necessarily crystalline; this subject has opened up to a diverse field of amorphous MOFs [10, 11].

<sup>3</sup> Reported Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area up to  $7800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ .<sup>12</sup>

Besides chemical handling and large waste volumes, solvents remaining in the final product can result in reliability issues [28]. These are only a few challenges circumvented by vapor phase methods [28-30], which have been gaining attention in MOF deposition science for electronic device applications (**Table 1**) [31].

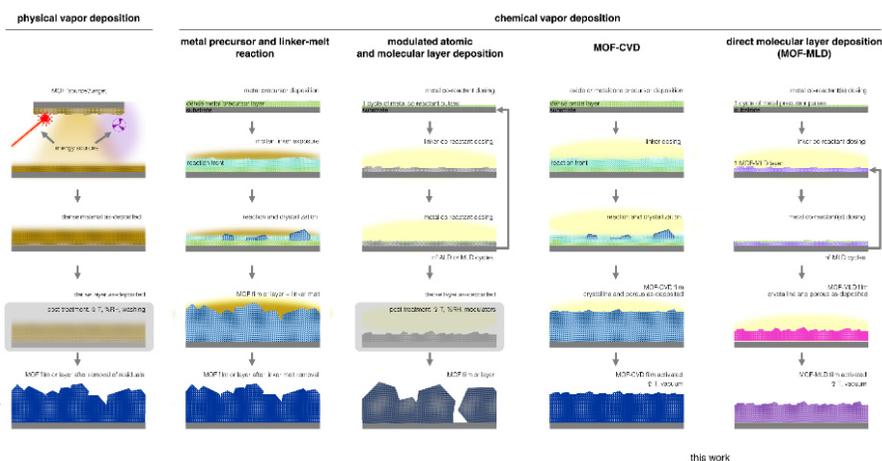
The **chemical vapor deposition of MOFs**, herein we will refer to as **MOF-CVD**, is a technique used to deposit MOFs *via* chemical vapor deposition. MOF-CVD is a two-step process that typically starts with (1) a precursor, deposited in a vapor phase, such as CVD or ALD, followed by (2) exposure to the organic linker vapor. In the case of ZIF-8, MOF-CVD started with a vapor deposition of ZnO followed by an exposure to a 2-methylimidazole (HmIM) linker vapor. Several researchers have adopted the MOF-CVD process to prepare gas separation membranes [32-34], gas sensors [35, 36], microextraction coatings [37], catalysts [38], energy storage devices [39, 40]. The genericity of the method applied to other materials has also been demonstrated with a showcase of chemically diverse MOFs [29, 40-43]. Despite the established versatility *via* other materials and the multitude of potential high-value applications [29, 44, 45]. This work aims to provide insights into these questions in MOF-CVD and the transformation to a layer-by-layer process that will benefit future MOF formulations and related vapor deposition processes.

**Table 1. MOF vapor deposition.** Partially adapted from NELIS, J. Molecular Layer Deposition of ZIF Films Towards Integrated Applications. *KU Leuven (M.Sc.). Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen*, 2019 [46].

	Key features	Advantages	Drawbacks
Physical vapor deposition	Material is transferred to the substrate by heating or <i>via</i> an energy source (pulsed laser, plasma, <i>etc.</i> )	Relatively simple deposition chemistries as bulk-synthesis methods can be used for the MOF source.	Processability issues due to MOFs' thermal instability at relatively higher temperatures (decomposition at > 300-500 °C)
Chemical vapor deposition	Precursors are mixed in the vapor phase; growth rate: 0.5-20 nm s <sup>-1</sup> ; vacuum growth is possible.	Typical in the industry, extensive literature available, wide-array of chemistries	Few layers of material are challenging; nm-level control in composition strata is rather challenging to attain
Atomic and molecular layer deposition	Alternating, self-limiting surface reactions; growth rate: a few nm s <sup>-1</sup> in the ideal scenario	Conformal coatings on complex and fragile structures; control over film thickness and composition (with depth) can be achieved	Often a lengthy process (thermal ALD and related variants), reported studies have yet to demonstrate proof or confirmation of micro-porosity.

## MOF-CVD: Scalability, reproducibility, and control

This work aims to establish vapor-phase deposition of MOF layers as a (1) **scalable**, (2) **reproducible**, and (3) **precisely controlled** process toward extending the integration of these materials within solid-state devices (**Fig. 1**). With a focus on solvent-free deposition, many approaches to fabricate and characterize MOF films have been established, demonstrating controllable thicknesses, tunable degrees of preferential orientation, and novel deposition strategies (*i.e.*, the addition of modulator templates). These efforts, however, remain at the proof-of-concept stage in laboratory-scale dimensions and production. In this work, the strategy to fill this void is carried out in a two-fold approach: first, **this work aims to draw the key fundamentals of the vapor-phase MOF deposition**. Secondly, these learnings are synthesized to enable **process scale-up, robustness and reproducibility assurance**, and **protocol fine-tuning and control**.



**Fig. 1.** Schematic of the general types of the vapor deposition processes of MOF layers on a surface (substrate/support). This list covers the vapor deposition technologies of prime interest in this work; therefore, the collection is non-exhaustive and broadly encompassing. This work focuses on the last two processes, MOF-CVD and MOF-MLD.

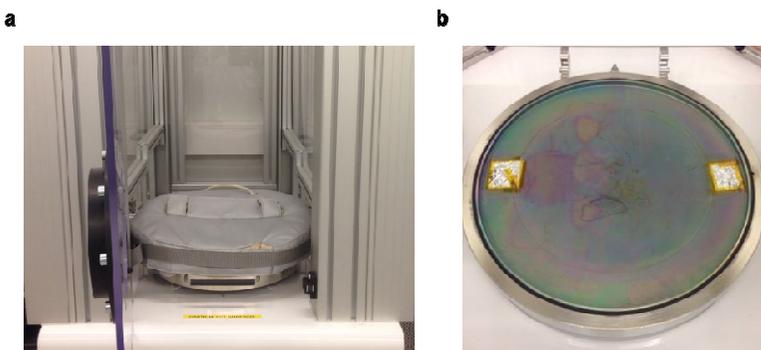
Upgrading a laboratory-scale experiment from traditional wet lab techniques to a cleanroom-compatible, large-scale system is not trivial. This work establishes the integration of the two-step MOF-CVD process as a cleanroom unit operation. Substantial technological upgrades are implemented using a modified MOF-CVD reactor (**Fig. 3**), optimized for *in situ* metrology with high-temporal resolution. One of the major achievements of this work is the demonstration of the integrated processing and characterization platform for the MOF-CVD method of ZIF-8. This optimized cleanroom protocol results in smooth, pinhole-free, and homogeneous thin films on full 200 mm industry-standard wafers under relatively mild conditions. A standardized deposition protocol is developed to regulate the water content

(relative humidity) in the reactor atmosphere. This protocol enables us to pinpoint the importance of temperature and humidity control on the deposition of high-quality films over large-area coatings.



**Fig. 2.** A high-level overview of the work conducted in this study.

The resulting MOF layer characteristics are further fine-tuned using various types of metal precursors and treatments, *e.g.*, water vapor exposure and annealing of atomic layer deposited (ALD) oxide, sputtered, doped metal oxide, as well as exploiting the molecular layer deposition process for alternative precursors such as “metalcones”. Both process and chemical understanding of the precursor chemistry completes the MOF-CVD process chart, enabling a reproducible and robust MOF deposition process toward meeting semiconductor device-grade precision. This narrative provides a glimpse of the available surface chemistries, extending our traditional ALD ZnO precursor to other available materials and methods common in production facilities.



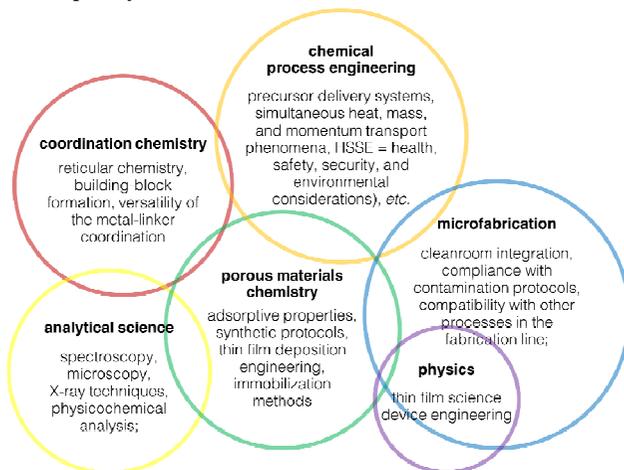
**Fig. 3. MOF-CVD-MLD reactor.** Photograph of **a**, the closed reactor with the heating jacket and **b**, the chuck/reactor base (open). These photographs of the reactor were captured under safe conditions, *i.e.*, non-operational system cleanroom maintenance, as exhibited by the blocked inlet and outlet lines in **b**.

Finally, MOFs' direct molecular layer deposition (MLD) is showcased, achieving a precisely controlled coating process in a layer-by-layer fashion using vaporized precursors. With ZIF-8 as a prototypical case, the successive reactions of water, diethylzinc, and 2-methylimidazole vapor are assembled into an MLD cycle yielding films that [i] exhibit crystallinity in the as-deposited condition, [ii] are porous after a mild (heating under vacuum, < 150 °C) activation step, [iii] can be fabricated in a cleanroom-compatible reactor, and [iv] without requiring separate post-deposition treatments, *i.e.* conversion of a fully-amorphous layer *via* reactive crystallization. The growth mechanism of the MLD of ZIF-8 is unraveled using various thin film characterization techniques and will facilitate an expanded catalog of new MOF-MLD chemistries.

### General Conclusions

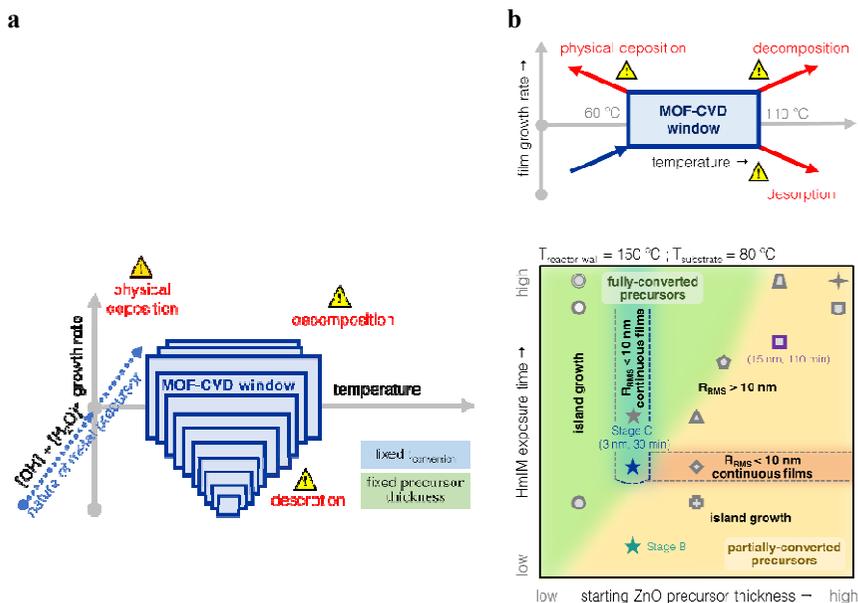
PRIMARILY DRIVEN BY THE FIELD'S INTERDISCIPLINARY NATURE, the research advancements in MOF-thin film processing combine various fields (**Fig. 4**). The importance of this multifaceted, integrative approach is imperative in facilitating the commercial viability of MOF-based device manufacturing. As evidenced in this work, every chapter is the product of a partnership between various departments, universities, research institutes, and the industry (suppliers and equipment manufacturers). As a result, the research strategy in this study was three-fold:

- [1] Fundamental understanding of MOF thin film growth and mechanistic insights on vapor-phase deposition
- [2] Translation to large-scale systems, and
- [3] Process refinement, fine-tuning, and control of the MOF thickness, composition, and quality.



**Fig. 4.** The interrelated gamut of (non-exhaustive) cross-disciplines involved in this series of studies (forming the dissertation).

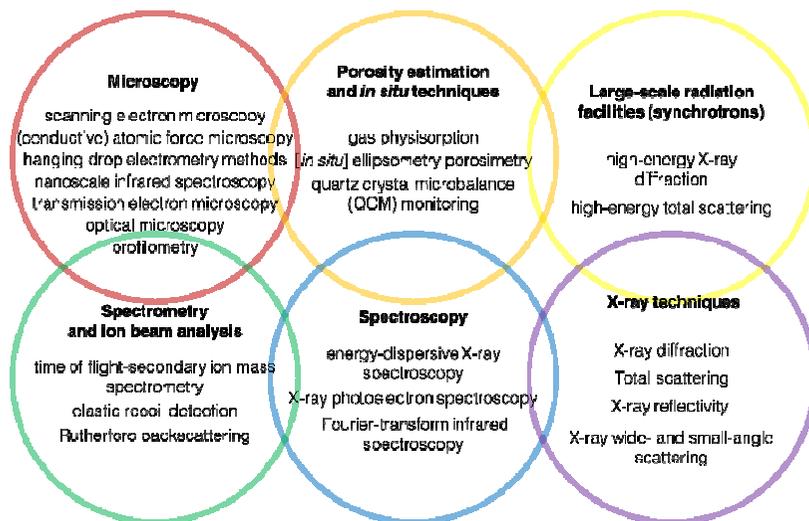
The first phase of the work focused on solving the unanswered questions in MOF-CVD, including the process and mechanistic insights and the impact of reactor parameters, using ZIF-8 ( $\text{Zn}^{2+}$  connected *via* 2-methylimidazolate linkers), a widely studied MOF material, as a test case. Brief aspects of **reactor engineering** (e.g., delivery systems, heater configurations, dosing recipes, integration in cleanroom installations, contamination protocol development, safety and environmental features) were found to be critical when converting the integrated MOF-CVD process from lab-scale to a high-throughput system.



**Fig. 5.** a, MOF-CVD window shows the interplay of temperature and b, nature of precursors on the growth rate (or extent of conversion) for a fixed linker exposure time and at a specified precursor thickness. *Cruz, Ameloot, et al., Chem. Mater.* 2019, **31**, 22, 9462-9471, adapted with permission. Copyright 2019 American Chemical Society.

Based on insights unraveled by the experimental process, aided by a range of analytical techniques, **MOF-CVD protocols were extended to various MOFs of different metal nodes and several functional linkers** such as **ZIF-67** ( $\text{Co}^{2+}$  metal nodes connected by 2-methylimidazolate linkers), **ZIF-72** (a non-porous polymorph of ZIF-71,  $\text{Zn}^{2+}$  metal center connected by 4,5-dichloroimidazole, dCIM linkers<sup>47</sup>), **CuBDC**, and **CuCDC** ( $\text{Cu}^{2+}$  centers connected *via* 1,4-benzenedicarboxylic acid and 1,4-cyclohexanedicarboxylic acid linkers, respectively). Precursor diversification is attained by **varying the type of deposition** (sputtered ZnO), **post-processing** (annealing of ALD ZnO and employing humidified conditions), and **compositional diversification** (Al-doped ZnO, AZO and molecular

layer deposition of zircones) [48]. With a strategic combination of multiple characterization techniques (both *in situ* and *ex situ*, often including large-scale facilities such as synchrotrons), the influence of the properties of inorganic (ZnO, *etc.*) and hybrid precursors (zircones) on the conversion rate, morphology, and porosity of the resulting ZIF-8 layers was evaluated. A correlation between precursor **hydroxylation degree** and growth (conversion) kinetics is established. This work also underscores the accelerating effect of water vapor (*i.e.*, rougher films as a result of crystallite ripening) and the impact of reaction byproducts in the ZnO-to-ZIF-8 transformation process (*i.e.*, water *versus* ethylene glycol and glycerol).



**Fig. 6.** Sets of interrelated analytical techniques are employed in this work, in addition to the preparation methods necessary to carry out the characterization (*e.g.*, metal deposition, focused-ion beam ‘slicing’, lithography). In most cases, these analytical techniques are combined.

The second phase of the work focuses on transforming **the MOF-CVD into a molecular layer deposition (MLD) process**—a protocol comprised of self-limiting reactions through alternating doses of precursors. For the test case of ZIF-8, diethylzinc, water, and 2-methylimidazole were used as precursors. Complementary combinatorial characterization data such as AFM imaging, electron microscopy, spectroscopy, synchrotron radiation, gravimetric metrology, optical techniques, and electrical characterization were consolidated, resulting in insights into the MOF-MLD process. As a bottom-up approach of MOF deposition *via* the layer-by-layer process, MOF-MLD overcomes the limitations of previously demonstrated methods (*e.g.*, susceptibility to process self-inhibition when thicker metal precursor layers are used, nm-resolution over the deposition process).

Advantageous features of MOF-MLD over solution-based processes include the nm-level thickness control, the excellent conformality of the coatings, the combinable routes with MOF-CVD to improve layer homogeneity, and the potentially higher throughputs (wafer per hour) when integrated as a unit operation in micro-fabrication. Importantly, for both MOF-CVD and MOF-MLD, the unraveled insights are products of the expanded toolbox of **analytical techniques to characterize MOF thin films (Fig. 6)**.

### *Future perspectives*

RESEARCH on MOF properties and the industry-relevant applications (*e.g.*, catalysis, adsorption, energy storage, membrane separations) have flourished over the last two decades [49-51]. Emerging niches in electronic devices evolve as MOF thin film deposition methods, processing, and integration routes advance [52, 53]. Envisaged to meet the increasingly demanding specifications of electronic devices, the future of MOFs in nanofabrication relies on the compatibility of the deposition processes with existing production facilities [53]. Therefore, R&D work on a fundamental understanding of the physicochemical properties and the engineering methods to fabricate MOF thin films should be carried out hand-in-hand [54]. The latter implies transitioning from a typical lab-based synthetic protocol to a clean-room unit operation. With the available tools and resources at our disposal, the temporal gap between exploratory work and advancement in MOF materials processing is contracting at a fast pace. As we are only in the embryonic stage of the research interest in MOF-based electronic devices, commercial-scale developments are envisaged to open up at various scales.

### *Science communication: bringing the research to life and making it accessible to the masses*

AN IMPORTANT PILLAR OF THIS WORK WAS FOCUSED ON SCIENCE COMMUNICATION. Apart from the scientific and technical conferences, various efforts were exerted to disseminate science in various societal contexts. These initiatives were specifically designed to cater to the needs of the masses, policymakers, large public institutions, financial firms (*e.g.*, banks and public investment funds), and corporations. Some examples of these initiatives may be accessed here:

- Breaking the Wall of Nanomaterials in Gas Sensors | *Falling Walls*  
<https://falling-walls.com/remote2020/finalists/breaking-the-wall-of-nanomaterials-in-gas-sensors/>.
- A dog's nose in your smartphone | 2 -minute video showcase about the use of MOFs for gas sensors by *Science Figured Out*  
<https://www.sciencefiguredout.be/dogs-nose-your-smartphone>
- Een hondenneus in je smartphone | *EOS Wetenschap*  
<https://www.eoswetenschap.eu/technologie/een-hondenneus-je-smartphone>

- 日常设备中的狗鼻子：采用透气材料化学制成的新一代气体感应器  
*Dog's Nose in Your Everyday Devices: Next Generation Gas Sensors Enabled by Porous Materials Chemistry*  
<https://hklaureateforum.org/en/dogs-nose-in-your-everyday-devices-next-generation-gas-sensors-enabled-by-porous-materials-chemistry>

It is with true interdisciplinary work in science that we can achieve success and realization of the benefits and impact of innovation to society. Finally, converting a lab-bench technology to a commercial-scale process is a daunting task. This work, along with many others, braved to address this challenge—as MOF-based device fabrication unfolds its bright future.

## References

- [1] GRAHAM, S. J. H.; IACOPETTA, M.: Nanotechnology and the emergence of a general purpose technology. *Annals of economics and statistics* 31 (2014).
- [2] Handbook of nanomaterials properties. Heidelberg, Berlin: Springer, 2014. doi:10.1007/978-3-642-31107-9.
- [3] PENG, G. et al.: Diagnosing lung cancer in exhaled breath using gold nanoparticles. *Nature Nanotechnology* 4, 669-673 (2009).
- [4] FURUKAWA, H.; CORDOVA, K. E.; O'KEEFFE, M.; YAGHI, O. M.: The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science* 341, 1230444-1230444 (2013).
- [5] JAMES, S. L.: Metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews* 32, 276 (2003).
- [6] JANIÁK, C.: Engineering coordination polymers towards applications. *Dalton Trans.* 2781-2804 (2003) doi:10.1039/B305705B.
- [7] KITAGAWA, S.; KITAURA, R.; NORO, S.: Functional porous coordination polymers. *Angewandte Chemie International Edition* 43, 2334-2375 (2004).
- [8] ROWSELL, J. L. C.; YAGHI, O. M.: Metal-organic frameworks: a new class of porous materials. *Microporous and Mesoporous Materials* 73, 3-14 (2004).
- [9] FÉREY, G.: Hybrid porous solids: past, present, future. *Chem. Soc. Rev.* 37, 191-214 (2008).
- [10] BENNETT, T. D.; CHEETHAM, A. K.: Amorphous metal-organic frameworks. *Acc. Chem. Res.* 47, 1555-1562 (2014).
- [11] BENNETT, T. D.: Structure and properties of an amorphous metal-organic framework. *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010).
- [12] HÖNICKE, I. M. et al.: Balancing mechanical stability and ultrahigh porosity in crystalline framework materials. *Angewandte Chemie International Edition* 57, 13780-13783 (2018).
- [13] STASSEN, I. et al.: Chemical vapour deposition of zeolitic imidazolate framework thin films. *Nature Materials* 15, 304-310 (2016).

- [14] BORDIGA, S. et al.: Adsorption properties of HKUST-1 toward hydrogen and other small molecules monitored by IR. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **9**, 2676-2685 (2007).
- [15] GUERRERO, V. V.; YOO, Y.; MCCARTHY, M. C.; JEONG, H.-K.: HKUST-1 membranes on porous supports using secondary growth. *J. Mater. Chem.* **20**, 3938-3943 (2010).
- [16] HUANG, Y. et al.: Palladium nanoparticles supported on amino-functionalized metal-organic frameworks as highly active catalysts for the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction. *Catalysis Communications* **14**, 27-31 (2011).
- [17] LEE, J. et al.: Metal-organic framework materials as catalysts. *Chem. Soc. Rev.* **38**, 1450-1459 (2009).
- [18] YOON, M.; SRIRAMBALAJI, R.; KIM, K.: Homochiral metal-organic frameworks for asymmetric heterogeneous catalysis. *Chemical Reviews* **112**, 1196-1231 (2012).
- [19] PARK, K. S. et al.: Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**, 10186-10191 (2006).
- [20] ESLAVA, S. et al.: Metal-organic framework ZIF-8 films as low- $\kappa$  dielectrics in microelectronics. *Chemistry of Materials* **25**, 27-33 (2012).
- [21] BUTOVA, V. V.; SOLDATOV, M. A.; GUDA, A. A. et al.: Metal-organic frameworks: structure, properties, methods of synthesis and characterization. *Russian Chemical Reviews* **85**, 280-307 (2016).
- [22] Handbook of semiconductor manufacturing technology. *CRC Press* <https://www.crcpress.com/Handbook-of-Semiconductor-Manufacturing-Technology/Nishi-Doering/p/book/9781574446753>.
- [23] DOBKIN, D.; ZURAW, M. K.: *Principles of chemical vapor deposition*. (Springer Netherlands, 2003). doi:10.1007/978-94-017-0369-7.
- [24] ITRS 2.0 Home Page. *International Technology Roadmap for Semiconductors* <http://www.itrs2.net/>.
- [25] PIERSON, H. O.: *Handbook of chemical vapor deposition, 2. Ed. Principles, technology and applications*. (William Andrew, 1999).
- [26] CHOY, K.-L.: *Chemical vapour deposition (CVD): advances, technology and applications*. (CRC Press, 2019).
- [27] GEORGE, S. M.: Atomic layer deposition: an overview. *Chemical Reviews* **110**, 111-131 (2010).
- [28] STASSEN, I.; DE VOS, D.; AMELOOT, R.: Vapor-phase deposition and modification of metal-organic frameworks: state-of-the-art and future directions. *Chemistry. A European Journal* **22**, 14452-14460 (2016).
- [29] KRISHTAB, M. et al.: Vapor-deposited zeolitic imidazolate frameworks as gap-filling ultra-low-k dielectrics. *Nature Communications* **10**, 3729 (2019).
- [30] STASSEN, I. et al.: An updated roadmap for the integration of metal-organic frameworks with electronic devices and chemical sensors. *Chemical Society Reviews* **46**, 3185-3241 (2017).

- [31] MUÑOZ-ROJAS, D. et al.: Spatial atomic layer deposition (SALD), an emerging tool for energy materials. Application to new-generation photovoltaic devices and transparent conductive materials. *Comptes Rendus Physique* **18**, 391-400 (2017).
- [32] PAKNAMEH, N.; FATEMI, S.; RAZAVIAN, M.: EPD method of seeding nano ZnO followed by CVD of organo-linker; a step by step method for synthesis of ZIF-8 thin layer on tubular  $\alpha$ -alumina. *Materials Chemistry and Physics* **235**, 121764 (2019).
- [33] MA, X. et al.: Zeolitic imidazolate framework membranes made by ligand-induced permselectivation. *Science* **361**, 1008-1011 (2018).
- [34] LI, W. et al.: Ultrathin metal-organic framework membrane production by gel-vapour deposition. *Nature Communications* **8**, 406 (2017).
- [35] YOUNG, C. et al.: Controlled chemical vapor deposition for synthesis of nanowire arrays of metal-organic frameworks and their thermal conversion to carbon/metal oxide hybrid materials. *Chemistry of Materials* **30**, 3379-3386 (2018).
- [36] XU, P.; LIU, M.; LI, X. et al.: Multi-dimensional multi-level sensing nanostructure for high-performance detection to trace-level dopamine molecules. In: *2017- 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)* 762-765 (2017).
- [37] ROCÍO-BAUTISTA, P. et al.: Solid-phase microextraction coatings based on the metal-organic framework ZIF-8: Ensuring stable and reusable fibers. *Talanta* **215**, 120910 (2020).
- [38] HUANG, C.-W. et al.: Metal-organic frameworks: preparation and applications in highly efficient heterogeneous photocatalysis. *Sustainable Energy & Fuels* **4**, 504-521 (2020).
- [39] LI, Y. et al.: High performance nanoporous carbon microsupercapacitors generated by a solvent-free MOF-CVD method. *Carbon* **152**, 688-696 (2019).
- [40] AMER, W. A. et al.: Physical expansion of layered graphene oxide nanosheets by chemical vapor deposition of metal-organic frameworks and their thermal conversion into Nitrogen-doped porous carbons for supercapacitor applications. *ChemSusChem* **n/a**.
- [41] STASSIN, T. et al.: Vapor-phase deposition of oriented copper dicarboxylate metal-organic framework thin films. *Chem. Commun.* **55**, 10056-10059 (2019).
- [42] STASSIN, T. et al.: Solvent-free powder synthesis and thin film chemical vapor deposition of a Zinc bipyridyl-triazolate framework: solvent-free powder synthesis and thin film chemical vapor deposition of a Zinc bipyridyl-triazolate framework. *Eur. J. Inorg. Chem.* **2020**, 71-74 (2020).
- [43] STASSIN, T. et al.: Solvent-free powder synthesis and MOF-CVD thin films of the large-pore metal-organic framework MAF-6. *Chem. Mater.* **32**, 1784-1793 (2020).

- [44] LU, G.; HUPP, J. T.: Metal-organic frameworks as sensors: a ZIF-8 based Fabry-Pérot device as a selective sensor for chemical vapors and gases. *Journal of the American Chemical Society* **132**, 7832-7833 (2010).
- [45] ESLAVA, S. et al.: Metal-organic framework ZIF-8 films as low- $\kappa$  dielectrics in microelectronics. *Chem. Mater.* **25**, 27-33 (2013).
- [46] Molecular layer deposition of Zeolitic imidazolate framework films towards integrated applications - KU Leuven. [http://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay/32LIBIS\\_ALMA\\_DS71221157000001471/KULeuven](http://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay/32LIBIS_ALMA_DS71221157000001471/KULeuven).
- [47] TU, M. et al.: Direct X-ray and electron-beam lithography of halogenated zeolitic imidazolate frameworks. *Nature Materials* **20**, 93-99 (2021).
- [48] PENG, Q.; GONG, B.; VANGUNDY, R. M.; PARSONS, G. N.: “Zincone” zinc oxide-organic hybrid polymer thin films formed by molecular layer deposition. *Chemistry of Materials* **21**, 820-830 (2009).
- [49] SHEKHAH, O.; LIU, J.; FISCHER, R. A.; WÖLL, C.: MOF thin films: existing and future applications. *Chem. Soc. Rev.* **40**, 1081-1106 (2011).
- [50] BÉTARD, A.; FISCHER, R. A.: Metal-organic framework thin films: from fundamentals to applications. *Chemical Reviews* **112**, 1055-1083 (2012).
- [51] KIRCHON, A.; FENG, L.; DRAKE, H. F. et al.: From fundamentals to applications: a toolbox for robust and multifunctional MOF materials. *Chem. Soc. Rev.* **47**, 8611-8638 (2018).
- [52] STASSEN, I. et al.: An updated roadmap for the integration of metal-organic frameworks with electronic devices and chemical sensors. *Chem. Soc. Rev.* **46**, 3185-3241 (2017).
- [53] ALLENDORF, M. D.; SCHWARTZBERG, A.; STAVILA, V.; TALIN, A. A.: A roadmap to implementing metal-organic frameworks in electronic devices: challenges and critical directions. *Chemistry. A European Journal* **17**, 11372-11388 (2011).
- [54] STASSEN, I.; DE VOS, D.; AMELOOT, R.: Vapor-phase deposition and modification of metal-organic frameworks: state-of-the-art and future directions. *Chemistry. A European Journal* **22**, 14452-14460 (2016).

## Die amerikanisch-*englische* Studentenvereinigung Leipzig von 1890-1909 und Chemiestudenten als Mitglieder in den Jahren 1903-1905

Lothar Beyer

Die akademische Ausbildung und der berufliche Werdegang des bedeutenden amerikanischen Chemikers George Victor SAMMET (1880-1958) (Abb. 1), Doktorand von Wilhelm OSTWALD und Robert LUTHER von 1903 bis 1905, wurde durch eine rege geführte Korrespondenz des Autors (LB) mit seinen Nachkommen, der Enkelin Frau Priscilla SAMMET und deren Sohn Chuck DIMEGLIO erschlossen und publiziert [1]. Persönliche Kontakte mit dem Ehepaar Chuc DIMEGLIO und Shelly DIMEGLIO (Abb. 2) im September 2023 in Leipzig vertieften das Interesse an der Thematik „amerikanische Chemiestudenten in Leipzig“. George Victor SAMMET wurde im Mai 2024 postum in die internationale „Plastic Hall of Fame“ aufgenommen [2] (Abb. 3).

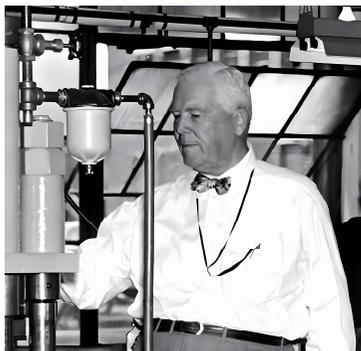


Abb. 1. George Victor SAMMET (1880-1958) [Foto privat].



Abb. 2. Shelly und Chuc DIMEGLIO 2023 vor dem Wilhelm-Ostwald-Institut [Foto: L. BEYER].



Abb. 3. Nachkommen von George Victor SAMMET im Jahre 2023 vor seiner Stele in der Hall of Fame/USA [Foto privat].

G. V. SAMMET und andere amerikanische Studenten, die in dieser Zeit am Institut bei dem späteren Nobelpreisträger Wilhelm OSTWALD studierten und forschten, gehörten in Leipzig dem „Klub der amerikanischen und englischen Studenten“ an. Dieser bildete ein Komplement zur akademisch-universitären Ausbildung, indem er die sozialen Kontakte und die gegenseitige Unterstützung zwischen den Mitgliedern der Vereinigung förderte. Diese Kontakte waren nachhaltig und für ihre spätere wissenschaftliche und berufliche Tätigkeit in den USA ebenso nützlich wie ihre fachliche Ausbildung in Deutschland. Über den Aufenthalt nordamerikanischer Wissenschaftler im 19. / anfangs des 20. Jahrhundert an der Universität Leipzig, besonders in Wilhelm OSTWALDs Laboratorium, wird auch in den Publikationen [3-8] informiert.

## **Der Klub der amerikanischen und englischen Studenten an der Universität Leipzig**

### Die erste Phase um 1890-1899

Im Universitätsarchiv Leipzig befindet sich eine Akte [9], in der dokumentiert ist, dass ein erster „Verein der amerikanischen Studenten an der Universität Leipzig“ bereits im Jahre 1890 beantragt und vom Universitätsrichter bestätigt worden ist. Der stud. phil. Georg Stuart COLLINS aus „New Rochelle, Amerika“ (im Staat New York) erschien am 29.01.1890 im zuständigen Universitätsgericht und übergab zwei Exemplare eines Statuts mit der Geschäftsordnung, zusammen 14 Seiten handschriftlich, und einem Mitgliederverzeichnis (ist nicht mehr vorhanden). Am 04.12.1890 reichte der Schriftführer des Vereins, B. L. HARPER, Änderungen zum Statut ein. Etwa ein Jahr später, am 13.12.1891, belegt eine Notiz, dass der Schriftwart F. A. BLACKBURN ankündigte, dass der Verein „sine die“ vertagt würde. Um diese Zeit waren die Chemiestudenten Arthur Amos NOYES und Samuel Parsons MULLIKEN, der Vater des 1966 mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Robert MULLIKEN sowie F. FOX Jr., H. P. TALBOT, und A. H. GILL in Leipzig. Arthur Amos NOYES [10], der ursprünglich ins Laboratorium zu Johannes WISLICENUS wollte, entschied sich dann aber für Wilhelm OSTWALD und wurde 1890 bei ihm am Physikalisch-Chemischen Institut mit der Schrift „Über die gegenseitige Beeinflussung von dissociierten Körpern“ sehr erfolgreich promoviert. Samuel Parsons MULLIKEN [11] wurde bei Johannes WISLICENUS am Chemischen Laboratorium 1890 „Über die Konstitution der Chlorzimsäuren“ [12] promoviert. So ist anzunehmen, wenn auch durch den Verlust der Mitgliederliste nicht belegbar, dass sie diesem Verein angehörten und A. A. NOYES seine Schüler später dazu motivierte, sich bei ihrem Bildungsaufenthalt in Leipzig in ähnlicher Weise zusammen zu schließen. Folgende amerikanische Chemiker waren in der letzten Dekade des 19. Jahrhunderts an der Universität Leipzig eingeschrieben [5]: BAER, Samuel Harold (Promotion 1898 bei WISLICENUS); BANCROFT, Wilder Dwight (Prom. 1892 bei OSTWALD); BUCKINGHAM, Edgar (Prom. 1893 bei OSTWALD); BURNS, Peter Samis (Prom. 1893 bei WISLICENUS); FRIEDEL, Charles (Prom 1895 bei WIEDEMANN); GILL, August Herman (Klub-Mitglied, Prom. 1890 bei WISLICENUS); GOODWIN,

Harry Manly (Prom. 1894 bei WIEDEMANN); HULETT, George August (Prom. 1899 bei OSTWALD); MORGAN, J. Livingstone Rutgers (Prom. 1895 bei OSTWALD); MULLIKEN, Samuel Parsons (Prom. 1890 bei WISLICENUS); NOYES, Arthur Amos (Prom. 1890 bei OSTWALD); SMITH, William August (Prom. 1898 bei LE BLANC); STEWART, Andrew (Klub-Mitglied, Prom. 1895 bei WISLICENUS); SULLIVAN, Eugene Cornelius (Prom. 1899 bei OSTWALD); TALBOT, Henry Paul (Prom. 1890 bei WISLICENUS); TOWER, Olin Freeman (Prom. 1895 bei OSTWALD); TREVOR, Joseph Ellis (Prom. 1892 bei BEHRENDIS); WAKEMAN, John Alfred (Klub-Mitglied, Prom. 1894 bei VON MEYER); WHITNEY, Willis Rodney (Prom. 1896 bei OSTWALD).

### Die zweite Phase von 1900 bis 1909

Am 15. November 1899 richtete der amerikanische stud. ling. rec. Rudolf TOMBO jr. [13] in deutscher Sprache ein Schreiben [14, S. 2]. „*An das hochlöbliche Universitäts-Gericht der Universität Leipzig*“ mit folgendem Inhalt: „*Der unterzeichnete Verein bittet ergebenst um Genehmigung beiliegender Statuten. American Studenti Club of the University of Leipzig*“. Am 16. November 1899 wurde der Eingang bestätigt und die Nachreichung eines Mitgliederverzeichnisses erbeten. Bereits am 4. Januar 1900 wurde das Statut vom Universitätsrichter Dr. MUETZGEN vorbehaltlich der Zustimmung des Rektors der Universität genehmigt. „*Am 10. Januar 1900 hat Seine Magnifizenz, Herr Geheimer Hofrat Dr. Kirchner seine Zustimmung zur Genehmigung der Statuten erteilt*“ [14, S. 3]. Damit war die Gründung dieser studentischen Vereinigung als eine „Studentische Körperschaft“ vollzogen. Das in deutscher [14, S. 3] und englischer Sprache [14, S. 4] (Abb. 4) abgefasste Statut des „Klubs der amerikanischen Studenten“ hat folgenden Wortlaut:

#### ***Statuten des Vereins amerikanischer Studenten***

##### I. Name und Zweck.

- a) Name: American Students' Club of the University of Leipzig.
- b) Der Verein bezweckt die an der hiesigen Universität studierenden Amerikaner in gesellschaftlicher und geistiger Beziehung enger zu verbinden.
- c) Fragen, die sich auf die deutsche oder amerikanische Politik beziehen, dürfen nicht zur Besprechung kommen.

##### II. Mitgliedschaft.

Amerikanische Studenten der Universität Leipzig werden als Mitglieder aufgenommen, nachdem sie die Statuten unterzeichnet haben.

##### III. Vorstand.

Der Vorstand des Vereins besteht aus a) einem Vorsitzenden (Patriarchen); b) einem zweiten und dritten Vorsitzenden (stellvertretenden Patriarchen), c) einem Schriftführer und Schatzmeister, die in der letzten Versammlung des Semesters auf ein Semester erwählt werden.

##### IV. Zeit und Ort der Versammlung.

Die regelmässigen Versammlungen des Vereins finden alle 14 Tage, sonnabends, um 8 ½ Uhr abends in einem von dem Verein zu bestimmenden Lokal statt. Die erste Versammlung des Semesters soll am zweiten Sonnabend nach der offiziellen Eröffnung des Semesters stattfinden. Keine Sitzung soll länger als 1 ¼ Stunden dauern.

#### V. Komitees.

Die folgenden Komitees werden vom ersten Vorsitzenden (Patriarchen) ernannt:

- a) ein Programm=Komitee, aus den Mitgliedern bestehend
- b) ein Komitee für „Mittel und Wege“ und Vereinslokal; zwei Mitglieder.
- c) ein Komitee für „Records“ aus zwei Mitgliedern bestehend.
- d) ein Empfangs=Komitee, aus drei Mitgliedern bestehend.

#### VI. Veränderungen.

Veränderungen oder Zusätze zu diesen Statuten können in jeder regelmässigen Versammlung des Vereins beantragt werden, müssen jedoch eine 2/3 Mehrheit erlangen, um in Kraft treten zu können

(angenommen den II/XI /99).

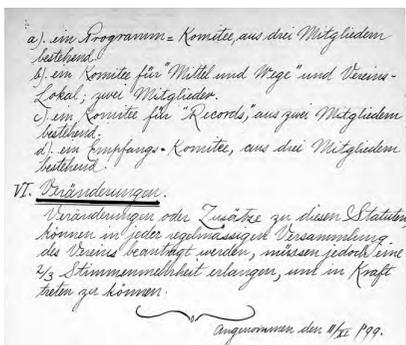
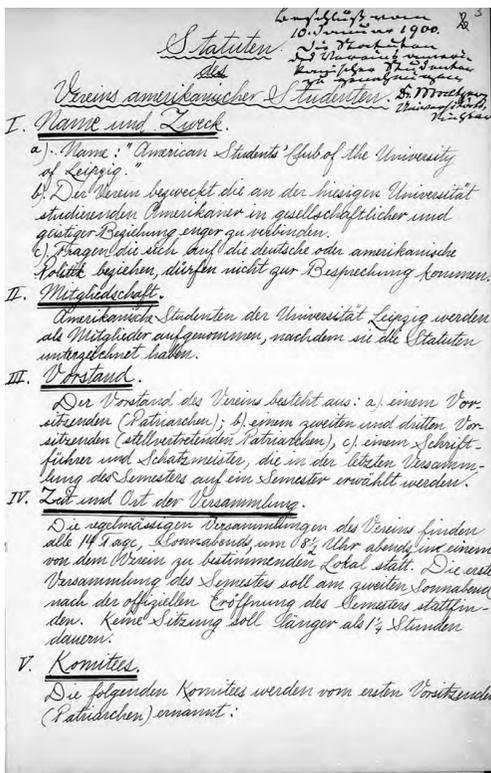


Abb. 4.  
Originalschrift des Statuts 1899/1900  
[14].

Am 29. Juni 1905 wurde einem Antrag, eingereicht vom Studenten MITCHEL beim Universitätsgericht, stattgegeben. Eine Aktennotiz dazu hat den Wortlaut: „Der Klub der amerikanischen Studierenden der Universität Leipzig hat seinen Namen und Verfassung insoweit geändert, dass auch die englischen Studierenden Mitglieder werden können. Der Klub heißt jetzt der Klub der amerikanischen und englischen Studenten der Universität Leipzig“ [14, S. 6].

Am 14. Dezember 1909 teilt der Rev. Burtis R. MAC HATTON, American-British-Church Leipzig, als ehemaliger Vorsitzender mit, dass der Amerikanisch-englische Studentenverein seit einem Semester nicht mehr existiert [14, S. 8]. Alle Akten sind in [14] (Abb. 5) im Universitätsarchiv Leipzig aufbewahrt.

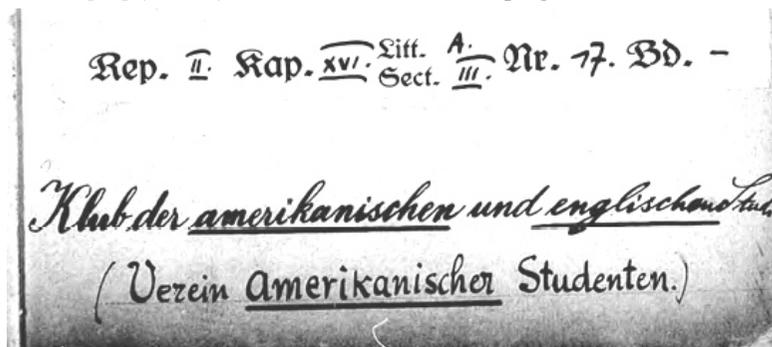


Abb. 5. Deckblatt der UAL-Akte.

Die eingeschriebenen Mitglieder des Clubs trafen sich im Sommersemester 1903 (20 Mitglieder, davon 5 Chemiker), Wintersemester 1903/04 (18 Mitglieder, davon 5 Chemiker) und WS 1904/05 (9 Mitglieder, davon 4 Chemiker) im Lokal des „Hotel Fürstenhof“ [15] (Abb. 6), im SS 1904 (18 Mitglieder, davon 5 Chemiker) und SS 1905 (15 Mitglieder, davon 9 Chemiker) in „Schiessers Restaurant“ [16] (Abb. 7a, b) zu ihren Diskussionsrunden, an denen mehrheitlich Studenten der Chemie und Philosophie teilnahmen, vereinzelt auch Studenten der Sprachwissenschaften, Medizin und Mathematik.



Abb. 6.  
Hotel Fürstenhof um 1900.



Abb.7a.  
Großer Saal in Schiessers  
Restaurant (Beyer-Haus)  
mit Rad-Leuchter.



Abb. 7b.  
Anzeige von Schiessers  
Restaurant im Leipziger  
Tageblatt 105. Jg., Nr.  
249 v. 8.9.1911.

Die Gebäude beider Lokalitäten sind bis heute in leicht veränderter Form erhalten. „Das Hotel Fürstenhof ist das älteste Luxushotel in Leipzig. Der Ursprungsbau Löhrs Haus am heutigen Tröndlinring 8 stammt aus dem Jahr 1771, seit 1890 wird es – verbunden mit mehreren Um- und Ausbauten – als Hotel betrieben. Seit 2018 ist das Haus im Besitz der Vicus Group AG, zudem war es Mitglied der Leipzig Hotel Alliance. Seit März 2021 ist das Hotel geschlossen [15]. Schiessers Restaurant (Kramer-Straße 4-6), heute Ernst-Beyer-Haus [16], hinter dem Gebäude der Stadtbibliothek, Wilhelm-Leuschner, gelegen, ist seit jeher eine typische Studentenkneipe mit sozio-kulturellem Ambiente.

In Abb.8 sind die im Wintersemester 1904/05 als Mitglieder eingetragenen Studenten verzeichnet [17]. George Victor SAMMET war in diesem Semester Patriarch und zur Annahme von Wertsendungen berechtigt. Die Mitgliederverzeichnisse des SS 1903 [18]; WS 1903/04 [19], SS 1904 [20] und SS 1905 [21] sind im Universitätsarchiv Leipzig aufbewahrt.

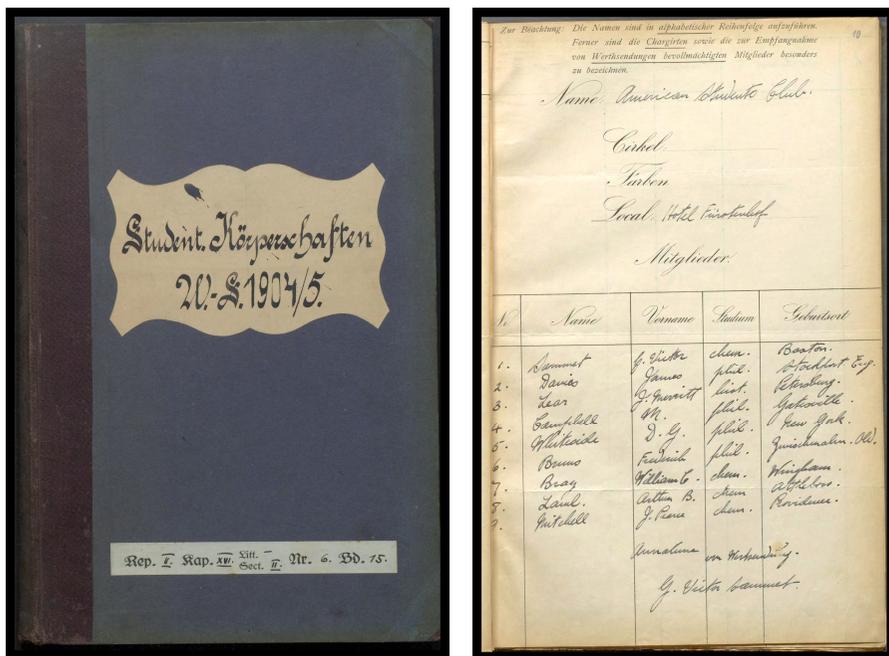


Abb. 8. Mitgliederliste im Wintersemester 1904/05 [21].

In den wöchentlich stattgefundenen Zusammenkünften wurde nicht nur diskutiert, sondern auch Bier, das übliche Studentengetränk, zu sich genommen. Es wurden spezielle Bierkrüge (Abb. 9) mit eingraviertem Klub-Namen „American-British students Club 1905“ (Abb. 10) angefertigt. Der Chemiestudent G. V. SAMMET hat sich den mit seinem Namen versehenen Bierkrug (Abb. 11, Abb. 9) bei der Rückkehr nach Boston mitgenommen. Die Bierkrüge bestanden aus „Kaiserzinn“ [22] (Abb. 12).



Abb. 9.  
 Bierkrug des stud. chem. G. Victor SAMMET (Privatbesitz).



Abb. 10.  
Gravur des Studenten-  
clubs auf dem Bierkrug.



Abb. 11.  
Gravur „George Victor  
Sammet“.



Abb. 12.  
Stempel „Kaiserzinn“ im Fuß des Bier-  
kruges.

## Chemiestudenten als Mitglieder des Klubs der amerikanisch-englischen Studenten von 1903 bis 1905

16 Chemiestudenten und 1 Student der Mineralogie gehörten im betrachteten Zeitraum dem Klub an. Sie werden in alphabetischer Folge genannt. 11 von ihnen wurden an der Universität Leipzig promoviert, davon 7 im Physikalisch-chemischen Institut (bei Prof. Wilhelm OSTWALD, Prof. Max LE BLANK, Prof. Robert LUTHER, Prof. Max BODENSTEIN), 3 im Ersten Chemischen Universitätslaboratorium (bei Prof. Arthur HANTZSCH) und 1 Student im Institut für Mineralogie (bei Prof. Ferdinand ZIRKEL). 10 der Studenten kamen aus den USA, 1 Student aus Kanada und 5 Studenten aus England.

BARDWELL, Fritz (Excelsior, USA); BRAY, William (Wingham, Can., Prom. 1905 Leipzig, bei OSTWALD); CALDWELL, Kenneth (Chestire, Engl., Prom. 1906 bei HANTZSCH); DYE, A. Vincent (Boston, USA); FINK, Colin (New Jersey, USA, Prom. 1907 bei LE BLANC); GLOVER, Walter (London, Engl, Prom. 1905 bei HANTZSCH); HIBBERT, Harold (Manchester, Engl., Prom. 1906 bei HANTZSCH); LAMB, Arthur (Attleboro, USA, Prom.1904 USA, T. W. RICHARDS, Harvard Univ.); LIND, Colville Samuel (McMinville, Tenn. USA, Prom. 1905 bei OSTWALD); MASIUS, Morton (Egg Harbor, USA, Prom. 1908 bei LE BLANC); MITCHEL, J. Pence (Providence, USA); MOORE, Clas (Manchester, Engl.); RUTTER, Thomas Francis (London, Engl., Prom. 1906 bei LUTHER); THATCHER, Charles (Easton, USA, Prom. 1903 bei OSTWALD/BODENSTEIN); SAMMET, Victor (Boston Mass, USA. Prom. 1905 bei OSTWALD/LUTHER); ZALINSKI, Edmond Robbins (Fort Monroe/Virginia, USA, Prom. 1903 bei ZIRKEL), ZEHNDER, Hillary (Duflon, Pa., USA).

Weitere amerikanische Chemiestudenten, die zwischen 1903 und 1905 nicht als Klubmitglieder eingetragen waren: BLANCHARD, Arthur Alfonso (Prom. 1902 bei OSTWALD); COTTRELL, Frederick Gardner (Prom. 1902 bei OSTWALD/LUTHER); ERNST, Charles (Prom. 1901 bei OSTWALD); FINDLEY, Alexander (Prom. 1900 bei OSTWALD), FOULK, Charles William (1899/1900 Klub-Mitglied); JACKSON, Henry Askew (1899/1900 Klub-Mitglied); JAFFÉ, George (Prom. 1903); MACDOUGALL, Frank Henry (Prom. 1908 bei LUTHER/BODENSTEIN); MORSE, Harry Wheeler (Prom. 1902 bei LUTHER); SILL, Herbert Fowler (Prom. 1905 bei LUTHER).

William BRAY [23], Colin FINK [24], Harold HIBBERT [25], Arthur LAMB [26], Samuel Colville LIND [27], Morton MASIUS [28] und Victor SAMMET [1] und andere haben nach ihrem Aufenthalt an der Universität Leipzig später in den USA Bedeutendes für die Entwicklung der Chemie geleistet und hohe Positionen in Universitäten, in der Industrie und in wissenschaftlichen Gesellschaften eingenommen: *"Of the American chemists who were at Leipzig at about that time, eleven were later elected to membership in the National Academy of Sciences (Wilder D. Bancroft, William C. Bray, Frederick G. Cottrell, George A. Hulett, Arthur B. Lamb, G. N. Lewis, S. C. Lind, A. A. Noyes, T. W. Richards, E. C. Sullivan, and Willis R. Whitney), and six became presidents of the American Chemical Society (Bancroft, Lamb, Lind, Noyes, Richards and Whitney)"* [27].

Sie hielten in den USA Kontakt miteinander, wie auch aus dem Zitat [25, S. 147] zu entnehmen ist: *"...At Leipzig, Hibbert became acquainted with a small group of American students who later became distinguished chemists in their homeland - W. C. Bray, Colin G. Fink, Arthur B. Lamb, and S. C. Lind. Hibbert valued and maintained their friendship, and in later years he was to have the honor of presenting the Perkin Medal of the American Section of the Society of Chemical Industry to Colin G. Fink,..."* Ein anderes Zitat belegt den nützlichen Kontakt, den William BRAY in Leipzig knüpfte [23, S. 14]: *"His traveling fellowship took him to Leipzig, to the school of Wilhelm Ostwald, where physical chemistry had been receiving its main impulse. .. In Leipzig, he met a number of American students, including Arthur B. Lamb, who later achieved professional distinction. Although at that time he was very much a Canadian, he joined the "American Colony Club." These contacts opened the way for an invitation in 1905 to join the remarkable group of young physical chemists, including such men as Gilbert N. Lewis, Richard C. Tolman, Edward B. Washburn, and Charles A. Kraus, gathered by Arthur A. Noyes at the Massachusetts Institute of Technology..."* Die Übersicht der amerikanischen Chemiker, die in den Zeiträumen um die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert an der Universität Leipzig studierten, zeigt, dass die Mehrzahl von ihnen bei Wilhelm OSTWALD arbeitete und von dessen Wissenschaftler-Persönlichkeit angezogen wurden. In einem Beitrag über Willis Rodney WHITNEY, OSTWALDS Doktorand 1896, heißt es aus der Sicht der amerikanischen Studenten zu Wilhelm OSTWALD, zit. in [4, S. 57]: *"Der angesehene Leipziger Professor für physikalische Chemie besaß alle die typischen Eigenschaften, die in der akademischen Welt, besonders in Amerika, Ende des 19. Jahrhunderts als Kennzeichen der Forschung und der wissenschaftlichen Gelehrsamkeit gefeiert wurde: Ostwald ließ die engen Grenzen der Chemie und der Physik weit hinter sich, und war ein umfassend gebildeter Mann in den Bereichen der Philosophie, Literatur, Psychologie, Linguistik und Landschaftsmalerei."*

Auf dem historischen Foto (Abb. 13), das im Jahre 1905 im Vorfeld anlässlich einer Feier im Physikalisch-chemischen Institut in Leipzig zum 25-jährigen Doktorjubiläum von Wilhelm OSTWALD entstanden ist, sind sechs der oben Genannten: S. Colville LIND (letzte Reihe, 1. von links), Fritz BARDWELL (letzte Reihe, 5. von links), G. Victor SAMMET (letzte Reihe, 6. von rechts), Colin FINK (rechts unter BARDWELL), William BRAY (3. Reihe, 2. von rechts) und Morton MASIUS (1. Reihe, 1. von rechts, sitzend) zu sehen.

George Victor SAMMET (Abb. 14), William Cronwell BRAY (Abb. 14) und Edmond Robbins ZALINSKI, waren in ihrer Leipziger Zeit persönlich miteinander befreundet und unternahmen in der vorlesungsfreien Zeit gemeinsam Bildungsreisen innerhalb Europas (Schweden, Griechenland, Montenegro, Schweiz, Italien) und in die Türkei. Nach ihrer Rückkehr in die USA blieben sie in Kontakt. G. Victor SAMMET berichtete in Briefen an seine Familie in den USA eindrucksvoll und im Detail über seine Reiseeindrücke. Priscilla SAMMET hat sie transkribiert und in der Schrift „Letters from Leipzig, 1904“ zusammenhängend bewahrt [29].



Abb. 13. Gruppenfoto von Schülern Wilhelm OSTWALDS im Jahre 1905 (Fotoarchiv der Fakultät für Chemie und Mineralogie, Univ. Leipzig).



Abb. 14. Gruppenfoto von Mitgliedern des Klubs der amerikanisch-englischen Studenten an der Universität Leipzig in Leipzig mit William BRAY (3. von links) und G. Victor SAMMET (5. von links) [Foto privat].



Abb. 15. Gruppenfoto von Mitgliedern des Klubs der amerikanisch-englischen Studenten an der Universität Leipzig in Leipzig 1905 mit Samuel Colville LIND (2. von links) und G. Victor SAMMET (6. von links) [Foto privat].

## Dank

Herrn Chuc DIMEGLIO/Mc Lean, Virginia/USA danke ich sehr herzlich für zahlreiche weiterführende Korrespondenzen, die Einsicht in Dokumente und die Überlassung von Fotografien für die Publikation (Abb. 1, 3, 9, 10, 11, 12, 14, 15). Frau Priscilla SAMMET gilt der Dank für die vorab gewährte Einsichtnahme in „Letters aus Leipzig“ [29].

Herrn Prof. Dr. Reiner SALZER, TU Dresden, danke ich herzlich für sachkundige Diskussionen, Hinweise und Literaturangaben und die Durchsicht des Manuskripts sowie die Abbildung 7b.

## Bibliografie

- [1] BEYER, L.: Die amerikanischen Chemiker Arthur Amos Noyes (1866-1936) und George Victor Sammet (1880-1958). Promotionen in Leipzig und berufliche Werdegänge. Teil I. Arthur Amos Noyes. Begründer der Physikalischen Chemie in den USA; Teil II. George Victor Sammet - erfolgreicher Industriechemiker und Unternehmer. Mitt. Wilhelm-Ostwald-Ges. 26 (2021), Nr. 1, Teil I, S. 53-65; Nr. 2, Teil II, S. 21-38.  
<https://www.wilhelm-ostwald.de/joomla/index.php/de/mitteilungen>. (Abruf: 08.07.2024).
- [2] <https://plasticshof.org/members/dr-g-victor-sammet-sr/> (Abruf: 08.07.2024).
- [3] SERVOS, J. W.: Physical chemistry from Ostwald to Pauling. The making of science in America, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1996.
- [4] HANSEL, K.: Nordamerikanische Wissenschaftler im Laboratorium Wilhelm Ostwalds in Leipzig. Mitt. Wilhelm-Ostwald-Ges. 8 (2003), Nr. 4, S. 48-57; <https://www.wilhelm-ostwald.de/joomla/index.php/de/mitteilungen?start=40> (Abruf: 08.07.2024).

- [5] WERNER, A.: The transatlantic world of higher education: Americans at German universities, 1776-1914. New York, NY: Berghahn, 2013.
- [6] JONES, P. R.: Bibliographie der Dissertationen amerikanischer und britischer Chemiker an deutschen Universitäten, 1840-1914. Veröffentlichungen des Forschungsinst. des Dt. Museums für die Geschichte der Naturwiss. und der Technik, München, 1983. <https://archive.org/details/bibliographieder00jone> (Abruf: 08.07.2024).
- [7] SPILCKE-LISS, C.-G.: Der Wirkungskreis von Wilhelm Ostwalds Leipziger Schule der physikalischen Chemie: Ein Beitrag zur Disziplinengese der physikalischen Chemie mit Forscherstammtafeln. Freiberg: Drei Birken, 2009.
- [8] GEYER, B.; MICHEL, D.: Geschichte der Physik an der Universität Leipzig. Bd. III. Stuttgart: Hückel, 2023.
- [9] Universitätsarchiv Leipzig, UAL.
- [10] SHERILL, M. S.: A. A. Noyes 1866-1936. Proc. Amer. Acad. Arts and Sciences 74 (1940), Nr. 6, S. 150-155; [https://archive.org/details/sim\\_daedalus\\_1940-11\\_74\\_6/page/150/mode/2up](https://archive.org/details/sim_daedalus_1940-11_74_6/page/150/mode/2up) (Abruf: 08.07.2024).
- [11] DAVIS, T. L.: Samuel Parsons Mulliken (1864-1934). Proc. Amer. Acad. Arts and Sciences 70 (1936) Nr. 10, S. 560-565; [https://archive.org/details/sim\\_daedalus\\_1936-03\\_70\\_10/page/560/mode/2up](https://archive.org/details/sim_daedalus_1936-03_70_10/page/560/mode/2up) (Abruf: 08.07.2024).
- [12] MULLIKEN, S. P.: Über die Konstitution der Chlorzimtsäuren. Diss. Univ. Leipzig, 1890. (UBL, Sign. Org. Chem. 200-e(K)).
- [13] LERG, Ch. A.: Universitätsdiplomatie: Wissenschaft und Prestige in den transatlantischen Beziehungen 1890-1920. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2019.
- [14] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_03\_A\_17
- [15] [https://de.wikipedia.org/wiki/Hotel\\_Fürstenhof\\_\(Leipzig\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Hotel_Fürstenhof_(Leipzig)) (Abruf: 06. 07. 2024).
- [16] <https://www.leipzig.travel/de/poi-detailseite/poi/infos/beyerhaus/> (Abruf: 15. Jan. 2022).
- [17] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_2\_6\_Bd\_15.
- [18] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_2\_6\_Bd\_12.
- [19] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_2\_6\_Bd\_13.
- [20] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_2\_6\_Bd\_14.
- [21] Universitätsarchiv Leipzig, UAL\_Rep\_2\_16\_2\_6\_Bd\_16.
- [22] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kayserzinn> (Abruf: 15. Jan. 2022).
- [23] HILDEBRAND, J. H.: William Crowell Bray (1879-1946). Biographical Memoirs 1951, p. 12-24. Washington, DC. Nat. Acad. Sci. of the USA. Nat. Acad. Press, 1958; <https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/bray-william-c.pdf> (Abruf: 06. 07. 2024).
- [24] <https://www.electrochem.org/fink>: Colin G. Fink-The Electrochemical Society, ECS, President 1921-1947 (Abruf: 16. Jan. 2022).
- [25] WOLFROM, M. C.: Harold Hibbert (1877-1945). Biographical Memoirs. Vol.?, p. 146-180. Nat. Acad. Sci. of the USA. Washington, DC: Nat. Acad. Press, 1958; <https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/hibbert-harold.pdf> (Abruf: 06. 07. 2024).

- [26] KEYES, F. G.: Arthur Becket Lamb (1880-1952). Biographical Memoirs. Vol. ?, p. 200-234. Nat. Acad. Sci. of the USA. Washington, DC: Nat. Acad. Press, 1956; <https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/lamb-arthur.pdf> (Abruf: 06. 07.2024).
- [27] LAIDL, K. J.: Samuel Colville Lind (1879-1965). Biographical Memoirs Vol. 74. Nat. Acad. Sci. of the USA. Washington, DC: Nat. Acad. Press, 1998; <https://nap.nationalacademies.org/read/6201/chapter/14#231> (Abruf: 08.07.2024), <https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/lind-samuel.pdf>.
- [28] [https://de.wikipedia.org/wiki/Morton\\_Masius](https://de.wikipedia.org/wiki/Morton_Masius) (Abruf: 09.07.2024).
- [29] SAMMET, P.: Letters from Leipzig, 1904.

## Autorenverzeichnis

Eckhard Bendin  
01237 Dresden  
eck.ben@online.de

Prof. Dr. Wolfgang Oehme  
04828 Bennowitz  
oehme@physik.uni-leipzig.de

Alexander John Cruz  
2800 Mechelen (Belgien)  
alexanderjohncruz@gmail.com

Prof. Dr. Lothar Beyer  
04416 Markkleeberg  
beyinorg@chemie.uni-leipzig.de

## Gesellschaftsnachrichten

### *Wir gratulieren*

#### zum **80.** Geburtstag

Herrn Prof. Dr. Rüdiger Kniep, 02.05.2025

#### zum **75.** Geburtstag

Herrn Dipl.-Ing. Volker Jonas, 07.02.2025

Herrn Prof. Dr. Georg Süß-Fink, 21.05.2025

Herrn Doz. Dr. habil. Wolfgang Meiler, 05.06.2025

Die Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V.  
trauert um ihr langjähriges Mitglied

**Prof. Dr. Dr. h. c. Karl-Heinz Thiele**

Er verstarb am 15.08.2024

Wir werden ihm stets ein ehrendes Andenken bewahren.

Die Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V.  
trauert um ihr langjähriges Mitglied

**Prof. Dr. Klaus Funke**

Er verstarb am 21.10.2024

Wir werden ihm stets ein ehrendes Andenken bewahren

## Weihnachts- und Neujahrswünsche des Vorstandes

Der Vorstand der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft e.V. dankt allen Mitgliedern, Freunden und Förderern für ihre Unterstützung und Mitarbeit im ausklingenden Jahr, wünscht frohe Weihnachtsfeiertage sowie ein gesundes, erfolgreiches und friedvolles Jahr 2025.

Prof. Dr. Bernd Abel

Dr. Michael Handschuh

Dr. Matthias Frieese

*„Eine vertiefte Kenntnis der Vergangenheit wird es uns ... erleichtern, den Weg in die Zukunft ohne allzu große Irrungen zu finden.“*

**(Wilhelm Ostwald:** Die Entwicklung der Elektrochemie in gemeinverständlicher Darstellung, 1910, S. 208)



**Wilhelm Ostwald:** Sassnitz, ohne Jahr.

© Gerda und Klaus Tschira Stiftung

## Autorenhinweise

**Manuskripte** sollten im A5-Format (Breite 14,8 cm und Höhe 21 cm) mit 1,5 cm breiten Rändern in einer DOC-Datei via E-Mail oder als CD-ROM eingereicht werden. Als Schriftform wählen Sie Times New Roman, 10 pt und einfacher Zeilenabstand. Schreiben Sie linksbündig, formatieren Sie keinen Text und keine Überschriften, fügen Sie Sonderzeichen via „Einfügen“ ein.

**Graphische Elemente und Abbildungen** bitte als jeweils eigene Dateien liefern.

Bei **Vortragsveröffentlichungen** ist die Veranstaltung mit Datum und Ortsangabe in einer Fußnote anzugeben.

Alle **mathematischen Gleichungen** mit nachgestellten arabischen Zahlen in runden Klammern fortlaufend nummerieren.

**Tabellen** fortlaufend nummerieren und auf jede Tabelle im Text hinweisen. Tabellen nicht in den Text einfügen, sondern mit Überschriften am Ende der Textdatei aufführen.

**Abbildungen** fortlaufend nummerieren, jede Abbildung muss im Text verankert sein, z.B. „(s. Abb. 2)“. Die Abbildungslegenden fortlaufend am Ende der Textdatei (nach den Tabellen) aufführen. Farbabbildungen sind möglich, sollten aber auf das unbedingt notwendige Maß (Kosten) beschränkt sein. Die Schriftgröße ist so zu wählen, dass sie nach Verkleinerung auf die zum Druck erforderliche Größe noch 1,5 bis 2 mm beträgt.

**Wörtliche Zitate** müssen formal und inhaltlich völlig mit dem Original übereinstimmen.

**Literaturzitate** in der Reihenfolge nummerieren, in der im Text auf sie verwiesen wird. Zur Nummerierung im Text arabische Zahlen in eckigen Klammern und im Verzeichnis der **Literatur** am Ende des Textes ebenfalls auf Zeile gestellte arabische Zahlen in eckigen Klammern.

1. Bei Monografien sind anzugeben: Nachnamen und Initialen der Autoren: Titel des Buches. Aufl. (bei mehrb. Werken folgt Bandangabe. Titel.) Verlagsort: Verlag, Jahr, Seite.

2. Bei Zeitschriftenartikeln sind anzugeben: Nachnamen der Autoren und Initialen (max. 3, danach - u.a.- getrennt durch Semikolon): Sachtitel. Gekürzter Zeitschriftentitel Jahrgang oder Bandnummer (Erscheinungsjahr), evtl. Heftnummer, Seitenangaben.

3. Bei Kapiteln eines Sammelwerkes oder eines Herausgeberwerkes sind anzugeben: Nachnamen und Initialen der Autoren: Sachtitel. In: Verfasser d. Monografie, abgek. Vorname (oder Herausgebername, abgek. Vorname (Hrsg.): Sachtitel des Hauptwerkes. Verlagsort: Verlag, Jahr, Seitenangaben.

Es folgen einige Beispiele:

### Literatur

[1] Ostwald, W.: Lehrbuch der allgemeinen Chemie. 2. Aufl. Bd. 1. Stöchiometrie. Leipzig: Engelmann, 1891, S. 551.

[2] Fritzsche, B.; Ebert, D.: Wilhelm Ostwald als Farbwissenschaftler und Psychophysiker. Chem. Technik 49 (1997), 2, S. 91-92.

[3] Franke, H. W.: Sachliteratur zur Technik. In: Radler, R. (Hrsg.): Die deutschsprachige Sachliteratur. München: Kindler, 1978, S. 654-676.

## Folgendes Informationsmaterial können Sie bei uns erwerben:

Ansichtskarten vom Landsitz „Energie“ (vor 2009)	0,50 €
Domschke, J.-P.; Lewandrowski, P.: Wilhelm OSTWALD. Urania-Verl., 1982	5,00 €
Domschke, J.-P.; Hofmann, H.: Der Physikochemiker und Nobelpreisträger Wilhelm OSTWALD: Ein Lebensbild. Bearb. u. aktual. Fassung. Sonderheft 23 der Mitt. Wilhelm-OSTWALD-Ges., 2022	10,00 €
Bendin, E.: Zur Farbenlehre. Studien, Modelle, Texte Dresden, 2010	34,00 €
Zu Bedeutung und Wirkung der Farbenlehre W. OSTWALDS Sonderheft zum 150. Geburtstag Wilhelm OSTWALDS Phänomen Farbe 23 (2003), September	5,00 €
Guth, P.: Eine gelebte Idee: Wilhelm Ostwald und sein Haus „Energie“ in Großbothen. Hypo-Vereinsbank Kultur u. Ges. München. Wemding: Appl. (Druck), 1999	5,00 €
Edition OSTWALD 1: Nöthlich, R.; Weber, H.; Hoßfeld, U. u.a.: „Substanzmonismus“ und/oder „Energetik“: Der Briefwechsel von Ernst Haeckel und Wilhelm OSTWALD (1910-1918). Berlin: VWB, 2006 (Preis f. Mitgl. d. WOG: 15,00 €)	25,00 € 15,00 €
Edition OSTWALD 2: „On Catalysis“ /hrsg. v. W. Reschetilowski; W. Hönle. Berlin: VWB, 2010 (Preis f. Mitgl. d. WOG: 15,00 €)	25,00 € 15,00 €
Mitteilungen der Wilhelm-OSTWALD-Gesellschaft: Heft 1/1996-1/2008 je ab Heft 2/2008 je	5,00 € 6,00 €
Mitteilungen der Wilhelm-OSTWALD-Gesellschaft (Sonderhefte 1-26), Themen der Hefte u. Preise finden Sie auf unserer Homepage	div.
Beyer, Lothar: Wege zum Nobelpreis. Nobelpreisträger für Chemie an der Universität Leipzig: Wilhelm OSTWALD, Walther Nernst, Carl Bosch, Friedrich Bergius, Peter Debye. Universität Leipzig, 1999.	2,00 €