Mitteilungen der

Naturforschenden Gesellschaft in Bern

2016

Neue Folge Band 73

Thema: Mineralien und Kristalle: die Erforschung ihrer Eigenschaften im Wandel der Zeit

Jahresbericht der Bernischen Botanischen Gesellschaft

Mitteilungen der

Naturforschenden Gesellschaft in Bern

2016

Neue Folge Band 73

Thema: Mineralien und Kristalle: die Erforschung ihrer Eigenschaften im Wandel der Zeit

Jahresbericht der Bernischen Botanischen Gesellschaft

Redaktion

Dr. Thomas Burri
Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern
Bernastrasse 15
3005 Bern

www.ngbe.ch

Zitierweise:

Mitt. Natforsch. Ges. Bern NF Bd. 73, Seiten 1–176, Bern Juni 2016

ISSN 0077-6130

Bezugsquelle:

Dieser Band ist wie früher erschienene Bände zu Fr. 40.– im Haupt Verlag, Falkenplatz 14, 3001 Bern, und im Buchhandel erhältlich.

Titelbild:

Objekt der Begierde bei Mineraliensammlern und Mineralogen: Haüyn aus Mendig in der Eifel, Rheinland-Pfalz (Foto Frédéric Hède, Kristallgrösse: 1 mm).

Herstellung: **rub**media www.rubmedia.ch

sc | nat

Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) hat den Druck dieser Ausgabe mit CHF 8400.– unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Editorial 5

Marco Herwegh
Jahresbericht des Präsidenten 7

Matthias Haupt
Rechnungsabschluss 2015 15

Die Autoren der diesjährigen Ausgabe 18

Leitthema dieses Bandes

Thomas Armbruster
Mineralien und Kristalle: die Erforschung ihrer Eigenschaften im Wandel der Zeit 21

Ordentliche Beiträge

Victoria Matzka und Markus Fiebig
Gibt es Mittelmoränenablagerungen? – eine Literaturrecherche auf der Basis von Bildmaterial und eigenen Beobachtungen 99

Gerhard Wagner
Die Reise des Hugiblocks auf der Mittelmoräne des Unteraargletschers 117

Ueli Gruner und Cornelia Brönnimann
Felsstürze und Klimawandel – Auswertung historischer Daten aus dem Kanton Bern 135

Buchvorstellung Heinz Wanner
Klima und Mensch – eine 12 000-jährige Geschichte 150

Aus den Vereinsannalen
Beiträge aus den Mitteilungen 1879 151

Berner Botanische Gesellschaft
Jahresbericht 2015 155

Editorial

Das Leitthema dieses Bandes ist die Geschichte der Kristallographie. Mein persönliches Fazit: Wer hätte vermutet, dass die Geschichte dieser doch sehr akademisch anmutenden Forschungsdisziplin dermassen menschliche Züge aufweisen würde? Es geht um Teamgeist, aber auch um Einzelkämpfer, um sexistisch motivierte Intrigen, um Personen die zu ihrem Glück zur rechten Zeit am rechten Ort waren und um ein Wissenschaftsestablishement, dass sich nur ungern von den Argumenten der jüngeren Generation überzeugen lässt. Es geht um zu Unrecht vergebene Nobelpreise, um Bescheidenheit und Selbstüberschätzung und sogar um Mord und Totschlag.

Thomas Armbruster beginnt seine Geschichte der Kristallographie bei den klassischen Griechen und endet nach einem stark verzweigten Bogen beim Rover Curiosity auf dem Mars. Dass er nicht nur ein ausgezeichneter Kristallographe sondern auch ein toller Geschichtenerzähler ist wird rasch klar. Wer bisher gedacht hat, dass Kristallographie eine trockene Materie ist und sich bloss mit exotischen Kristallen befasst, der wird hier eines Besseren belehrt.

Damit solch schöne Publikationen wie der vorliegende Band überhaupt möglich werden, braucht es, ganz einfach, kurz und bündig – Geld. Zwar erhalten wir zu diesem Zweck alljährlich einen substanziellen Beitrag von der SCNAT, trotzdem sind wir natürlich auch auf die Beiträge unserer Mitglieder angewiesen. Dass diese sich derart grossherzig und grosszügig zeigen wie im letzten Jahr ist indes sehr aussergewöhnlich. Eine nicht genannt werden wollende Person, nennen wir sie Anonymus, hat uns einen mehr als nur substanziellen Beitrag in den Publikationsfond gespendet, der es uns erlauben wird, gut drei Ausgaben der «Mitteilungen» zu finanzieren. Als Redaktor und im Namen des ganzen Vorstandes der NGB möchte ich mich sehr herzlich für diese Unterstützung bedanken. Ich hoffe, lieber Anonymus, dass Sie, wenn Sie diesen Beitragsband in Händen halten, wie ich der Meinung sind, dass das Geld gut eingesetzt wurde. Lieber Anonymus, dieser Band sei Ihnen gewidmet.

Thomas Burri im Juni 2016

Naturforschende Gesellschaft in Bern

Jahresbericht 2015

1. Wissenschaftliche Tätigkeit

Das naturwissenschaftliche Jahr 2015 stand ganz unter dem Motto des 200-jährigen Bestehens der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT). Eine treibende Kraft und Mitbegründer im Jahr 1815 war der damalige NGB-Präsident Jakob Samuel Wyttenbach. Nach mehreren Anläufen gelang es ihm, zusammen mit Gleichgesinnten, eine schweizweite Gruppierung im Namen der naturwissenschaftlichen Forschung zu formieren, deren Präsidium er gleich als erster Präsident übernahm.

Dieser historischen Vergangenheit und der Idee des naturwissenschaftlichen Austausches verpflichtet, hat die NGB den Lead für die Erstellung eines gemeinsamen Jahresprogramms naturwissenschaftlicher Institutionen zu «200-Jahre SCNAT in der Region Bern – Thun» übernommen. Folgende Institutionen wirken an dem gemeinsamen Jahresprogramm mit:

- Albert Einstein-Gesellschaft Bern
- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
- Astronomische Vereinigung Berner Oberland
- Astronomische Gesellschaft Bern
- Berner Chemische Gesellschaft
- Bernische Botanische Gesellschaft
- Botanischer Garten der Universität Bern
- Center for Space and Habitability, Universität Bern
- Entomologischer Verein Bern
- Geografische Gesellschaft Bern
- Institut für Geologie, Universität Bern
- Mineralien- und Fossilienfreunde Bern
- Naturforschende Gesellschaft in Bern
- Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern
- Naturwissenschaftliche Gesellschaft Thun
- Pflanzeninstitut der Universität Bern
- Stiftung Landschaft und Kies
- Verein Ur.Kultour

Es wurde folgendes vielfältiges Programm, bestehend aus Vorträgen, Exkursionen und Spezialevents angeboten:

Datum	*Titel – ReferentIn/FührerIn*
16.01.2015	*Kristalle: Die Erforschung ihrer Eigenschaften im Wandel der Zeit* Prof. Dr. Thomas Armbruster, Institut für Geologie, Bern (organisiert durch: Institut für Geologie, Mineralien- und Fossilienfreunde Bern)
20.01.2015	*Zeitreisen durch die Kartenwerke von Swisstopo – eine Kartographische Weltneuheit* Dr. Martin rickenbacher, swisstopo bern (organisiert durch: Geografische Gesellschaft Bern)
18.02.2015	*Chemie im Alltag* Dr. Susanne Rehn, Leitung Abteilung Chemie, Deutsches Museum, München (organisiert durch: Berner Chemische Gesellschaft)
17.03.2015	*Einsteins* Ansichten über das Wesen und die Konstitution des Lichts Prof. Dr. H.-r. Ott, ethz (organisiert durch: Albert Einstein-Gesellschaft Bern)
21.03.2015	*Tag der Astronomie: Sonnenbeobachtung, Sternenhimmel über Bern, Kinderprogramm, offene Sternwarte und Vorträge* (organisiert durch: Astronomische Gesellschaft Bern)
21.03.2015	*Tag der Astronomie: «Schattenspiele»; Kurzvorträge im Planetarium, Sonnenbeobachtungen, Beobachtungen in der Sternwarte* (organisiert durch: Astronomische Vereinigung Berner Oberland)
25.04.2015	*Münsingen: Hochwasserschutz und Raumplanung* *Rundgang unter der Leitung von Herrn Martin Niederberger* (organisiert durch: Geografische Gesellschaft Bern)
30.04/01.–02.05.2015	*«Hirni»* Spokenword mit Selbstversuch von Matto Kämpf und Gerhard Meister (organisiert durch: Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern)
06.06.2015	*Exkursion ins Naturschutzgebiet Gwattlischenmoos* *Martin Gerber und Martin Wettstein* (organisiert durch: Naturwissenschaftliche Gesellschaft Thun)
27.06.2015	*Premiere full-dome show «3 Reisen durch das Unmögliche» zu Ehren Jules Vernes* (organisiert durch: AVBEO, NGT und SCNAT)
22.08.2015	*Mineraliensuche auf der Engstligenalp, Exkursion für Jugendliche* *Eduard Rippstein, Michael Rippstein und Regula Gesemann* (organisiert durch: Mineralien- und Fossilienfreunde Bern)
2.-6.09.2015	*«forschung live» – Naturwissenschaften erlebbar nah* Naturwissenschaftliche Forschung interaktiv erleben für klein und gross in der Berner Innenstadt und verschiedene Veranstaltungen in der Umgebung von Bern (organisiert durch: SCNAT und regionale Institutionen)

03.09.2015 *Kostbarer Wildwuchs in der Berner Altstadt: Botanische Führung Floreninventar Bern*
(organisiert durch: Stadtgrün Bern und Bernische Botanische Gesellschaft)

05.09.2015 *Zimtrose & Zebraspinne: ein botanisch-zoologischer Rundgang in der Elfenau*
Beatrice Lüscher und Adrian Möhl
(organisiert durch: Bernische Botanische Gesellschaft)

06.09.2015 *Von heilenden, sättigenden und fleischfressenden Pflanzen Familientag im Boga mit Führungen, Workshops, Musik und kulinarischen Köstlichkeiten*
(organisiert durch: Botanischer Garten der Universität Bern)

12.09.2015 *Der Mensch und seine Umwelt in der Nacheiszeit Erlebnistag für Kinder und Erwachsene für ein aktives Erfahren der Archäologie, Landschafts- und Vegetationsgeschichte*
(organisiert durch: Stfg. Landschaft und Kies, Pflanzeninst. der Uni Bern, Verein ur.Kultour)

24.10.2015 *Exkursion ins Gonzenbergwerk (Sargans)*
Marco Herwegh
(organisiert durch; NGB und Institut für Geologie, Universität Bern)

03.11.2015 *Tagfalter im Berner Oberland: Altbekanntes und Überraschendes*
Hans-peter Wymann, mit Fotos von Martin Albrecht und Bernhard Jost (organisiert durch: Entomologischer Verein Bern)

17.11.2015 *Höhepunkte der Rosetta-Mission*
Prof. Dr. Kathrin Altwegg, Center for space and habitability, Universität Bern
(organisiert durch: Stron. V. Berner Oberl., Naturwissenschaftliche Gesellschaft Thun)

Das Programm wurde mittels eines wunderschönen doppelseitigen Flyers beworben (Design @ Irène Herwegh, www.ideastogo.ch), welcher in einer Anzahl von 7000 Exemplaren gedruckt und von den beteiligten Institutionen verteilt wurde. Ausserdem gastierte auf dem Platz Bern in der Woche vom 2.–7. September die Wissenschafts-Tournee Forschung live», welche von der SCNAT anlässlich ihres 200-jährigen Bestehens selbst organisiert wurde. Auch hier war die NGB mit dem äusserst spannenden und attraktiven Beitrag des Inselspitals «Wenn Roboter operieren» als Mitorganisatorin vertreten. Als Vorprogramm zur Jahresversammlung 2015 wurde speziell für NGB-Mitglieder eine Exkursion zum Thema «Der Laser geht ins Auge» bei der Firma Ziemer Ophthalmic Systems AG, in Port bei Biel angeboten. Ebenfalls standen eine eintägige Schneeschuhtour bei Les Près d'Orvin (Bisontour) und eine zweitägige naturwissenschaftliche Exkursion «Creux du Van – La Brevine» im Angebot.

Die Erfahrungen zu diesem äusserst umfangreichen Angebot waren zweigeteilt. Zum einen sind grosse Teile des gemeinsamen Angebots der naturwissenschaftlichen Organisationen auf sehr gutes Echo gestossen. Generell war die Beteiligung bei den Vorträgen deutlich höher, als dies bei institutionseigenen Anlässen der Fall ist. Zum andern mussten wir von der NGB aber sowohl die «Bisontour» als auch die Exkursion in den Creux du Van wegen einer zu geringen Anzahl angemeldeter Teilnehmenden absagen. Während im ersten Fall der fehlende Schnee noch als Auslöser aufgeführt werden kann, fragen wir uns im zweiten Fall, ob die Nähe zu Bern (Tagesausflugsziel) oder die Logistik (Wanderung, Übernachten im Massenlager) das geringe Interesse bewirkt haben?

Erfreulich sind demgegenüber die Beteiligungen bei unseren weiteren NGB-Veranstaltung. Mit 21, 22 und 34 Teilnehmenden haben die Exkursionen «Der Laser geht ins Auge», «Wenn Roboter operieren» und «Gonzenbergwerk (Sargans)» die Obergrenzen erreicht. Für alle drei Events haben uns die Teilnehmenden ausgezeichnete und positive Rückmeldungen gegeben. Der Erfolg dieser Veranstaltungen ist auf das grosse Engagement der Teams von Ziemer Ophthalmic Systems AG, den Mitarbeitern der OP Technik, Viszerale Chirurgie und Thoraxchirurgie des Inselspitals und ARTORG UniBE Frau Dr. P. Tinguely, Herr Prof. R. Schmid, Frau Dubach, Herr U. Klopsch, Frau M. Solcà u.a. und des Gonzenbergwerkvereins zurückzuführen. Wir möchten allen für den grossen persönlichen Einsatz und die Gastfreundschaft unseren herzlichsten Dank aussprechen.

In traditioneller Art und Weise hat die NGB mittels des Veranstaltungskalenders auch im 2015 wiederum auf 69 naturwissenschaftliche Veranstaltungen in Bern und Umgebung aufmerksam gemacht.

Rückblickend darf das NGB-Jahr sehr positiv gewertet werden. Die Koordination des gemeinsamen Programms hat sehr viel Arbeit und Zeit in Anspruch genommen. Die dadurch neu entstandenen oder reaktivierten Kontakte waren aber sehr befruchtend und dürften sich auch in Zukunft in institutionsübergreifenden Aktivitäten nachhaltig für die NGB-Mitglieder auszahlen.

2. Publikationen

Im 2015 hat die NGB unter der Leitung unseres Redaktors Thomas Burri den Band 72 der Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern veröffentlicht. Der Band beinhaltet folgende Beiträge:

- Jahresbericht des Präsidenten
  Marco Herwegh
- NGB-Rechnungsabschluss 2014
  (Matthias Haupt)

- Leitthema: Emil August Göldi (1859–1917) – a life between Switzerland and Brazil
- Vom Urknall bis heute – die Entstehung der Erde (Rudolf von Steiger)
- Radioaktives Erbe (Ursula Menkveld-Gfeller)
- Abenteuer Erde – Fruchtbare Erde (Wolfgang Wilcke)
- Erde von unten – Karsteinblicke (Philipp Häuselmann, Rolf Siegenthaler)
- 100 Jahre Schweizerischer Nationalpark (Gaston Adamek)
- Der Kohlenstoffhaushalt der Biosphäre in einer CO_2-reichen Welt (Christian Körner)
- Abteilung für Naturförderung (ANF): Jahresbericht 2014
- Berner Botanische Gesellschaft: Jahresbericht 2014

Nebst den traditionellen Sparten, war der NGB-Mitteilungsband 72 erstmals seit dem Haller-Band wieder einem Leitthema gewidmet. Mit «Emil August Göldi (1859–1917) – a life between Switzerland and Brazil» haben Nelson Sanjad und Marcel Güntert einen umfassenden und spannenden Beitrag über das Universalgenie (Wissenschaftler, Diplomat, Museumsdirektor, Wissenschaftsmanager…) verfasst. In Folge der brasilianischen Herkunft des Erstautors wurde der Leitartikel für einmal in Englisch gehalten. Eine weitere Besonderheit des Bandes 72 ist der Jahresbericht 2014 der Abteilung für Naturförderung (ANF) des LANAT, nicht wegen dem Bericht selbst, sondern aufgrund der Tatsache, dass dies der letzte ANF-Jahresbericht sein wird, welcher im Rahmen der NGB-Mitteilungen erscheinen wird. Die ANF hat sich entschieden, in Zukunft eigene Wege der Publikation zu gehen. Dies hat nicht nur zur Folge, dass wir in Zukunft die vielfältigen ANF-Naturberichte mit ihren Illustrationen nicht mehr bei uns haben werden, sondern es zieht auch einen schmerzlichen finanziellen Einschnitt für die NGB mit sich, da das LANAT ein wichtiger Mitkostenträger bei den Mitteilungen war. Wir bedauern den Entscheid der ANF, wünschen der Naturförderung aber viel Erfolg und danken für die jahrelange gute Zusammenarbeit. Wir danken aber auch allen anderen Autoren und Autorinnen für ihre Beiträge. Natürlich geht ein ganz grosses Dankeschön auch an unseren Redaktor Thomas Burri für seinen unermüdlichen und tollen Einsatz.

3. Mitgliedschaft

Mitgliederbestand per 31.12.2015: 338 (Vorjahr 358)

Mitgliederbeiträge:
Fr. 60.– (Normalmitglieder)
Fr. 20.– (Jungmitglieder)
Fr 100.– (Korporationsmitglieder)

Erstmals seit über 20 Jahren mussten die Mitgliederbeiträge in Folge der finanziellen Rahmensituation angepasst werden. Die Beiträge wurden um 20.– Franken, (Normalmitglieder), Fr. 5.– (Jungmitglieder), Fr 20.– (Korporationsmitglieder) gegenüber dem Vorjahr erhöht.

Alle Mitglieder erhielten das NGB-Jahresprogramm 2015, den NGB-Veranstaltungskalender für die drei Publikationsperioden sowie den Mitteilungsband 72 zugestellt.

4. Subventionen / Unterstützungen

Die SCNAT hat für die NGB einen Unterstützungsbeitrag von CHF 9 300.– in Aussicht gestellt. Ein Grossteil dieses Betrages fliesst jeweils in die Druckkosten unseres NGB-Mitteilungsbandes. Nach dem Wegbrechen des LANAT-Beitrages gewinnt die SCNAT-Unterstützung weiter an Bedeutung. Zusätzlich wurden uns weitere CHF 5 000.– von der SCNAT für die NGB-Aktivitäten zu 200-Jahre SCNAT zugesprochen. Wir bedanken uns ganz herzlich bei der SCNAT für die substantielle finanzielle Unterstützung.

5. Vorstandstätigkeiten

Im Jahr 2015 fanden mit Terminen am 9.03.2015 und 3.11.2015 zwei ordentliche Sitzungen des NGB-Vorstandes statt. Die NGB-Jahresversammlung wurde im Anschluss an die Exkursion zu «Der Laser geht ins Auge» (Firma Ziemer Ophthalmic Systems AG) im Restaurant Romantica in Port bei Biel abgehalten. Die finanzielle Lage der NGB und der den Mitteilungen im 2016 anstehende Wegfall des Beitrages des LANAT waren Hauptthemen in der ersten Jahreshälfte. Die Attraktivitätssteigerung der NGB-Aktivitäten mit Jahresprogramm und Flyer (gesteigerte Exkursionstätigkeit) als auch der grössere Beitragsumfang der Mitteilungen haben in den vergangenen Jahren zu einer Steigerung der Kosten geführt. Diese Kosten wurden teilweise durch Entnahmen aus dem Publikationsfonds gedeckt, zum Teil mussten wir aber auch Defizite aufweisen. Es wurden bereits im Vorfeld einige

Schritte unternommen, um die Kosten einzudämmen. Mit dem Wegfall des LANAT-Beitrags ab dem Jahr 2016 hätte sich die Situation aber weiter verschärft und es musste zwingend Gegenruder gegeben werden. Der Vorstand hat die Situation intensiv durchleuchtet und analysiert und mit schwerem Herzen eine Erhöhung der Mitgliederbeiträge als Vorschlag für die Jahresversammlung vorbereitet. Dieser Vorschlag wurde an Letzterer denn auch intensiv und konstruktiv von den anwesenden Mitgliedern und dem NGB-Vorstand diskutiert. Wir waren sehr erfreut, grosse Unterstützung durch die Mitglieder erfahren zu dürfen, welche voll hinter unseren NGB-Aktivitäten und unserem Gesuch, die erste Erhöhung des Jahresbeitrages nach mehr als 20 Jahren, gestanden sind. Der Vorstand bedankt sich ganz herzlich für das ihm entgegengebrachte Vertrauen. Nebst dieser Zustimmung hat sich in der zweiten Jahreshälfte eine sehr erfreuliche und völlig unerwartete Wende in Bezug auf die finanziellen Mittel der Mitteilungen ergeben. Ein hier nicht genannt sein wollendes, langjähriges NGB-Mitglied hat einen sehr namhaften finanziellen Beitrag an die Druckkosten der Mitteilungen gesprochen. Dank diesem Beitrag ist nicht nur das Erscheinen des Mitteilungsbandes 2016 finanziell abgesichert, sondern es dürfte auch für die kommenden Jahre noch für einen «Zustupf» an die NGB-Druckkosten reichen. Im Namen der gesamten NGB möchte ich hier unseren tief verbundenen Dank für diese uneigennützige und grosszügige Spende aussprechen.

An der Jahresversammlung 2015 wurde nun auch Michael Moser, welcher sich bereits im Vorfeld für das Aufbauen einer NGB-Homepage-Zwischenlösung engagiert hatte, von den anwesenden Mitgliedern offiziell in den NGB-Vorstand gewählt. Ich danke Michael für seine Bereitschaft, bei uns mitzuwirken und wünsche ihm viel Freude und Befriedigung in seinen Tätigkeiten.

Die Gesellschaft wurde im vergangenen Jahr an verschiedenen Anlässen durch Vorstandsmitglieder vertreten (SCNAT: NWR-Präsidentenkonferenz, Delegierten Versammlungen und Jubiläumsfeier 200-Jahre SCNAT (Marco Herwegh); Swiss Geoscience Meeting in Basel (Marco Herwegh, Ursula Menkveld)).

In Folge des gemeinsamen Jahresprogramms 200-Jahre SCNAT in der Region Bern – Thun und der vielen Beiträge von Schwesterinstitutionen, waren viele Vorstandsmitglieder nicht ganz so intensiv in NGB-eigene Events eingebunden, wie dies in anderen Jahren der Fall ist. Ganz besonders hervorheben möchte ich hier aber Marcel Egger, welcher als Hauptorganisator von «Der Laser geht ins Auge» und «Wenn Roboter operieren» zwei äusserst attraktive Veranstaltungen auf die Beine gestellt hat. Daneben gibt es aber viele, für das NGB-Mitglied nicht auf Anhieb sichtbare Tätigkeiten wie Buchhaltung und Mitgliederverwaltung, Redaktionstätigkeiten, Zusammenstellen des NGB-Kalenders, Homepage, Programmplanungen etc. Aus diesem Grund gebührt auch in diesem Jahr meinen NGB-Vorstandskolleginnen und -kollegen unser aller Dank. Merci Ihr seid ein tolles Team!

6. Zusammensetzung des Vorstandes

Präsident	Prof. Marco Herwegh, Erdwissenschaften
Vizepräsident	Prof. Günter Baars, Chemie, Gymnasium/Bildungsmedien
1. Sekretär	Dr. Ursula Menkveld, Naturhistorisches Museum Bern
2. Sekretär	PD Dr. Eva Knop, Biologie
Kassier	Matthias Haupt, Haupt Verlag
Redaktor	Dr. Thomas Burri, Naturhistorisches Museum Bern
Archivar	Michael Helfer, Universitätsbibliothek Bern
Homepage	Dr. Michael Moser, Physik
Beisitzer/in	Christine Keller, Gymnasium Hofwil
	Prof. Erwin Flückiger, Physik
	Prof. Willy Tinner, Biologie
	Dr. Robert Brügger, Geographie
	Prof. Dr. Marcel Egger, Physiologie
Vertreter ProNatura	vakant

7. Kontrollstelle

Frau Marianne Del Vesco
Frau Franziska Nyffenegger

Naturforschende Gesellschaft in Bern
Rechnungsabschluss 31. Dezember 2015

1. Betriebsrechnung

Einnahmen		**Einnahmen**		**Ausgaben**	
		2015	**2014**	**2015**	**2014**
1. Beiträge und Zuwendungen					
1.1. Mitgliederbeiträge	20 130.00				
1.2. Freiwillige Beiträge	825.00				
1.3. Spenden	50 000.00	70 955.00	14 075.00		
2. Erlös aus Verkäufen					
2.1. Mitteilungen	407.70				
2.2. Veranstaltungskalender	80.00	487.70	490.18		
3. Mitteilungen der NGB					
3.1. Beitrag der SCNAT	8 400.00				
3.2. Weitere Beiträge	10 467.50	18 867.50	20 498.00		
4. Verschiedene Einnahmen		0.00	80.00		
5. Einnahmen Exkursionen					
5.1. Beitrag der SCNAT	3 000.00				
5.2. Beiträge Teilnehmer	1 410.00	4 410.00	7 060.00		
6. Zinsen		2.85	6.20		
7. Entnahme aus Fonds (Mitteilungsband 71)		0.00	9 500.00		
Ausgaben					
1. Mitteilungen der NGB					
1.1. Herstellungskosten				22 324.30	29 064.40
2. Vorträge, Tagungen, Exkursionen				4 494.35	10 792.60
3. Beiträge					
3.1. SCNAT	716.00				
3.2. Andere Gesellschaften	70.00			786.00	760.00
4. Informationen					
4.1. Veranstaltungskalender				2 114.65	3 326.40
5. Administration					
5.1. Gebühren	100.20				
5.2. Büromaterial, Tel., Porti,	2 214.00				
5.3. Drucksachen	4 355.65			6 669.85	6 418.50
6. Werbung				0.00	0.00
7. Verschiedenes				279.20	249.30
8. Vorstandskosten				317.50	251.50
9. Einlage in Fonds				56 000.00	0.00
Gewinn				1 737.20	801.68
		94 723.05	**51 709.38**	**94 723.05**	**51 709.38**

2. Bilanz

	Aktiven		Passiven	
	2015	**2014**	**2015**	**2014**
1. Postcheck 30-1546-4	5 783.50	5 366.18		
2. Postcheck E-Deposito 92-331142-7	1 123.60	1 122.20		
3. Aktive Rechnungsabgrenzung	12 810.00	10 116.27		
4. Debitoren	0.00	40.00		
5. Kreditoren			0.00	0.00
6. Passive Rechnungsabgrenzung			2 541.30	1 206.05
7. Eigenkapital			17 175.80	15 438.60
	19 717.10	**16 644.65**	**19 717.10**	**16 644.65**

3. Fondsrechnungen

		Aktiven 2015	Passiven 2015
1. Wertschriften		155 000.00	
2. Valiant Bank Bern Universalkonto		27 670.90	
3. Postcheck 30-1546-4		61 500.00	
4. Verrechnungssteuerguthaben		685.85	
5. Publikationsfonds			
Bestand 1.1.2015	46 831.81		
Neuanlage	50 000.00		
Überschuss 2015	436.00		97 267.81
6. Vortragsfonds			
Bestand 1.1.2015	23 441.21		
Neuanlage	6 000.00		
Überschuss 2015	218.25		29 659.46
7. La Nicca-Naturschutzfonds			
Bestand 1.1.2015	42 813.71		
Neuanlage/Entnahme	0.00		
Überschuss 2015	398.60		43 212.31
8. De Giacomi-Fonds			
Bestand 1.1.2015	30 972.21		
Neuanlage/Entnahme	0.00		
Überschuss 2015	288.35		31 260.56
9. Wyss-Fonds			
Bestand 1.1.2015	43 055.71		
Neuanlage/Entnahme	0.00		
Überschuss 2015	400.90		43 456.61
		244 856.75	**244 856.75**

4. Bericht der Rechnungsrevisorinnen

Die unterzeichnenden Rechnungsrevisorinnen haben die Rechnung der Naturforschenden Gesellschaft in Bern für die Zeit vom 1. Januar bis 31. Dezember 2015, bestehend aus

- der Betriebsrechnung 2015
- der Bilanz per 31. Dezember 2015
- den Fondsrechnungen 2015
  (Publikationsfonds, Vortragsfonds, La Nicca-Naturschutzfonds, De Giacomi-Fonds, Wyss-Fonds)

geprüft und für richtig befunden.

Die Betriebsrechnung schliesst mit einem Einnahmenüberschuss von Fr. 1 737.20 ab.

Die Bilanz weist ein Eigenkapital von Fr. 17 175.80 aus.

Das Vermögen der Naturforschenden Gesellschaft (einschliesslich der Fonds) ist in Wertschriften und· auf Bank- und Postcheckkonti ausgewiesen.

Das Vermögen der zweckgebundenen Fonds beträgt:

– Publikationsfonds	Fr. 97 267.81
– Vortragsfonds	Fr. 29 659.46
– La Nicca-Naturschutzfonds	Fr. 43 212.31
– De Giacomi-Fonds	Fr. 31 260.56
– Wyss-Fonds	Fr. 43 456.61

Das Rechnungswesen ist sauber und übersichtlich geführt.

Die Rechnungsrevisorinnen beantragen der Hauptversammlung

- die Rechnung für das Geschäftsjahr 2015 zu genehmigen
- dem Kassier für seine Arbeit herzlich zu danken
- Kassier und Vorstand zu entlasten
- den Mitgliederbeitrag für 2016 bei Fr. 60.00 bzw. Fr. 20.00 (Jungmitglieder) bzw. Fr. 100.00 (Korporativmitglieder) zu belassen.

Bern, 14. April 2016

Die Rechnungsrevisorinnen

M. Del Vesco

Marianne Del Vesco

Franziska Nyffenegger

Die Autoren der diesjährigen Ausgabe

Thomas Armbruster studierte Mineralogie und Chemie an der Gutenberg Universität Mainz und schloss dort mit einer Diplomarbeit über die Bildung von Nierensteinen ab. Es folgte eine Dissertation an der Ruhruniversität Bochum (Kristallographie) über dichtest gepackte Oxide im System $NiO\text{-}TiO_2$ sowie ein zweijähriger Aufenthalt am Virginia Polytechnik Institut (Blacksburg), wo er sich auf dem Sektor «optische Eigenschaften von Mineralien» weiterbildete. Von 1980 bis 2015 (Emeritierung) war er am Institut für Geologie der Universität Bern (Habilitation 1985) zuständig für den Bereich der mineralogischen Kristallographie. Sein Forschungsschwerpunkt umfasste die Kristallchemie von gesteinsbildenden Mineralien sowie Struktur und Eigenschaften von Zeolithen.

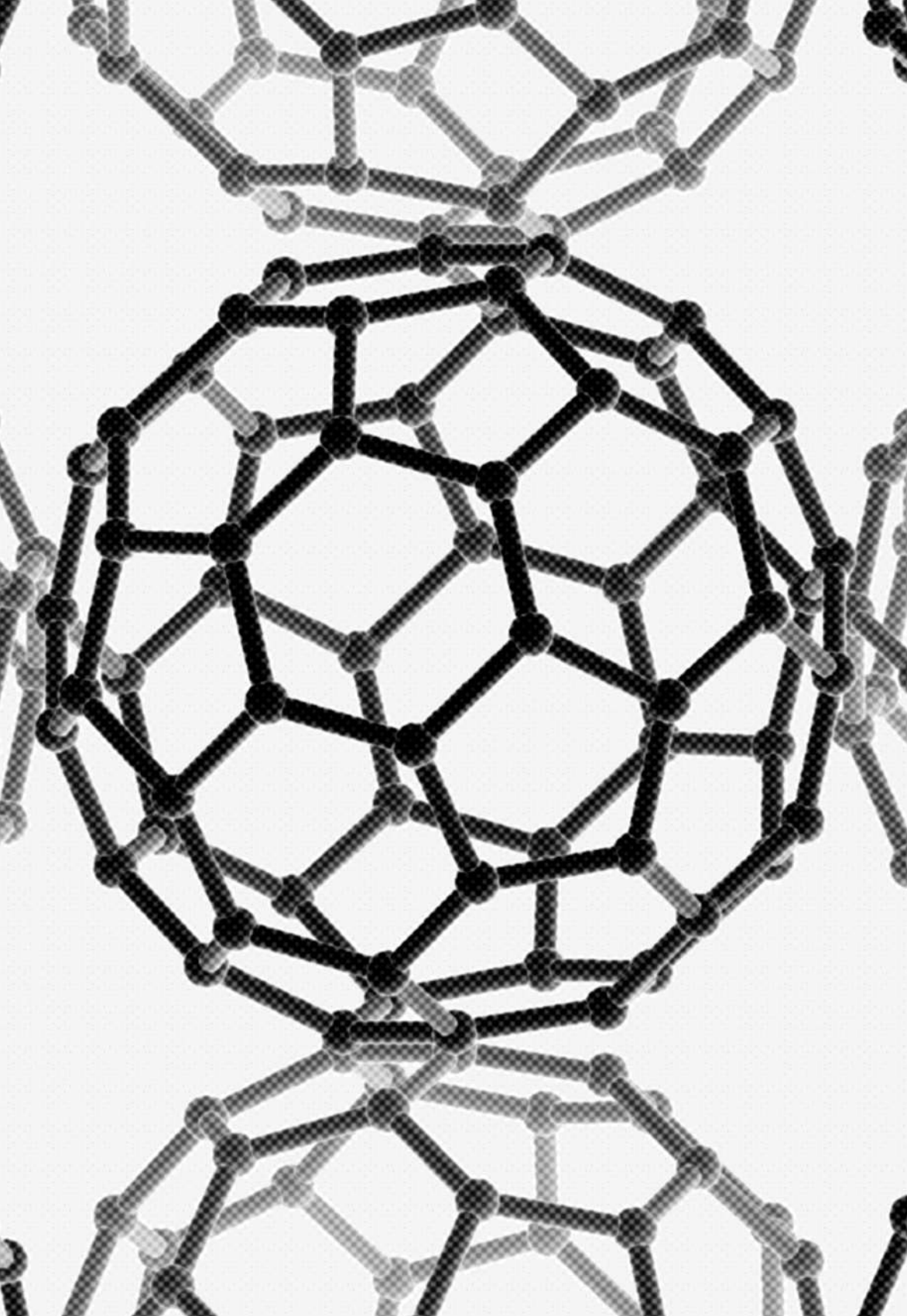
Markus Fiebig wurde 1964 am Alpenrand im Allgäu geboren und studierte von 1986–1991 im Oberrheingraben in Freiburg im Breisgau bei den Professoren Hugo Genser, Reinhard Pflug, Rudolf Maass und Thilo Bechstädt Geologie und Paläontologie. In der Diplomarbeit beschäftigte er sich mit quartären Ablagerungen im süddeutschen Alpenvorland; bei der Dissertation kamen vergleichende Untersuchungen im neuseeländischen Alpenvorland hinzu. Nach der Promotion (1995) folgte ein Postdoc-Aufenthalt im Schweizer Mittelland in Bern bei der Arbeitsgruppe «Happy Ice Age» von Professor Christian Schlüchter. Von 1999 bis 2004 war er Quartärgeologe am Bayerischen Geologischen Landesamt in München. Seit 2004 arbeitet er als Professor für Regionale Geologie, Hydrogeologie und Quartärgeologie an der Universität für Bodenkultur in Wien. In den vergletscherten Gebirgslandschaften dieser Erde unterwegs zu sein, ist nicht nur beruflich seine große Leidenschaft.

Victoria Matzka ist Absolventin des Bachelor- und Masterstudiums der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur in Wien. Sowohl die Bachelorarbeit als auch die Masterarbeit schrieb sie in den Bereichen der Quartärgeologie und Glaziologie. Da die Faszination für Gletscher groß ist, begann sie im Herbst 2014 das Masterstudium Polar and Alpine Change an der University of Sheffield in Großbritannien. Eine Feldforschung im Rahmen eines Kurses des University Centre in Svalbard führte sie im Sommer 2015 einen Monat nach Spitzbergen. Das Schifahren bringt sie auch in ihrer Freizeit ihren Lieblingsforschungsobjekten, den Gletschern und alpinen Gebieten näher.

Gerhart Wagner studierte Biologie, Physik und Geologie. Er promovierte 1949 in Zoologie. Als Lehrer wirkte er zuerst in Grindelwald, dann am Städtischen Gymnasium Bern. 1956 begründete er auf den Lofoten zusammen mit Beat Tschanz die Lummenforschung. 1958 bis 1964 war er Chef der Sektion für Strahlenschutz beim Bundesamt für Gesundheitswesen und erarbeitete die erste Strahlenschutzverordnung der Schweiz. Es folgten 5 Jahre als Assistenzprofessor für Zoologie an der Universität Zürich, wo er mit Hilfe militärischer Mittel (Helikopter) Brieftaubenforschung betrieb. In seine örtliche und berufliche Heimat zurückgekehrt, wirkte er von 1969 bis 1983 als Rektor des Realgymnasiums Bern-Neufeld. In seinem «Ruhestand» schuf er zusammen mit Konrad Lauber die «Flora Helvetica» und mit René Hantke das «Mittelmoränenmodell». Auf keinem dieser Gebiete ist er Spezialist. Aber die Universität Bern ehrte ihn 1996 mit dem Titel eines Ehrendoktors für «wesentliche Beiträge zur Botanik, Zoologie und Geologie».

Cornelia Brönnimann studierte Erdwissenschaften an der ETH Zürich und doktorierte an der EPF Lausanne, wo sie die Hydrogeologie von Rutschhängen in der Schweiz untersuchte. Nach dem Abschluss des Doktorates arbeitete sie zwischen 2012 und 2014 für die Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit DEZA in Projekten zur Prävention vor Naturkatastrophen in Haiti. Seit Anfang 2014 ist sie beim Geologiebüro Kellerhals+Haefeli AG in Bern im Bereich Naturgefahren – mit den Schwerpunkten Sturzprozesse und Rutschungen – tätig.

Ueli Gruner studierte Geologie an der Universität Bern, wo er 1979 mit einem Doktorat über die Ablagerungsmechanismen von Breccien (Konglomeraten) in verschiedenen geologischen Einheiten im Kanton Graubünden abschloss. Er ist seit 1980 beim Berner Geologiebüro Kellerhals + Haefeli AG. Schon bald spezialisierte er sich auf Naturgefahren, v.a. auf Sturzprozesse und Rutschungen. Er war während vieler Jahre bis zum Eintritt ins Pensionsalter 2015 Mitinhaber der Firma und deren Geschäftsleiter. Er ist nach wie vor als Naturgefahrenspezialist tätig, u.a. auch in verschiedenen Schweizerischen Fachgruppen oder als Lehrbeauftragter für Ingenieurgeologie und Naturgefahren am Geologischen Institut der Universität Bern.



Thomas Armbruster[1]

Mineralien und Kristalle: die Erforschung ihrer Eigenschaften im Wandel der Zeit

Zusammenfassung

Erste schriftliche Zeugnisse über die Erforschung von Mineralien und Kristallen stammen aus der Antike vor etwa 2000 Jahren und können als Beginn der Mineralogie und Kristallographie gewertet werden. Vor einem geschichtlichen Hintergrund wird die Entwicklung der Erforschung von Kristalleigenschaften bis heute aufgezeigt. Neue Entdeckungen oder Erkenntnisse werden mit möglichst einfachen Worten beschrieben, um deren Prinzipien einer naturwissenschaftlich interessierten Leserschaft zugänglich zu machen. Zahlreiche Anekdoten und historische Bezüge sollen die wichtigsten Stationen und Persönlichkeiten dieser Zeitreise verständlich und einprägsam darstellen. Dabei wird deutlich, dass es nicht einzelne Wissenschaftler waren, die aus dem Nichts grosse Erkenntnisse geliefert haben, sondern es gab eine kontinuierliche Entwicklung, in der oft unabhängig voneinander ähnliche Meilensteine an unterschiedlichen Orten gesetzt wurden. Der Zeitgeist lieferte die Basis für neue Ideen und Denkweisen. Manchmal unterstützte der Zufall den Zeitgeist, aber die geschichtliche Entwicklung war Voraussetzung, dass Zufallsfunde als solche erkannt sowie richtig analysiert und interpretiert werden konnten. Der Motor des wissenschaftlichen Fortschritts war und ist immer die uneingeschränkte Suche nach dem Warum.

Von der Antike bis ins Mittelalter

Griechen und Römer

Der Ursprung der heutigen Wissenschaftsdisziplin Mineralogie ist nur sehr schwer festzulegen. Abgesehen von der Verwendung bestimmter Mineralien als Schmucksteine oder als Grundmaterial von Schneide- oder Schlagwerkzeugen hat sich ab der frühen Bronzezeit (ca. 3000 v. Chr.) in Vorder- und Mittelasien ein Bergbau entwickelt, der die Kenntnis von Kupfer- und Zinnmineralien voraussetzte. Die Frage nach der Herkunft des bronzezeitlichen Zinns steht bis heute unter Diskussion (Garner, 2014). Eine erste schriftliche Zusammenstellung des Wissens über Mineralien geht auf die Enzyklopädie «Naturalis Historiae» des **Caius Plinius Secundus Major (der Ältere)**, 23–79 n. Chr., eines römischen Gelehrten, Verwaltungsbeamten und Offiziers zurück (Denso, 1765; König & Hopp, 1994). Plinius

[1] Prof. em. Dr. Thomas Armbruster, Institut für Geologie, Universität Bern

der Ältere wurde bekannt, da er bei einer Rettungsaktion seiner Verwandten während der Eruption des Vesuvs tragisch ums Leben kam. Dieses Ereignis hat sein Neffe, Plinius der Jüngere, in zwei erhaltenen Briefen dem römischen Geschichtsschreiber Cornelius Tacitus mitgeteilt. Noch heute wird in der Geologie der Begriff plinianische Eruption für explosive Vulkanausbrüche mit gewaltigem Aschenfällen verwendet.

Abb. 1: Plinius der Ältere, dargestellt von einem Künstler aus dem 19. Jahrhundert. Zeitgenössische Darstellungen von Plinius fehlen.

Das einzige erhaltene Werk von Plinius dem Älteren, seine Naturgeschichte («Naturalis Historiae»), umfasst 37 Bücher und der letzte Band (37) beschäftigt sich mit «Edelsteinen». Im Sinne einer Enzyklopädie hat Plinius aus damals verfügbaren schriftlichen Zeugnissen den Kenntnisstand über Mineralien zusammengetragen. Diese Informationen sind für uns heute aber teilweise verwirrend, da unterschiedliche Autoren in den Originalquellen verschiedene Namen (oft nach der Herkunft) für das gleiche Mineral verwenden, oder weil Sammelnamen für verschiedenste Mineralien existieren, die nur die Farbe oder die Symmetrie gemeinsam haben.
Als Beispiel dafür die Definition für Crystallus:

«Er wird durch Kälte verfestigt und man findet ihn dort, wo die winterlichen Schneemassen erstarren, da er aus Eis oder aus Regenwasser und reinem Schnee besteht. Er verträgt die Wärme nicht und wird für kalte Getränke verwendet. Der Grund, weshalb er sich sechseckig bildet, kann man nicht leicht finden, weil seine Spitzen nicht dasselbe Aussehen haben.»

Crystallus wurde also als Synonym für Eis oder Schneekristalle verwendet. An anderer Stelle finden wir folgende Beschreibung für Crystallus:

«Er kommt auch am Roten Meer in Arabien vor, und Xenokratos berichtet, dass man in Zypern und Asien den Kristall beim Pflügen freilegt. Der Kristall entsteht auch in den Felsen der Alpen, und zwar meistens an so unwegsamen Stellen, dass man ihn am Seil hängend herausziehen muss. Ärzte verwenden Kristallkugeln, die mit Hilfe des Sonnenlichtes den Körper brennen.»

Hier ist also Quarz oder Bergkristall gemeint, und wir erinnern uns daran, dass ein Strahler auch heute den Bergkristall meint, wenn er vom Kristall spricht.

Als einen Grund für die Untersuchung der «Edelsteine» zitiert Plinius die Unterscheidung von echt und falsch: *«Denn es gibt im Leben keinen gewinnreicheren Betrug.»* Als Unterscheidungskriterien schlägt er die Bestimmung der Dichte vor: *«Denn nur die schweren sind die echten.»* Zum Thema thermische Leitfähigkeit

Abb. 2: Am 21. September 2005 öffneten die Strahler Franz von Arx (Bild) und Paul von Känel am Planggenstock im Kanton Uri einen Hohlraum im Fels. Fast fünfzig aussergewöhnlich klare, grosse, perfekte geformte Bergkristalle und Kristallgruppen umfasst die Ausbeute, die heute im Naturhistorischen Museum in Bern zu sehen ist. (Foto von Känel & von Arx)

meint er: «*Die echten fühlen sich im Mund kälter an.*» Die durchsichtigen Steine sollen im Morgenlicht inspiziert werden, dabei soll man auf Bläschen im Innern, raue Stellen auf der Oberfläche und auf unbeständigen Glanz achten. Die sicherste Prüfung aber sei das Erhitzen auf einer eisernen Platte und das Ritzen mit Obsidian und Eisen. Diese Beschreibungen deuten darauf hin, dass vor allem Fälschungen aus Glas und geölte Steine in Betracht gezogen wurden.

Man wusste also sehr wohl Quarz und Glas zu unterscheiden. Plinius hebt hervor: «*Glasgefässe sind inzwischen auf erstaunliche Weise an die Ähnlichkeit von Kristallgefässen herangekommen.*» Als Rache, um das Zeitalter zu bestrafen, zerschlug Kaiser Nero bei einem seiner Wutanfälle zwei Kristallbecher. Das Zerstören von Kristallen wird somit als böses Omen interpretiert und steht im Gegensatz zum Sprichwort: «*Scherben bringen Glück*»*!*

Eine wichtige Quelle für die Beschreibung von Mineralien durch Plinius ist die fragmentarische Schrift des **Theophrastos von Eresos** (371–287 v. Chr) «Peri Lithon» = «De Lapidibus» = «Über die Steine» (Caley & Richards, 1956). Theophrastos, ein griechischer Philosoph und Naturforscher, war zunächst ein Mitglied von Platons Akademie und wechselte dann in die Schule des Aristoteles. Die verwirrende Vielfalt von Mineralnamen bei Plinius lässt sich in einem Vergleich mit dem Originaltext zum Thema unbrennbare Steine bei Theophrastos verdeutlichen (Caley & Richards, 1956): Der Anthrax (Übersetzung: Kohle), aus dem Siegel ge-

Abb. 3: Granat «*… ist rot und wenn gegen die Sonne gehalten zeigt er die Farbe brennender Kohle.*». (Foto: Olaf Medenbach)

schnitten werden: «*… ist rot und wenn gegen die Sonne gehalten zeigt er die Farbe brennender Kohle.*» Bei diesem Anthrax handelt es sich mit Sicherheit um einen Granat, denn aus hellenistischer Zeit sind nur Granatsiegel bekannt, die dieser Beschreibung entsprechen. Rubin und Spinell waren zu hart, als dass man sie hätte einfach gravieren können. Theophrastos erwähnt dann aber noch einen anderen Anthrax mit sechseckiger «Kristallform» und grosser Härte aus der Gegend von Milet, der von den Kommentatoren, wegen der Nähe zu den Schmirgel-Lagerstätten in Kleinasien, als Spinell beurteilt wird. Anthrax wird bei Plinius zu Carbunculus und es bleibt unklar, ob dieser Sammelname auch Rubin und Spinell umfasste. Ebenfalls zu den feurigen Edelsteinen mit verschiedenen Rotfärbungen zählt Plinius den Lychnis, benannt nach dem Leuchten der Lampen. Kommentatoren sehen im Lychnis ebenfalls einen Sammelnamen für Granate und Rubin. Unter weiteren Abarten des Lychnis erwähnt Plinius purpur- und scharlachfarbige Varietäten mit pyroelektrischen Eigenschaften (wahrscheinlich rote Turmaline): «*Durch die Sonne erwärmt oder durch Reiben mit den Fingern sollen sie Spreu und Papyrusschnitzel an sich ziehen*».

Als wichtigste Unterscheidungsmerkmale bei Plinius für unterschiedliche Mineralien gelten Farbe oder die makroskopische Erscheinung, die Härte, der Ursprungsort und der Handelswert. Zusammenfassend sehen sich sowohl Theophrastos als auch Plinius kritisch gegenüber der Heilkraft der Steine und verweisen in diesem Zusammenhang auf Magie (Plinius) oder vermerken explizit Einschränkungen: «*Wenn es tatsächlich stimmt*» (Theophrastos). Plinius und Thephrastos verwenden die Begriffe Edelstein (gemma) oder Stein (lithos) als Synonym für

Mineralien. Der Einfluss der Enzyklopädie von Plinius bis ins 16. Jahrhundert ist nicht zu unterschätzen, da der Text als Lehrbuch an Gelehrtenschulen eingesetzt wurde. Zwischen 1469, dem Jahr des ersten Druckes, und 1599 wurden mehr als 50 Gesamtausgaben produziert.

Deutsche Mystiker

Die Mystik der «Steine», die wir heute am besten als Esoterik beschreiben, und eine systematische «medizinische» Anwendung von Mineralien beginnen im frühen Mittelalter. **Hildegard von Bingen** (1098–1179) verfasst auf der Grundlage von Plinius (Buch 37) und ihrer Kenntnis über den Volksglauben eine lateinische Abhandlung über die Heilkraft von Steinen (Lapis Lapidarum):

«*Überall dort, wo sich der Karfunkelstein befindet, können die Luftdämonen ihr Teufelswerk nicht vollführen … so hält dieser Stein die Krankheiten nieder.*»

Zum Thema Quarz (Bergkristall) schreibt sie:

«*Wem ein Kropf an der Kehle … anschwillt, der erwärme den Bergkristall an der Sonne. Über den sonnenwarmen Stein giesse er Wein und trinke oft davon. Er drücke den von der Sonne erwärmten Bergkristall auch oft auf die Erhebung, und sie wird kleiner werden… Wer im Herzen oder im Magen oder im Bauch leidet, wärme den Bergkristall in der Sonne und giesse Wasser über den sonnenwarmen Stein. Lege sogleich den Bergkristall in dieses Wasser für eine (kurze) Stunde… Er trinke dieses Wasser oft und es wird besser werden…*»

Hildegard war eine Adelige, die, wie damals üblich, als zehntes Kind ihrer Eltern achtjährig einem Benediktinerkloster zur Erziehung als Ordensfrau übergeben wurde. Als Nonne setzte sie sich für eine Mässigung der Askese ein, reduzierte die Gebetszeiten und lockerte die Speisevorschriften. Sie gründete eine eigene stark frequentierte Ordensgemeinschaft (Ruppertsberg an der Nahe bei Bingen) und berief sich in ihren zahlreichen Texten auf Visionen. Papst Eugen III. erteilte ihr die Erlaubnis, ihre Visionen zu veröffentlichen, was ihr politischen Einfluss einbrachte. Da die Klöster im Mittelalter auch kulturelle Zentren waren, wurde die Benediktinerin Hildegard zu einer bedeutenden Universalgelehrten und Dichterin ihrer Zeit. Als erste Nonne begab sie sich auf Pre-

Abb. 4: Hildegard von Bingen wird von dem Heiligen Geist in Form eines Feuerstroms ergriffen, zeitgenössische Buchmalerei.

digt-Reisen, propagierte öffentlich die Rückkehr zu Gott und wirkte auch als Beraterin von hochstehenden Persönlichkeiten. Sie wurde noch im Mittelalter heiliggesprochen, und Papst Benedikt XVI. erhob sie 2012 zur Kirchenlehrerin («Doctor Ecclesiae Universalis»). Im Gegensatz zu ihren religiösen Werken sind die naturheilkundlichen Schriften nicht im Original erhalten, und unsere heutige Kenntnis darüber beruht auf Abschriften und Umschriften aus dem 13.–15. Jahrhundert. Edelsteine und Metalle bilden nur einen kleinen Teil ihrer Behandlungsempfehlungen. Ihre medizinischen Texte zählen noch heute zu den Standardwerken der esoterischen Naturheilkunde.

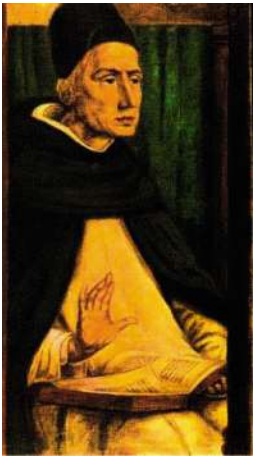


Abb. 5: Albertus Magnus: Tafelgemälde von Joos van Wassenhove auch Justus van Gent, um 1475 in Urbino.

Das Wort Mineral taucht an hervorgehobener Stelle bei **Albertus Magnus** (geb. ca. 1200 in Lauingen, gest. 1280 in Köln) auf. Der Naturforscher, Theologe und Bischof von Regensburg (1931 durch Papst Pius XI. heiliggesprochen) erhielt den Beinamen der «Grosse» wegen seines umfangreichen Wissens. Immensen Einfluss erlangte er mit dem Bestreben, die «heidnische» Philosophie und das naturwissenschaftliche Denken des Aristoteles in ein christliches Umfeld zu integrieren. Er verfasste mit seinem Buch «De Mineralibus» ein Abbild des mineralogischen Wissens im 13. Jahrhundert, das neben klassischen und zeitgenössischen Quellen insbesondere auf seiner durch viele Reisen erworbenen Kenntnis basiert. Das Buch besitzt einen allgemeinen Teil, in dem unter anderem die Bildung der Mineralien vornehmlich auf der Grundlage der Naturphilosophie von Aristoteles (Vier-Elemente-Lehre: Feuer, Wasser, Luft und Erde) beschrieben wird. Es folgt eine alphabetische Auflistung der Mineralien, ihrer Eigenschaften und Herkunft. Als Beispiel unterteilt er die roten Edelsteine in drei Gruppen: balagius (Spinell), rubinus (Rubin) und granatus (Granat).

Die verwirrende Mehrdeutigkeit einzelner Namen, die wir bereits von Plinius kennen, bleibt auch bei Albertus Magnus bestehen. Zusätzlich zum Granat in der Oberkategorie der roten Edelsteine fungiert Almandina (der heutige Almandin $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$, Glied der Granatobergruppe) als eigenständiges Mineral, benannt nach seinem Fundort Alabanda, einer antiken karischen Stadt in Kleinasien (Ruinen heute in der Nähe von Çine, Türkei). Während der Hyacinthus des Plinius von den Interpretatoren dem Rosenquarz zugeordnet wird, interpretiert man den Hyacinthus bei Albertus Magnus als Korund (Wyckoff, 1967) mit den drei Varietäten Rubin (rot), gelber Korund, Saphir (blau). Brennexperimente sollen die Farbe des roten Hyacinthus (Rubin) verstärken und Unreinheiten zum Verschwinden bringen. Heute versteht man unter einem Hyazinth in der Gemmologie vor allem einen braun-roten Zirkon $Zr[SiO_4]$.

Etymologie

Balas: Mittelenglisch, vom mittelfranzösischen *balais*, vom mittelalterlichen Latein *balagius, balascius,* vom arabischen *balakhsh*, von *Balakhshān*, antike Region von Afghanistan; ein durch geringe Cr^{3+}-Konzentrationen hell rosaroter Spinell, anfänglich auch mit Rubin verwechselt.
Rubin: aus dem mittellateinischen *rubens, rubinus* für *rot, der Rote;* Edelsteinvarietät eines durch geringe Cr^{3+}-Konzentrationen rot-gefärbten Korunds.
Granat: aus dem lateinischen *granum* für Korn oder Kern bzw. *granatus* für körnig oder kernreich, bezieht sich auf das Vorkommen der Vertreter der Mineralobergruppe (Grew et al., 2013) in Körnern, die Ähnlichkeit mit den Kernen des Granatapfels *(Punica granatum)* haben, aber auch auf die orangerote bis rotviolette Farbe von Blüte, Frucht und Kernen des Granatapfels. Den gleichen Wortstamm hat auch das Gestein Granit wegen seiner körnigen Struktur.

Auch in einem Kräuterbuch von Adam Lonitzer (1577) taucht der feurige Carbunckel wiederum als Gruppennamen auf, der vier Unterarten haben soll: (1) der echte Carbunckel, wahrscheinlich ein feurig roter Granat, (2) der Rubin, (3) der Granat (Almandin?), der dunkler als der echte Carbunckel beschrieben wird und (4) der Balagius (lichtrot und heller als Carbunckel), der heutige rote Spinell. Überraschend erscheint beim Rubin der Zusatz: *«Wenn man den Stein auf dem Kopfhaar reibt, er die Hautschuppen anzieht (wie der Magnet das Eisen).»* Diese elektrostatischen Eigenschaften scheinen auch auf einen roten Turmalin hinzuweisen.

Abb. 6: Turmalin.
(Foto: Olaf Medenbach)

Turmalin: Geschichte und Etymologie

Obwohl schon seit der Antike im Mittelmeerraum bekannt (siehe Lychnis bei Plinius), wurde Turmalin je nach Farbe anderen Farbsteinen zugeordnet. Erst der Import von ceylonesischen Turmalinen durch Holländer ab 1703 klärte die Eigenständigkeit dieser Mineralgruppe (Beckmann, 1780). Seine Fähigkeit, sich durch Reiben oder Erwärmen elektrisch aufzuladen (piezo-, pyroelektrischer Effekt), nutzten holländische Pfeifenraucher, um mit ihm die Asche aus ihren Meerschaumpfeifen zu ziehen (*Aschentrekker* = Aschenzieher). Der Name Turmalin lässt sich von zwei singhalesischen Worten ableiten: *toramolli* = etwas Kleines aus der Erde, oder *turamali* = Stein mit gemischten Farben. Heute bezeichnet Turmalin eine Mineralobergruppe (Henry et al., 2011).
Der Name Schörl für einen schwarzen Turmalin war bereits vor 1400 n. Chr. gebräuchlich. Zschorlau (Gemeinde in Sachsen mit der ursprünglichen Bezeichnung Schorl, wo Zinnstein (Kassiterit) vergesellschaftet mit schwarzem Turmalin abgebaut wurde) soll namensgebend für Schörl sein.

Auch Lonitzer (1577) weist auf die seit Plinius verbreitete Doppeldeutigkeit des Crystallus hin (Eis und Bergkristall) und erwähnt in Anlehnung an Albertus Magnus seine Anwendung zum Durstlöschen *(«wenn unter die Zunge gelegt»)* und empfiehlt ihn, gepulvert sowie mit Honig versetzt stillenden Frauen als milchtreibende Medizin zu verabreichen.

Die Neuzeit

Erste Ideen zum Einfluss der Struktur auf die Kristallform

Johannes Kepler (geb. 1571 in Weil der Stadt im heutigen Grossraum Stuttgart, gest. 1630 in Regensburg) war ein Naturphilosoph, Mathematiker, Astronom, Astrologe, Optiker und evangelischer Theologe.

Als Folge einer Frühgeburt entwickelte sich Johannes Kepler zu einem schwächlichen Kind, das auch noch an Pocken erkrankte und dann sein Leben lang von einem Augenleiden geplagt wurde. Seine Eltern unterhielten ein einfaches Gasthaus. Ausserdem verdiente sich seine Mutter ein Zubrot als Kräuterfrau und

Abb. 7: Johannes Kepler: Kopie im Benediktinerkloster in Kremsmünster eines verlorengegangenen Originals von 1610.

wurde, wie nicht selten zu dieser Zeit, in einem Hexenprozess gefoltert. Der junge Kepler unterhielt die Kundschaft des Gasthauses mit mathematischen Denksportaufgaben und bewies auf diesem Gebiet hervorragende Fähigkeiten. Wegen seiner mangelnden körperlichen Konstitution wurde er auf eine Lateinschule geschickt und sollte nach einem anschliessenden Theologiestudium protestantischer Geistlicher werden. Mit 23 war Kepler zunächst Mathematiklehrer an der protestantischen Stiftsschule in Graz. Ihr gegenüber stand die von Jesuiten geleitete katholische Universität von Graz, die sich inzwischen zur Keimzelle der Gegenreformation entwickelt hatte. Die politische Situation wurde für den Protestanten Kepler in Graz ungemütlich, und er nahm 1600 in Prag eine Assistentenstelle beim dänischen Astronom Tycho Brahe an. Ein Jahr später, nach Brahes Tod, wurde Kepler kaiserlicher Mathematiker und war zuständig für die kaiserlichen Horoskope bis zum Tod (1612) des Habsburger Kaisers Rudolf II. 1609 publizierte Kepler seine «Astronomia Nova» mit den ersten beiden Keplerschen Gesetzen, die die Bewegung der Planeten auf elliptischen Bahnen um die Sonne beschreiben.

Während seiner Zeit in Prag wurde Kepler von seinem Freund und Gönner Matthäus Wacker von Wackenfels vielfältig unterstützt; dieser stellte ihm ein Teleskop (eigentlich ein optisches Fernrohr, das erst 1610 von Galileo Galilei entwickelt worden war) für nächtliche Beobachtungen zur Verfügung und lieh ihm Bücher. Kepler wollte sich endlich zum Neujahrstag 1611 mit einem Geschenk bei seinem Sponsor revanchieren, aber er besass keine finanziellen Mittel für ein angemessenes Präsent. Beim Überqueren der Moldau über die winterliche Karlsbrücke «*wurde durch einen glücklichen Umstand Wasserdampf und Kälte zu Schnee niedergeschlagen und Stückchen des Niederschlags fielen da und dort auf meinen Mantel, alle sechseckig und von gefächertem Aussehen*». Kepler schreibt weiter: «*Das war die richtige Sache für einen Mathematiker, der nichts hat und nichts erhält, etwas zu überreichen, das vom Himmel fällt und wie ein Stern aussieht.*» Kepler verfasst für Wacker eine Abhandlung über den Zusammenhang zwischen Kristallstruktur und Morphologie der sechseckigen Schneekristalle; natürlich im Zeitgeist der beginnenden Neuzeit, ohne Kenntnis von Molekülen oder Wissen von chemischen Bindungen. Keplers Schrift für Wacker hatte den Titel «Strena Seu de Nive Sexangula» («Neujahrsgeschenk, oder: über die sechseckige Schneeflocke»).

Abb. 8: Schneekristall.

«Es muss einen bestimmten Grund geben, warum bei Einsetzen des Schneefalls die Anfangsformationen unverändert die Form eines sechseckigen Sternchens haben. Sollte es durch Zufall erfolgen, warum fallen sie dann nicht mit fünf oder sieben Ecken.»

Er erinnerte sich an die Obstanordnung auf dem wöchentlichen Markt in Prag und verknüpfte die hexagonale Form der Eiskristalle mit der zweidimensional-

dichtesten Anordnung von Früchten in den Auslagen *(Abb. 9)*. Kepler entwickelte diese Idee in drei Dimensionen über Stapelung von dichtesten Schichten und kam zu einem Modell, das wir heute als dichteste Kugelpackung bezeichnen (Garcke, 2012). Er war somit seiner Zeit weit voraus und beschrieb erstmals die Beziehung von Struktur und Eigenschaften («Kristallform»), was auch innerhalb der modernen Kristallographie als zentrale Fragestellung bearbeitet wird. Strukturuntersuchungen mit Hilfe von Röntgen- oder Neutronen-Beugungsexperimenten beweisen, dass der Kern seiner Vorstellung richtig war. Natürlich sind die Sauerstoffatome der Wassermoleküle in Schneekristallen nicht dichtest angeordnet, sonst würde Eis nicht auf dem Wasser schwimmen, aber die hexagonale Anordnung der H_2O Moleküle ist der Schlüssel zum Verständnis der «Kristallform».

Kristallmorphologie

In der heutigen Nomenklatur der Kristallmorphologie werden drei Begriffe unterschieden:
Die *Kristallform* oder korrekter die *Form* wird durch drei Indizes in geschweiften Klammern gekennzeichnet (z. B. {hkl}) und beschreibt die Gesamtheit aller zueinander symmetrieäquivalenter Flächen. Die kristallographische Definition des Begriffs Kristallform unterscheidet sich somit wesentlich von der umgangssprachlichen Bedeutung, was korrekt eher als Kristalltracht oder Habitus zu bezeichnen wäre. Da diese Begriffe aber bis zum 20. Jahrhundert noch nicht streng definiert waren, wird hier «Kristallform» im umgangssprachlichen Sinn verwendet.
Als *Kristalltracht* wird in der Mineralogie die Gesamtheit der an einem Kristall entwickelten Kristallflächen bezeichnet.
Unter *Habitus* versteht man die relativen Grössenverhältnisse der ausgebildeten Flächen zueinander: z. B. isometrisch, nadelig, faserig, prismatisch, tafelig.

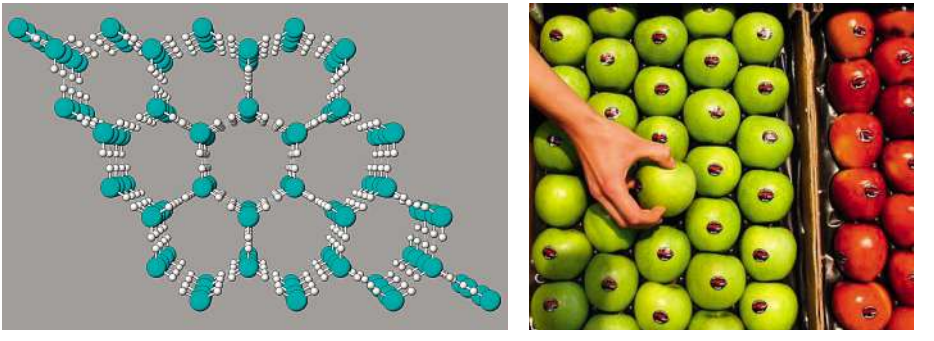


Abb. 9a: Links – Kristallstruktur der hexagonalen Eismodifikation Ih; die über Wasserstoff-Brückenbindungen verknüpften H_2O Moleküle bilden ein Gerüst mit bienenwabenähnlich angeordneten Kanälen. *Abb. 9b:* Rechts – Zweidimensional dichteste Anordnung von Äpfeln auf dem Wochenmarkt. Das Muster der Äpfel entspricht der Anordnung der Kanäle innerhalb der Eisstruktur.

Die Kristallstruktur der Eismodifikation auf der Erdoberfläche

In Abhängigkeit von Druck und Temperatur gibt es 17 kristalline Modifikationen von Eis, die als Eis Ih, Eis Ic, sowie Eis II bis Eis XVI bezeichnet werden. Die Struktur von Eis XVII wurde bereits durch Berechnungen vorhergesagt (Huang et al., 2016).
Wie wir heute wissen, ist die Eisstruktur der Schneekristalle (Eis Ih, Raumgruppe $P6_3/mmc$) relativ kompliziert und ungeordnet (Leadbetter et al., 1985; Yen & Chi, 2015). Jeder Sauerstoff ist tetraedrisch von vier Wasserstoffatomen umgeben, von denen jeweils zwei kovalent zum zentralen Sauerstoff und die restlichen zwei über weiche Wasserstoffbrückenbindungen verbunden sind. Dies ergibt für jedes H_2O Moleküle sechs statistisch mögliche Anordnungen mit unterschiedlichen räumlichen Ausrichtungen der zwei kovalenten Bindungen. Durch die Verbindung der einzelnen H_2O Moleküle über die Wasserstoffbrückenbindungen bildet die Struktur ein dreidimensionales Netzwerk, das ein Kanalsystem umspannt *(Abb. 9)*. In einer Projektion entlang der hexagonalen Achse erscheinen die Querschnitte dieser Kanäle wie die Dichtestanordnung von Äpfeln auf dem Wochenmarkt (siehe Johannes Kepler: «Strena Seu de Nive Sexangula»).

Der Dreissigjährige Krieg (1618–1648)

Als Auslöser gilt der Prager Fenstersturz vom 23. Mai 1618. Die protestantischen böhmischen Stände wehrten sich gegen die Rekatholisierungsversuche des böhmischen Königs und römisch-deutschen Kaisers aus dem Haus Habsburg. Der Dreissigjährige Krieg war eine militärische Auseinandersetzung um die Vorherrschaft im Heiligen Römischen Reich Deutscher Nation und in Europa zwischen den habsburgischen Mächten Österreich und Spanien gegen Frankreich, die Niederlande, Dänemark und Schweden. Zugleich war er aber auf Reichsebene ein Religionskrieg zwischen Kaiser und Katholischer Liga einerseits und Protestantischer Union andererseits.

Um den wachsenden religiösen und politischen Spannungen aus dem Weg zu gehen (siehe Einschub: Der Dreissigjährige Krieg), suchte Kepler nach einem neuen Wirkungskreis. 1612–1627 arbeitete er als oberösterreichischer Provinzmathematiker (Landvermesser) in Linz. Im Jahr 1627 fand er in Albrecht von Wallenstein einen neuen Förderer. Dieser erwartete von Kepler zuverlässige Horoskope und stellte ihm im Gegenzug in Sagan (Schlesien) eine Druckerei zur Verfügung. Als Wallenstein im August 1630 jedoch seine Funktion als Oberbefehlshaber verlor, reiste Kepler nach Regensburg und verstarb dort im Alter von 58 Jahren.

Unter dem ins Deutsche übersetzten Titel: «Und Du Kristallograph? Bewertung der Mordanklagen gegen die Pioniere der Dichtestpackung» hat Kahr (2011) eine

amüsante historische Geschichte aufgerollt, die dazu beiträgt, den Zeitgeist im 16.–17. Jahrhundert verständlich zu machen und auch die wissenschaftlichen Exponenten in einem anderen Licht zu sehen. Es geht zunächst um Kepler. Wenn wir oben erfahren, dass er zur Inspiration einer Dichtestpackung für die Interpretation der Struktur eines Schneekristalls durch Beobachtung von Fruchtanordnungen auf einem Marktstand gekommen sei, dann ist das nur die halbe Wahrheit. Tatsächlich gab es einen überlieferten Schriftwechsel (1606–1608) zwischen Kepler und **Thomas Harriot** (1560–1621) über den «atomaren Aufbau der Materie». Harriot, englischer Mathematiker, Naturphilosoph und Astronom, war Mitglied der Expeditionsmannschaft unter Sir Walter Raleigh mit dem Ziel, eine neue Kolonie «Virginia» (heute North Carolina) in der Neuen Welt zu gründen (1585–1586). Von Raleigh erhielt er die Aufgabe, ein System zu entwickeln, um auf den Schiffen Kanonenkugeln optimal raumsparend zu lagern *(Abb. 10)*. Bereits 1591, also 20 Jahre vor Keplers Abhandlung über die sechseckige Schneeflocke, entwickelte Harriot eine Tabelle, wie man von der Kantenlänge einer Grundfläche in Form eines gleichseitigen Dreieckes ablesen konnte, wie viele Kanonenkugeln in einer dichtest gestapelten Anordnung in Form einer trigonalen Pyramide aufbewahrt werden. Mit anderen Worten, Harriot gebührt mindestens eine Miturheber-Anwartschaft für die Entdeckung der Dichtestpackung, die in der Literatur als «Keplers Vermutung» Eingang gefunden hat. «Vermutung» deshalb, weil erst Hales (2005, 2006) den mathematischen Beweis erbrachte, dass die von Kepler und Harriot propagierten Anordnungen tatsächlich die dichtest möglichen sind. Harriot muss ein naturwissenschaftliches Genie gewesen sein, er formulierte das Brechungsgesetz des Lichtes vor Snelius, zeichnete als Erster die Mondoberfläche, beschrieb die Sonnenflecken, studierte vor Galilei die vier hellsten Monde des Jupiters und hinterliess ein innovatives mathematisches Werk. Harriot blieb in der Wissenschaft lange unerwähnt, da er seine Erkenntnisse nie publizierte und seine persönlichen Aufzeichnungen erst posthum veröffentlicht wurden.

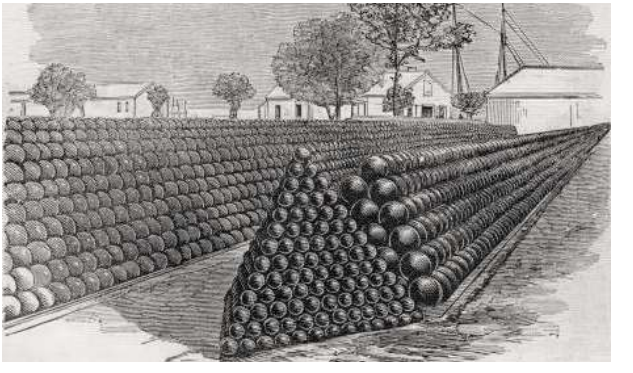


Abb. 10a: Links – Thomas Harriot 1602 (unbekannter Maler).
Abb. 10b: Rechts – Als dichteste Packung gestapelte Kanonenkugeln (1861) unterhalb von Fort Monroe, Virginia.

Nun zu den fiktiven Mordanklagen: Es ist Tatsache, dass Kepler als Theoretiker und Assistent von Brahe grösstes Interesse an Brahes Aufzeichnungen über die Planetenlaufbahnen hatte. Brahe, der Praktiker und Vermesser, ihm aber diese Informationen nicht zugänglich machte. Nach einem gemeinsamen Abendessen (1601) verstarb Tycho Brahe nach qualvollem Todeskampf und Kepler wurde sein Nachfolger mit dem ersehnten Zugang zu Brahes Notizen. Brahes Leichnam wurde 1901 exhumiert. Teile seiner Kleidung sowie Haare seines eindrücklichen Schnurrbarts *(Abb. 11)* wurden im National Museum in Prag aufbewahrt und in der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts forensisch untersucht. Man stellte in den Haaren eine 100-fach überhöhte Quecksilberkonzentration fest. Zusammen mit dem genau dokumentierten Todeskampf von Brahe folgerte man, dass er an einer Quecksilbervergiftung starb. In einem geschichtlichen «Roman» (Gilder & Gilder, 2004) wird der Tod von Brahe einem Mordanschlag durch Johannes Kepler zugewiesen. Es lässt sich aber nicht mit Sicherheit feststellen (Kahr, 2011), ob es wirklich ein Mord war und wer ihn begangen hat. Auch Selbstmord oder unbewusste Selbstvergiftung können nicht ausgeschlossen werden.

Abb. 11: Tycho Brahe mit seinem eindrücklichen Schnurrbart, der im National Museum in Prag aufbewahrt und in der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts forensisch untersucht wurde.

Unbestritten hatte Harriot eine hervorgehobene Position (Kenntnis der Indianersprache) in den Kolonialexpeditionen durch Sir Walter Raleigh bekleidet. Zunächst gab es zwischen den englischen Roanoke Kolonialisten und den eingeborenen Secotan Indianern in «Virginia» ein durch gegenseitigen Respekt geprägtes gutes Einvernehmen. Es ist weiterhin belegt, dass 1586 ein Silberpokal eines Kolonialisten verschwand, wofür die Siedler die Indianer verantwortlich machten. Danach kam es zunächst zu einer Strafaktion der Engländer gegen die Indianer. Die Feindseligkeiten eskalierten, und Morison (1971) schreibt in seinem preisgekrönten zweibändigen Geschichtswerk «Die Europäische Entdeckung Amerikas», dass die Siedler präventiv die Indianer angriffen. Der Indianer Häuptling Wingina floh in einen Wald und wurde dort nach einer Verfolgung von Harriot und Nugent getötet und enthauptet. Für den Ablauf der Ereignisse an diesem 1. Juni 1586 gibt es nur einen schriftlichen Augenzeugenbericht (Ralfe Lane). Darin wird Harriot aber nicht als «Mörder» erwähnt, sondern nur Nugent mit einem nicht weiter spezifizierten stellvertretenden Anführer («deputie propst»). Kahr (2011) versucht zu beweisen, dass es sich bei dem «deputie probst» keinesfalls um Harriot gehandelt haben kann. Er fasst seine Arbeit mit der Feststellung zusammen, dass es keine Beweise für Mordbeschuldigungen gegenüber Kepler und Harriot gibt.

Die symmetrische Gesetzmässigkeit der Kristallflächen

In der Antike hatte Plinius noch geschrieben, dass die sechseckige Form der Schneekristalle rätselhaft sei. Mit dem Beginn der Neuzeit versucht man in der mineralogischen Kristallographie dieses Geheimnis zu lüften und sucht zunächst nach Gesetzmässigkeiten unter den Kristallflächen innerhalb einer Kristallart.

Nicolaus Steno(nis) (Latinisierung von **Niels Stensen**), geb. 1638 in Kopenhagen, Königreich Dänemark, gest. 1686 in Schwerin, Herzogtum Mecklenburg, war ein dänischer Arzt, Anatom und Naturforscher, später katholischer Priester und Bischof. Wilhelm von Humboldt bezeichnete ihn als «Vater der Geologie». Er wurde 1988 durch Papst Johannes Paul II. seliggesprochen.

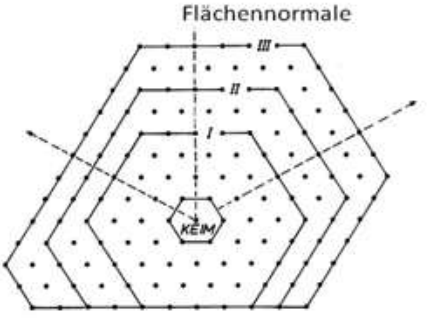


Abb. 12a: Links – Nicolaus Steno, idealisierte Kopie von 1868 nach einem Ölgemälde kurz vor seinem Tod in Schwerin. *Abb. 12b:* Rechts – Stilisierte Darstellung des Kristallwachstums eines hexagonalen Keims zu einer verzerrten Form, bei der aber die Winkel zwischen den Flächennormalen gleichbleiben.

Als Sohn eines Goldschmieds gehörte Nicolaus Steno einer gehobenen sozialen Schicht an und wurde zur Ausbildung auf die beste Schule des Landes, eine Lateinschule, geschickt. Schon als Junge soll Steno acht Sprachen beherrscht haben. Im Alter von 18 Jahren absolvierte er ein dreijähriges Medizinstudium an der Kopenhagener Universität.

Bei der Sektion eines Schafkopfes entdeckte er schon 1660 die Ohrspeicheldrüse. Seine Vorlesungen und anatomischen Demonstrationen machten ihn in ganz Europa berühmt. Auf ihn geht auch das Wissen zurück, dass das Herz ein Muskel ist.

1666 wurde Steno Leibarzt des Ferdinand II. von Medici in Florenz, der grosszügig seine Forschungstätigkeit unterstützte. Innerlich durch die Zersplitterung der reformierten Kirche aufgewühlt und beeindruckt durch die hohe Religiosität der Italiener zur katholischen Kirche, beschäftigte er sich intensiv mit theologischen Fragestellungen, bevor er in einem Zustand innerlicher Leere 1668 eine dreijährige geologische Forschungsreise durch Südeuropa unternahm und schliesslich wieder nach Florenz zurückkehrte.

Während seiner geologischen Forschungsreise erkannte er in Fossilien urzeitliche biologische Relikte, die bis dahin für Zufallsprodukte durch die Laune der Natur *(«Lusus naturae»)* gehalten wurden. Mit seiner 1667 erschienenen Schrift «Canis carchariae dissectum caput» identifizierte er die sogenannten «Zungensteinen» als fossile Haifischzähne. Mit der Erkenntnis der stratigraphischen Grundgesetze und der Theorie zur Entstehung der Sedimentgesteine und ihrer anschliessenden Deformation leistete er einen zentralen Beitrag zur Entwicklung der Geologie als moderne Wissenschaft.

Bei der Untersuchung von Quarzkristallen entdeckte Steno das **Gesetz der Winkelkonstanz**, also die Tatsache, dass symmetrisch äquivalente Kristallflächen immer im selben Winkel zueinanderstehen, und zwar unabhängig von ihrer Grösse oder Form. Mit anderen Worten, der Winkel zwischen den Flächennormalen ist konstant *(Abb. 12)*. Er postulierte dies als eine Kristalleigenschaft und legte damit das Fundament für die moderne Kristallographie.

1674 wurde er der Erzieher des Erbprinzen in Florenz und ein Jahr später als katholischer Priester auch Beichtvater und Seelsorger der Medici. 1685 wurde er nach Schwerin gerufen. Als einfacher Priester ohne bischöfliche Insignien kümmerte er sich um die kleine Gemeinde, bevor er dort 48-jährig wahrscheinlich an einem Gallenleiden verstarb. Laut Zeitzeugen zeichnete er sich in allen Wirkungsstätten durch Liebenswürdigkeit und Bescheidenheit, aber auch mit klaren Forderungen an eine einfache Lebensführung aus, was 1988 zu seiner Seligsprechung führte.

Das Gesetz der Winkelkonstanz wurde auch unabhängig von einem weiteren Universalgelehrten entdeckt. **Domenico Guglielmini** (1655–1710) studierte in Bologna Medizin und Mathematik. Er wurde vor allem durch seine hydrometrischen Studien und Untersuchungen über das Fliessverhalten zur Vermeidung von Überschwemmungen von Flüssen in der Gegend von Bologna bekannt. Zusätzlich wies er als Mediziner kristalline Salze im Blut nach und klärte die Natur der Blutgerinnsel. Mit Hilfe mikroskopischer Kristallisationsexperimente an Salzen bestimmte er die «Kristallform» und beobachtete die **Konstanz der Flächenwinkel** (entsprechend der Beobachtung von Steno beim Quarz). Er folgerte, dass dieselbe Substanz immer die gleiche «Kristallform» aufweist. Guglielmini (1707) führte diese Eigenschaft auf die Existenz von «Molekularkräften» zurück. Er gilt daher mit Romé de L'Isle und Haüy als einer der Väter der Kristallographie. Im Alter von 54 Jahren verstarb Guglielmini an einer Hirnblutung und wurde in der Kirche von San Massimo in Padua beigesetzt.

Abb. 13: Domenico Guglielmini, Stich von C. Rampoldi, 1821.

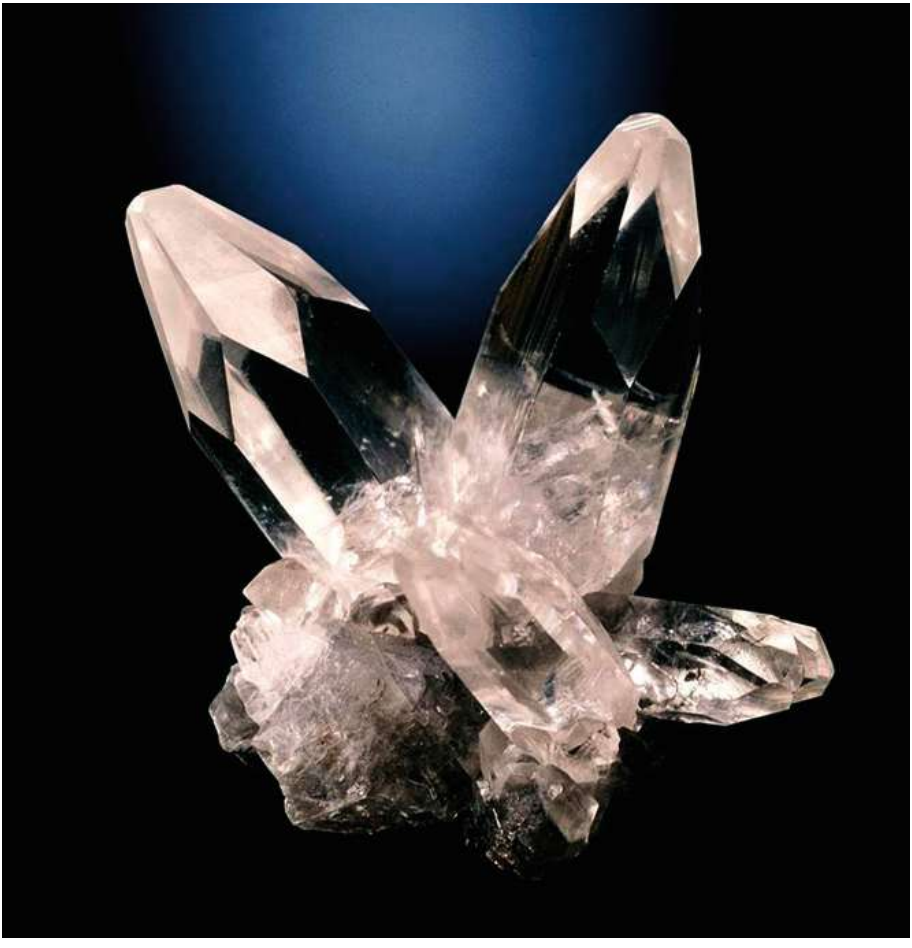


Abb. 14: Prismatische Calcitkristalle (Indiana, USA) (Foto: Olaf Medenbach).

Die Denkweise, dass eine «Kristallform» durch stufenweise Verringerung der aufeinanderfolgenden Schichten bis zu den «integrierenden Molekülen» reduziert werden kann, wird allgemein Haüy zugeordnet (siehe unten), der dies auch zu seinem wissenschaftlichen Lebenswerk entwickelt hat. Die Erwähnung von Bergman in diesem Zusammenhang soll aber verdeutlichen, dass diese Idee bereits geboren war und dem Zeitgeist entsprach (siehe Whewell [1837] und Schrauf (1866)). In seiner Arbeit «De formis crystallorum, praesertim e spatho ortis» zeigte Bergman (1773), dass ein hexagonales Prisma eines Calcitkristalls von einem rhomboedrischen Keim durch Aneinanderreihung von Rhomboedern erhalten werden kann.

Abb. 15a: Links – Torbern Bergman, schwedischer Naturwissenschaftler. *Abb. 15b:* Rechts – Submilimetergrosse Verwachsungen von dipyramidalen Metatorbernitkristallen in einer Druse aus der Les Montmins Mine, Auvergne, Frankreich (Kristallgrösse ca. 0.1 mm).

Torbern Olof Bergman (1735–1784) war an der Universität Uppsala ein bedeutender schwedischer Professor für Physik, Chemie und Pharmakologie, der auch als Begründer der analytischen Chemie gilt. Nach ihm ist das Uranmineral Torbernit $Cu[UO_2|PO_4]_2 \times 10–12H_2O$ und dessen Entwässerungsprodukt Metatorbernit $Cu[UO_2|PO_4]_2 \times 8H_2O$ benannt.

Bereits **Christiaan Huygens** (1629–1695), ein niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker, der Begründer der Wellentheorie des Lichtes («Traité de la lumière»), vertrat die Überzeugung, dass sich sowohl die ausgeprägte Spaltbarkeit als auch die hohe beobachtete Doppelbrechung des Kalkspats durch Stapelung von kleinen unsichtbaren Teilchen («Kalkspatmolekülen»), beschrieben als Rotationsellipsoide mit komprimierter Achse, zu einem makroskopischen Calcitkristall erklären lassen (Huygens, 1690). Die abgeflachten Rotationsellipsoide erinnern in ihrer Form an eine optisch negative einachsige Indikatrix. Es war auch Huygens Idee damit zum Ausdruck zu bringen, dass der Brechungsindex entlang der dreizähligen Achse klein, senkrecht dazu aber gross ist. In der deutschen Übersetzung der «Traité de la lumière» = «Abhandlung über das Licht» (Huygens, 1890) findet man im Kapitel V: «*Über die eigenthümliche Brechung des isländischen Spaths*» einen Abschnitt mit dem Titel: «*Wahrscheinliche Vermuthung über den inneren Aufbau des isländischen Spaths und die Gestalt seiner Theilchen.*»

Der Begriff «Kristallographie» wurde erstmals 1723 lateinisch («Crystallographia») vom Luzerner Arzt **Moritz Anton Cappeler** (1685–1769) verwendet; allerdings nicht im heutigen Sinn. In seinem Buch «Crystallographia historica, physica, medica», das als Manuskript nur fragmentarisch erhalten ist, beschreibt er die Erscheinungsformen, Eigenschaften und Vorkommen des Bergkristalls (Weber, 1923). Nach seinen eigenen Angaben wurde das Buch zu lang, so dass er keinen Verleger fand. Teile dieses Buches wurden in verschiedenen Zeitschriften publiziert.

Abb. 16: M.A. Cappeler, Druck nach einem Gemälde in der «Porträtgalerie merkwürdiger Luzerner» im Lesezimmer der Luzerner Bürger-Bibliothek (Weber, 1915).

Ausserdem liess er einen «Prodromus (Vorläufer) Crystallographica» drucken (entspricht etwa Kapitel 4 des Manuskripts). Wir lernen von Cappeler sinngemäss (Weber, 1923): «*Bei den alpenbewohnenden Schweizern, die den Bergkristall zu suchen pflegen, heisst er wegen seines Funkels auch Strahl oder Strahlstein».* Ausserdem führt Cappeler eine andere Namensableitung für *Crystallus* ein. Der Begriff soll angeblich von *crysalos* abstammen, was bedeutet «durch Kälte und Frost wie Eis verdichtet». Dies erinnert sehr an die Doppeldeutigkeit von Crystallus, die wir bereits von Plinius kennen. Zum Thema Streifung (Striation) von Prismenflächen beim Quarz glaubt er zu erkennen: «*Die Vertiefung der einen Fläche grenzt an die Erhabenheit der benachbarten Fläche.*» Zum Thema «Heimat des Bergkristalls» *(patria crystalli)* schreibt er:

«*In keinem Land fehlen Bergkristalle, ihre eigentliche Heimat ist aber auf den hohen Alpengipfeln der Schweiz… Das Gestein, aus dem die kristallerzeugenden Berge bestehen, ist bei uns Schweizern als Geissbergstein bekannt, vielleicht deswegen, weil die Berge so steil sind, dass nur die Geissen, kaum aber die Menschen darauf herumklettern können… Wie bei den künstlichen Kristallen finden wir die grössten Kristalle, wo der Hohlraum weiter und die zur Kristallbildung notwendige Stoffmenge ausgiebiger ist. Diese Kristallhöhlen nennen die Strahler Öfen (manchmal auch Hafen oder Keller genannt).*»

Cappeler gibt ein eindrückliches Bild über den Beruf und die Arbeitsweise eines Strahlers. Die wichtigsten Quarzvorkommen werden in aller Einzelheit diskutiert und dokumentiert (z. B. Kristallhöhle Zinggenstock, Grimsel). Kristallkluftanzeichen werden beschrieben, das Ausbeuten einer Kluft, vom Wegebau bis zur Kristallbergung, über Sprengung und Klufterweiterung, mit allen notwendigen Werkzeugen detailliert wiedergegeben.

Abb. 17: Jean-Baptiste Louis Romé de l'Isle (1736–1790).

Ungefähr 100 Jahre nachdem Steno das Gesetz der Winkelkonstanz für die Flächen des Quarzes formulierte, beginnt man jetzt die Gesetzmässigkeiten, die für unterschiedliche Kristallarten gefunden wurden, zu systematisieren. **Jean-Baptiste Louis Romé de L'Isle** (1736–1790) war ein französischer Mineraloge und gilt als einer der Mitbegründer der Kristallographie. 1761 kam er in Indien als

Offizier im Französisch-Englischen Kolonialkrieg in englische Gefangenschaft, wurde nach China deportiert und kehrte 1764 nach Frankreich zurück. Beeinflusst durch seine Zeit in Indien und China interessierte er sich für Naturkunde.

Inspiriert durch die Klassifizierung von Pflanzen und Lebewesen durch Carl von Linné versuchte Romé de L'Isle, reguläre Eigenschaften auch auf Mineralien zu übertragen. Aufbauend auf seinem «Essai de Cristallographie» von 1772 postuliert Romé de L'Isle (1783) die Winkelkonstanz für Kristalle jeglicher Art. Zusammen mit seinem Assistenten Carangeot erfand er um 1780 das Anlegegoniometer für verbesserte Winkelmessungen an Kristallen *(Abb. 18)*. Diese Messungen dokumentiert er für mehr als 500 reguläre «Kristallformen» (allein 30 für Calcit), die den entsprechenden Mineralarten zugeordnet wurden. Romé de L'Isles systematische Messungen und der daraus abgeleitete Beweis des Gesetzes der Winkelkonstanz sind das erste Beispiel für systematisches, methodisches Vorgehen in der Kristallographie. Insofern kann Romé de L'Isle als Begründer der wissenschaftlichen Kristallographie gelten. Von ihm stammt auch die heute allgemein bekannte Beobachtung, dass NaCl aus einer harnstoffhaltigen Lösung nicht in Form von Würfeln, sondern als Oktaeder auskristallisiert. Nach Romé wurde das Mineral Roméit $(Ca,Fe)_2(Sb,Ti)_2(O,OH,F)_7$ (Pyrochlor Strukturtyp) benannt.

Abb. 18: Carangeot-Typ Anlegegoniometer zur Vermessung von Kristallflächen der Firma Stoe um 1900. (Foto Olaf Medenbach)

William Hyde Wollaston (geb. 1766 in Norfolk, England, gest. 1828 in London) war ein englischer Arzt, Physiker und Chemiker, der unter anderem 1803 die chemischen Elemente Palladium und Rhodium entdeckte. Er konstruierte ein optisches Goniometer *(Abb. 19)*, mit dem die Reflexion eines Lichtstrahls an Kristallflächen verwendet wurde, um die Position von zueinander geneigten Kristallflächen zu bestimmen (Wollaston, 1809). Der Kristall wurde auf eine drehbare horizontale Achse mit Winkelgraduierung justiert und gedreht, bis die Reflexionsbedingungen eines Lichtstrahls an der Oberfläche des Kristalls erfüllt waren. Ein weit verbreitetes Nachfolgegerät für die Vermessung von Kristallflächen war das 1893 von Victor Goldschmidt entwickelte Zweikreisgoniometer, in dem die Lichtquelle und das Beobachtungsfernrohr für die Reflexion bereits integriert waren. Wollaston wurde für seine wissenschaftlichen Leistungen zur optischen Vermessung von Kristallen bereits 1818 durch den Mineralnamen Wollastonit, ein Pyroxenoid der Zusammensetzung $CaSiO_3$ geehrt.

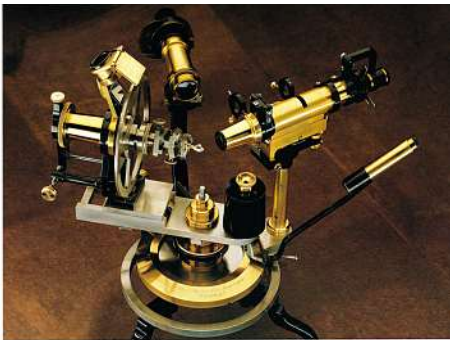


Abb. 19a,b: Optische Reflexionsgoniometer. Abb. 19a: Links – Wollaston-Typ Reflexionsgoniometer der Firma Dubosc (Paris, Mitte 19. Jahrhundert) mit horizontaler Drehachse. Der Kristall wird auf die mit K gekennzeichnete Halterung justiert und durch Drehen der Mess-Spindel wird ein Lichtstrahl von einer externen Quelle auf der Kristallfläche zur Reflexion gebracht und der Reflexionswinkel notiert. *Abb. 19b:* Rechts – Goldschmidt-Typ Zweikreisgoniometer mit integrierter Lichtquelle und Beobachtungsfernrohr. (Fotos: Olaf Medenbach)

Die Entwicklung eines optischen Reflexionsgoniometers zu Beginn des 19. Jahrhunderts ist auch deshalb bemerkenswert, da erst 1814 die öffentliche Gasbeleuchtung eingeführt wurde, und der US-amerikanische Erfinder Thomas Ava Edison (1847–1931) erst 1880 das Basispatent für die elektrische Glühbirne erhielt. Das Wollaston-Refraktometer wurde ursprünglich entweder mit Kerzenlicht oder dem durch das Fenster einfallende Sonnenlicht verwendet. Das Reflexionssignal wurde auf einer weissen Wand oder der Decke des Raumes beobachtet.

Zum Ende des 18. Jahrhunderts hat sich auch die Mineralogie im deutschsprachigen Raum von einer beschreibenden Disziplin zu einem eigenständigen Wissenschaftszweig entwickelt. **Carl Abraham Gerhard** (1738–1821), Gründer und Professor für Mineralogie und Bergbau an der Berliner Bergakademie, gab in seinem Lehrbuch folgende Definition der Mineralogie (Gerhard, 1781):

In einem erweiterten Sinn umfasst die Mineralogie folgende Aufgaben:

- Die Bestimmung der mineralischen Körper, ihrer Natur, ihrer allgemeinen Eigenschaften und ihrer Entstehung.
- Die Untersuchung ihrer Lagerstätten.
- Die Erforschung der Art und Weise wie sie in diesen Lagerstätten erscheinen.
- Die Untersuchung der Kennzeichen, die sie voneinander unterschieden.
- Die Methodik ihre Konzentration zu bestimmen.

Im ausklingenden 18. Jahrhundert hat Latein, zumindest in dem hier behandelten Bereich der Naturwissenschaften, als universale Wissenschaftssprache ausgedient. Französisch, Englisch, Deutsch und Russisch dominieren ab jetzt die Fachliteratur.

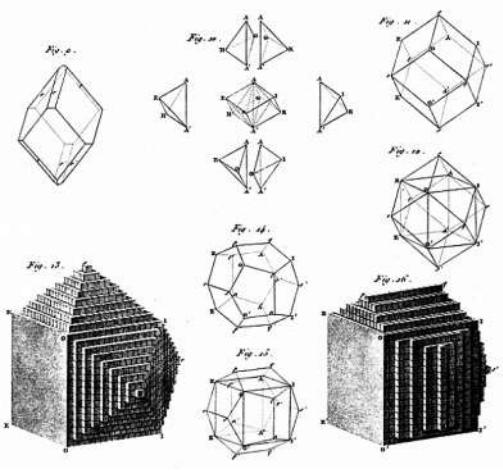


Abb. 20a: Links – René Just Haüy, Gemälde von Ambroise Tardieu (1788–1841); *Abb. 20b:* Rechts – Beispiel aus Haüys (1801) «Traité de Minéralogie» zum Aufbau der Kristalle durch «integrierende» Moleküle.

René-Just Haüy, auch Abbé Haüy (geb. 1743 in Saint-Just-en-Chaussée, gest. 1822 in Paris), war der Sohn des Webers Just Haüy. Er hatte einen jüngeren Bruder, Valentin Haüy, der als Blindenpädagoge bekannt wurde. Seine schulische Ausbildung erhielt René-Just zunächst am Collège de Navarre (klassische Sprachen und Naturwissenschaften), später am Collège du Cardinal Lemoine. Dort studierte er ausserdem Botanik und später Mineralogie und wurde auch am gleichen Collège zunächst Dozent, dann geweihter römisch-katholischer Priester und Professor.

Es klingt wie eine Legende, wenn berichtet wird (Kunz, 1918; Black, 1918), dass ihm 1784 ein Calcitkristall zu Boden fällt und in hunderte Fragmente zerbricht. Haüy erkennt, dass alle Bruchstücke dieselbe Form besitzen (Rhomboeder) und leitet daraus seine Theorie ab, dass Kristalle aus kleineren Einheiten (integrierenden Molekülen) aufgebaut sind, die dieselbe Form haben wie der Kristall selbst *(Abb. 20)*. Nach 20-jähriger Tätigkeit am am Collège du Cardinal Lemoine gibt er seine dortige Professur auf, um sich ganz der Mineralogie zu widmen. Während der Französischen Revolution wurde er 1792 inhaftiert, da er den Verfassungseid verweigerte und wäre wahrscheinlich wie viele seiner Zeitgenossen unter der Guillotine umgekommen, wenn nicht ein Schüler und Freund für ihn interveniert hätte (Zeitgenössischer Ausspruch: «*Es ist besser, einen sturen Priester zu schonen als einen harmlosen Gelehrten umzubringen*»). 1794 wird er Kurator am Cabinet des Mines und Physikprofessor an der Ecole Normale. 1802, unter Napoleon Bonaparte, wird er zum Professor für Mineralogie am Muséum national d'histoire naturelle berufen und Gründer des Musée de Minéralogie an der École nationale supérieure des mines de Paris. Nach der Rückkehr Napoleon Bonapartes aus dem Exil auf Elba und seinem triumphalen Einzug in Paris im Frühjahr 1815 beförderte

er Haüy zu einem Ritter der Légion d'Honneur (Ehrenlegion). Aber bereits wenig später wurde er durch die Restaurationsregierung seiner Ämter und Titel enthoben, und seine Pension wurde ihm abgesprochen. 1822 verstarb er verarmt. Zur Würdigung seiner Leistungen ist sein Name einer der 72, die in goldenen Buchstaben oberhalb des Hauptbogens des Eiffelturms hervorgehoben werden. Ausserdem wurde schon 1807 das Mineral Haüyn *(Abb. 21)* aus der Sodalithgruppe nach ihm benannt (Bruun-Neergard, 1807).

Französische Revolution (1789–1794)

Der Kampf für bürgerliche Freiheitsrechte und für die Schaffung einer konstitutionellen Monarchie kennzeichnet eine erste Phase (1789–1791). Ein Dekret der Nationalversammlung vom 27. November 1790 schrieb allen Priestern den Eid auf die neue Verfassung vor. Papst Pius VI. verbot den Eid bei Strafe der Exkommunikation. Nur knapp die Hälfte der Geistlichen, hauptsächlich aus dem niederen Klerus, leistete den Eid, der aber von Abbé Haüy verweigert wurde.
Angesichts der inneren und äusseren gegenrevolutionären Bedrohung wurde in der zweiten Phase (1792–1794) eine Republik mit radikaldemokratischen Zügen ausgerufen. Eine Revolutionsregierung verfolgte mit Mitteln des Terrors und der Guillotine alle «Feinde der Revolution».
In der Direktorialzeit (1795 bis 1799) behauptet eine von besitzbürgerlichen Interessen geleitete politische Führung die Macht nur mühsam gegen Volksinitiativen für soziale Gleichheit und gegen monarchistische Restaurationsbestrebungen.
Restauration (1814–1830) bezeichnet in der Geschichte Frankreichs die Zeit der Wiederherstellung der Bourbonenmonarchie. Unterbrochen wurde die Restaurationsepoche durch die Rückkehr Napoleon Bonapartes aus der Verbannung. Die Herrschaft Ludwigs XVIII. und seines jüngeren Bruders Karl X. war von Konflikten zwischen ultraroyalistischen und bürgerlich-liberalen Kräften geprägt.

Wahrscheinlich inspiriert durch die Erkenntnisse, die Haüy über den Aufbau von Mineralien durch die Bruchstücke (integrierende Moleküle) des zerstörten Calcitkristalls erlangte, kombiniert mit seinem profunden Wissen aus der Botanik, verfasste er eine vierbändige «Traité de Minéralogie» (Haüy, 1801). Damit betrat er in vielfacher Hinsicht Neuland, indem er neue Kriterien zur Identifizierung von Mineralien festlegte und eine erste «moderne» systematische Nomenklatur entwickelte (Gratacap, 1918). Bereits 1789 verfasste **Abraham Gottlob Werner**, der seit 1775 als Inspektor und Lehrer der Mineralogie an der Bergakademie in Freiberg wirkte, eine systematische Mineral-Klassifikation, die neben Mineralien auch Erden, Gesteine und organische Naturprodukte umfasste (Werner & Hoffmann, 1789;

Abb. 21: Haüyn aus Mendig in der Eifel, Rheinland-Pfalz (Foto Frédéric Hède, Kristallgrösse: 1 mm).

Werner, 1817). Darin wurde, wie bei Haüy, die chemische Zusammensetzung zur Grundlage der Klassifikation und Unterscheidung der Mineralarten. Zusätzlich werden bei Haüy aber Zuordnungen durch die Geometrie der Kristalle unterstützt. Basierend auf seiner Theorie der integrierenden Moleküle definiert er: «*Die primitive Form ist ein Teilchen feststehenden Umrisses, das symmetrisch alle Kristalle der gleichen Mineralart aufbaut*» und folgert: «*Kristallflächen sind natürliche Verbindungsebenen definiert durch die mechanische Unterteilung dieser Kristalle. Die Flächenwinkel können somit berechnet und mit einem Binokular gemessen werden.*» Diese Flächenwinkel umfassten auch diejenigen, die Spaltflächen zueinander aufweisen. Zusätzliche Kriterien waren das spezifische Gewicht, die Härte, Lichtbrechung, der qualitative Glanz wie glasig, fettig, perlmuttartig usw. Auch physikalische Eigenschaften wie Pyroelektrizität und Phosphoreszenz werden berücksichtigt. Reaktionen mit Säure und als Folge von Wärmebehandlung werden ebenfalls aufgezählt. Die Rolle der Farbe, die noch bei Plinius und Albertus Magnus prominent war, wird explizit in den Hintergrund gerückt, weil sie als variabel, flüchtig und möglicherweise artfremd für den spezifischen Typ eines integrierenden Moleküls beurteilt wird. Farbe und Durchsichtigkeit fungieren nur als Nuancen,

die zum Gesamtbild beitragen. Industrielle Anwendungen und dem Zeitgeist entsprechend therapeutischer Wert werden ebenfalls erörtert, ebenso wie die wichtigsten Lokalitäten jeder Mineralart. Nach Erarbeitung dieser sehr umfassenden Identifzierungskriterien erscheint die vorgeschlagene Klassifikation für uns heute doch sehr rudimentär.

Es erfolgt eine Unterteilung in 4 Klassen:

1. *Substances acidifères composées d'un acide uni à une terre ou à un alcali, et quelquefois à un et à autre* (Salze: z. B. : Karbonate, Sulfate, Nitrate, Phosphate, Arsenate, Borate) mit drei Unterordnungen
   1.1 *Substances acidifères terreuses* (Erdalkalisalze)
   1.2 *Substances acidifères alkalines* (Alkalisalze)
   1.3 *Substances acidifères alkalino-terreuses* (Alkali-Aluminiumsalze: Alaun, Cryolith)
2. *Substances terreuses* (erdige Substanzen: diese Klasse umfasst vor allem Silikate und Alumiumoxide wie Spinell, Korund und sogar (fälschlicherweise) das Titanoxid Anatas. Titanoxide sind eigentlich in Klasse 4.3 zusammengefasst)
3. *Substances combustibles non metalliques* (brennbare nicht metallische Substanzen)
   3.1 *Simples* (Anthrazit, Diamant)
   3.2 *Composées* (Bitumen)
4. *Substances metalliques* (metallische Verbindungen, beginnend mit den reinen Metallen, gefolgt von Legierungen, Metalloxiden, Metallsulfiden und Metallsalzen usw. Die Art der Metalle wird in drei Ordnungen untergliedert
   4.1 *Non oxydables immédiatement* (nicht leicht oxidierbar, z. B.: Platin, Gold, Silber)
   4.2 *Oxydables et réductibles immédiatement* (oxidierbar und leicht reduzierbar: Quecksilber und seine Verbindungen.)
   4.3 *Oxydables, mais non réductibles immédiatement* (oxidierbar aber nicht leicht reduzierbar: Blei, Nickel, Kupfer, Eisen, Zinn, Zink, Wismut, Kobalt, Arsen, Mangan, Antimon, Uran, Molybdän, Titan, Tellur, Chrom).

Ein zusätzlicher Anhang umfasst Mineralien, die nicht genügend untersucht waren, um sie einer seiner Klassen zuzuordnen: z. B. Amiant (feinfaseriger Aktinolith?), Aragonit, Anhydrit, Diaspor, Sepiolith, Jade, Prehnit, Lepidolith, Turmalin, die Zeolithe und weitere heute bekannte Mineralien.

Wenn auch chemische Mineralklassifikationen bereits vor derjenigen von Haüy (1801) existierten, z. B. Werner (1789, 1817), Karsten (1791) und eine geometrische Ordnung bereits bei Romé de L'Isle (1783) vorgeschlagen wurde, galt das System von Haüy generell als überlegen, weil es chemische, geometrische und physikalische Kriterien umfasste. Kritische Vergleiche der unterschiedlichen Klassifizierungssysteme finden sich z. B. bei Berzelius (1815), Leonhard et al. (1817) und Jameson (1820).

Kritik und Erweiterung von Haüys Model der integrierenden Moleküle

Haüys Theorie der Kristallstruktur basierend auf den integrierenden Molekülen wurde grundlegend modifiziert. Aber seine Theorie ermöglichte ihm, zu einer Erkenntnis zu gelangen, die man auch heute als eines der wichtigsten Gesetze der klassischen Kristallographie bezeichnet: Jede Kristallfläche lässt sich durch drei ganze Zahlen beschreiben (Moses, 1918).

Die Idee der integrierenden Moleküle implizierte für Haüy (Kubbinga, 2012), dass die chemische Individualität einer Substanz auf den jeweiligen integrierenden Molekülen beruht, die aus einer bestimmten Anzahl von Atomen verschiedener Arten bestehen und in einer spezifischen Weise angeordnet sind. Im damaligen Verständnis waren Atome kugelförmig und alle gleich gross. Die Moleküle waren sehr klein, aber wie klein war der Phantasie überlassen. Ausserdem musste die Symmetrie der Moleküle einen Bezug zur makroskopischen Symmetrie des Kristalls besitzen.

Das oben besprochene Individualitätsprinzip erforderte auch, dass z. B. Mineralien mit verschiedener chemischer Zusammensetzung nicht die gleichen «Kristallformen» haben dürfen. Mit diesem Problem war Haüy bereits konfrontiert, als er in fossilen Muscheln die Koexistenz von Calcit und Siderit beobachtete. Er argumentierte, dass der Calcit dem Siderit als «Neuankömmling» seinen Stempel aufgedrückt habe (Kubbinga, 2012). Ein weiteres Problem für Haüy und Zeitgenossen war die Existenz von zwei chemisch identischen Verbindungen unterschiedlicher Geometrie (z. B. Calcit und Aragonit, Pyrit und Markasit), was unter anderem als Widerspruch zur damaligen Doktrin der drei Aggregatszustände angesehen wurde.

Eilhard Mitscherlich (1794–1863), ein deutscher Chemiker und Mineraloge, war beim morphologischen Vergleich von Kaliumphosphat und Kaliumarsenat überrascht, dass beide Verbindungen identische «Kristallformen» aufwiesen (Isomorphie). Mitscherlich (1821) konstatierte:

«Die gleiche Zahl von Atomen in der gleichen Weise angeordnet produziert identische Kristallformen. Daher ist die Kristallform unabhängig von der chemischen Art der Atome und ausschliesslich durch deren Anzahl und relativer Anordnung bestimmt.»

Ein weiterer wichtiger Schritt basiert auf der Beobachtung von Mitscherlich, dass, wenn man Schwefel aufschmilzt und langsam auskristallisiert, sich eine andere neue Art (Modifikation) von Schwefelkristallen bildet (Dimorphie oder Polymorphie) als im Ausgangsmaterial. Zur Erklärung musste man sich jetzt nur eine andere Anordnung der Schwefelatome innerhalb der Moleküle vorstellen.

Die Schule von **Christian Samuel Weiss** (siehe unten) unterschied sich von Haüy vor allem dadurch, dass man einen makroskopischen Kristall als Ganzes durch ein Koordinatensystem beschrieb, das auch eine Definition von Kristallflächen erlaubte (Kubbinga, 2012). Das heisst, die «primitive Form» oder die «integrierenden Moleküle» von Haüy wurden zur Klassifizierung überflüssig. Als **Bravais** und die Schü-

ler von Weiss (siehe unten) die 14 möglichen Punktgitter (Bravais-Gitter) definierten *(Abb. 26)* und ableiteten, vollzog sich der Schulterschluss zwischen der geometrisch-mathematischen Denkweise und der molekularen Theorie als deren Exponent Haüy gesehen wurde. Bravais Gitterpunkte dieser «modernen Kristallographie» sind nichts anderes als die Schwerpunkte der Moleküle (Kubbinga, 2012).

Unterschiedliche Koordinatensysteme zur Klassifizierung

Anfänglich noch Anhänger von Haüys Idee einer «primitiven Polyederform» als Baustein der Kristallstruktur, entwickelt Weiss (1809, 1815) auf der Grundlage der an unterschiedlichsten Kristallen auftretenden Kristallflächen und deren Achsenabschnittsverhältnissen rechtwinkelige Achsensysteme, womit die Lage jeder Fläche und sämtliche Richtungen definierbar werden. Zu bemerken ist (Pertlik, 2006), dass auch «niedrigsymmetrische» (trikline und monokline) Kristalle in ein rechtwinkeliges Achsensystem («Orthogonalitätsdogma») gestellt werden. Mohs (1822, 1824) verwendet bereits die Kristallsysteme als Klassifizierungsprinzip für Mineralien.

Abb. 22: Christian Samuel Weiss 1810 nach einer Zeichnung von Jung.

Christian Samuel Weiss (1780–1856) war ein deutscher Mineraloge und Kristallograph. Er gilt als Begründer der geometrischen Kristallographie und stellte das Rationalitätsgesetz auf: Alle Kristallflächen und alle Kanten lassen sich durch rationale Indizes (Brüche ganzer Zahlen) darstellen. Nach seinem Studium in Leipzig und Freiberg habilitierte er 1803 in Leipzig, wo er 1808 auf den Lehrstuhl für Physik berufen wurde. 1810 folgte die Berufung auf die Professur für Mineralogie an die neue Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin. Dort baute er den mathematischen Zweig der Mineralogie aus und machte sie zur Grundlage des Kristallaufbaus.

Abb. 23: Friedrich Mohs, Lithographie von Joseph Kriehuber, 1832.

Carl Friedrich Christian Mohs (1773–1839) war ein deutsch-österreichischer Mineraloge. Mohs studierte Mathematik, Physik und Chemie an der Universität in Halle (Saale) und der Bergakademie Freiberg. 1812 wurde Mohs zum Professor der Mineralogie am Joanneum in Graz berufen (Mohshärteskala). Ab 1817 über-

nahm er als Nachfolger seines Lehrers Abraham Gottlob Werner den Lehrstuhl an der Bergakademie Freiberg. Mohs entwickelte etwa gleichzeitig, aber nach eigenen Angaben unabhängig von Christian Samuel Weiss, ein Konzept der Kristallsysteme. 1826 folgte zunächst eine Berufung nach Wien. 1835 wurde Mohs als Bergrat an das Montanistikum nach Leoben berufen.

Der Schritt zur Beschreibung des späteren monoklinen und triklinen Systems, im Gegensatz zu Weiss mit schiefwinkligen Achsen, wird von Naumann (1824, 1826), Frankenheim (1826) und Grassmann (1829) vollzogen. Frankenheim (1826) ging von den Kristallsystemen nach Weiss (1815) aus, die er nach empirischer Betrachtung von diversen Polyedern in 32 Ordnungen unterteilte und somit als Erster die 32 Kristallklassen (= kristallographische Punktgruppen) definierte (Burckhardt, 1984; Pertlik, 2006). Neumann (1823), ein ehemaliger Doktorand von Weiss, führte die stereographische Projektion zur Beschreibung der Kristallflächen ein, und Axel Gadolin (1871), ein finnischer – russischer Mineraloge und Kristallograph in St. Petersburg, verwendete als erster in seiner Ableitung der 23 Punktgruppen von den Kristallsystemen Stereogramme zur vereinfachten Darstellung der äusseren Symmetrie. Sein Vater Johan Gadolin war Entdecker des Elements Yttrium und ihm zu Ehren erhielt das Element Gadolinium seinen Namen. Das Mineral Gadolinit wurde ebenfalls nach Johan Gadolin benannt, weil er darin Yttrium entdeckte (also nicht wegen eines möglichen Gehalts an Gadolinium).

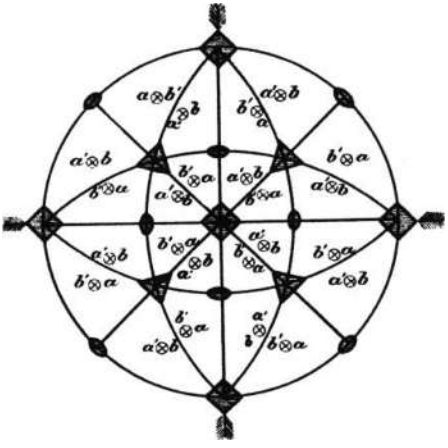


Abb. 24: Stereogramm der Symmetrieelemente der höchst symmetrischen Kristalltracht (Holoedrie) des kubischen Systems (Gadolin, 1871).

Beziehung zwischen geometrischer Symmetrie und optischer Symmetrie

Sir David Brewster (1781–1868) war ein Schottischer Naturwissenschaftler, der insbesondere durch seine wissenschaftlichen Leistungen im Bereich der Optik bekannt wurde und als Vater der optischen Mineralogie eingestuft werden kann. Nachdem der dänische Wissenschaftler und Arzt Erasmus Bartholin (1669) die Doppelbrechung am Kalkspat erkannte, was von Huygens (1690, 1890) physikalisch interpretiert und auch z. B. auf Quarz ausgeweitet wurde, konnte Brewster (1817–1820, 1818) nach der Entdeckung der unterschiedlichen Kristallsysteme die Beziehung zwischen optischer und geometrischer Symmetrie aufklären. Er benutze dabei die mikroskopische Beobachtung der Kristalle im konoskopischen Strahlengang und beschrieb erstmals die optisch einachsige Indikatrix für die wirteligen

Kristallsysteme (tetragonal, trigonal und hexagonal), während für das «prismatische System» (umfasste damals die heutigen Kristallsysteme triklin, monoklin und orthorhombisch) optische Zweiachsigkeit festgestellt wurde bzw. eine Indikatrix mit drei-unterschiedlich langen Achsen. Die Zeolith-Mineralien Brewsterite-Ba und Brewsterite-Sr wurden zur Würdigung seiner wissenschaftlichen Leistungen benannt.

Die Formen der Einheitszelle

Auguste Bravais (1811–1863), ein französischer Physiker und Kristallograph, beendete seine klassische Ausbildung am Collège Stanislas in Paris mit dem Abschluss 1827 und erhielt den ersten Preis in Mathematik. Auch an der École Polytechnique schnitt er anschliessend als einer der Besten ab. Darauf konnte er sich sein späteres Betätigungsfeld aussuchen und wählte zunächst die französische Marine. Nach verschiedenen akademischen Zwischenstationen wurde er 1845 Professor für Physik an der École Polytechnique in Paris und befasste sich

Abb. 25: Auguste Bravais (ca. 1850).

mit Kristallsymmetrie. Bravais (1850) zeigte, dass es im dreidimensionalen Raum nur 14 Elementar- oder Einheitszellen der Kristalle gibt (Bravais-Gitter), die folgende Eigenschaften besitzen:

- Die Einheitszelle ist die einfachste sich wiederholende Einheit in einem Kristall.
- Gegenüberstehende Flächen einer Einheitszelle sind parallel.
- Die Kanten der Einheitszelle verbinden äquivalente Stellen.

In der Entdeckung der Bravais-Gitter hatte er, wie sich später herausstellte, Vorläufer in Frankenheim (1826) und Hessel (1830, 1897). Bravais war allerdings der erste, der einen strengen Beweis veröffentlichte und weite wissenschaftliche Aufmerksamkeit fand. Auch wenn heute nur der Name Bravais-Gitter verbreitet ist, lässt sich auch an diesem Beispiel zeigen, dass in den meisten Fällen der Ruhm einer scheinbar neuen Erkenntnis oder Erfindung eigentlich nicht einer Person oder Gruppe zukommt, sondern dass durch die Entwicklung der Wissenschaft «das Feld bestellt war», so dass an verschiedensten Orten ähnlich Erkenntnisse keimen konnten.

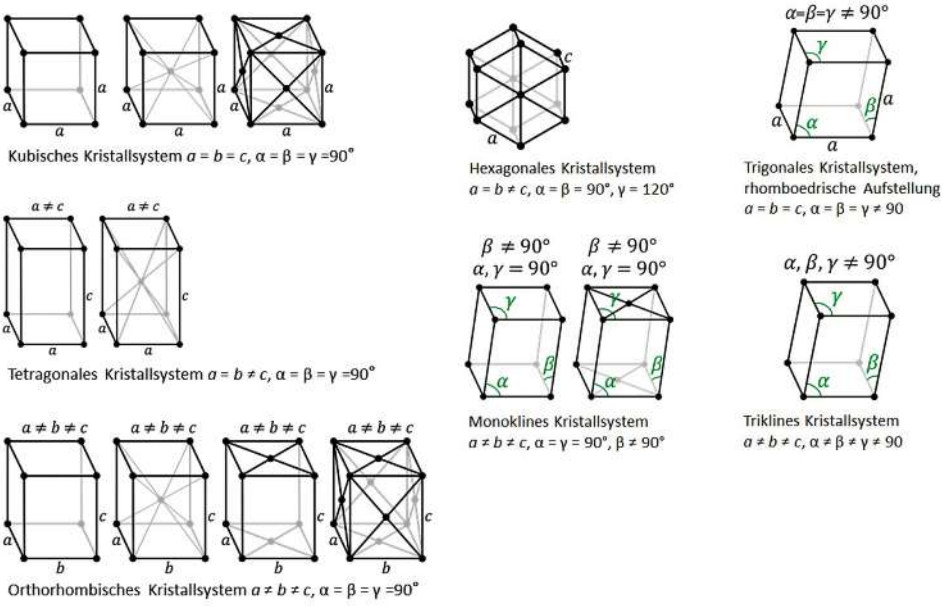


Abb. 26: Die 14 Bravais-Gitter sind eine Klassifikation der möglichen Translationsgruppen regelmässiger Punktgitter. Die vier orthorhombischen Bravais-Gitter (von links nach rechts) werden als primitiv (P), innenzentriert (I), basiszentriert (C) und flächenzentriert (F) bezeichnet. In den verbleibenden 6 Kristallsystemen verringert sich die Anzahl der Bravais-Typen aus Gründen der Symmetrie, so dass ausser einem primitiven Gitter in folgenden Kristallsystemen noch zusätzliche Gittertypen auftreten: kubisch – innenzentriert und flächenzentriert; tetragonal – innenzentriert; monoklin – basiszentriert.

Die Ableitung der Raumgruppen

Mit **Evgraf Stepanovich Fedorov** (1853–1919), einem russischen Mathematiker, Kristallograph, Mineraloge, Philosoph und Revolutionär, wurde Haüys molekulare Denkweise und Bravais Definition des Gitters in der Kristallographie zu einem atomaren Konzept ausgeweitet. Mit der Ableitung der 230 Raumgruppen wird die theoretische Basis für die Beschreibung einer Kristallstruktur geschaffen. Es sei daran erinnert, dass das Periodensystem der Elemente erst 1869 vom Russen Dmitri Mendelejew (1834–1907) und wenige Monate später von dem Deutschen

Abb. 27: Evgraf Stepanovich Fedorov.

Lothar Meyer (1830–1895) aufgestellt wurde, und Niels Bohr erst 1913 das nach ihm benannte Atommodel entwickelte.

Fedorovs Vater, ein Armeeangehöriger, starb bereits in seiner frühsten Jugend und Evgraf Stepanovich besuchte eine Militärschule. Von klein auf war er an Geometrie interessiert und schon mit 16 begann er, ein Buch (Fedorov, 1885) mit dem ins Deutsche übersetzten Titel «Grundlagen zur Untersuchung der Konfiguration» zu schreiben. Shafranovskii & Belov (1962) verweisen auf seine Autobiographie und setzen den Beginn des Buches in das Jahr 1879. In der Zwischenzeit hatte sich Fedorov, der nebenbei ein hervorragender Violinist war, der revolutionären Organisation «Land und Frieden» verschrieben und soll dem bekannten Revolutionär P.A. Kropotkin geholfen haben, 1876 aus der Peter und Paul Festung in St. Petersburg zu fliehen. Ausserdem wird berichtet, dass er im Haus seines künftigen Schwiegervaters eine verbotene sozialistische Zeitschrift herausgegeben habe, die das existierende Sozialsystem kritisierte und die Vereinigung aller revolutionären Sozialisten zum Ziel hatte (Galiulin, 2003). Man sagt, das habe seinen prägnanten Schreibstil gefördert.

Das unverwechselbare Charakteristikum seiner Geometrie war sein Ordnungskonzept. Darunter verstand er eine Anordnung von äquivalenten Bestandteilen, wobei jeder dieser Bausteine in der gleichen Art und Weise von anderen äquivalenten Bauelementen umgeben ist. Nur solche ideal kristallinen Systeme, so nahm er an, können ein energetisches Minimum besitzen. Entsprechende Gedankengänge haben wahrscheinlich Fedorov bewegt, am Gorny Institut (Bergbauinstitut) in St. Petersburg weiter zu studieren, wo er 1883 als Klassenbester abschloss (Galiulin, 2003). Fedorovs zentrales Werk «Symmetrie realer Struktursysteme» (Fedorov, 1891a) wurde auf Russisch gedruckt und enthielt eine vollständige Ableitung der Raumgruppen. Vorabdrucke wurden bereits 1890 an Freunde einschliesslich Schoenflies (siehe unten) versandt. Fedorov umschreibt sein Buch wie folgt (Shafranovskii & Belov, 1962):

«*Es wird eine vollständige Ableitung realer Punktsysteme gegeben sowie eine Ableitung der unterschiedlichen Arten von Kristallstrukturen. Das Werk umfasst auch die Systeme von Sohncke (1876) und anderen als Spezialfälle, die hier einfache Systeme genannt werden. Jede Gruppe ist exakt durch eine algebraische Gleichung bestimmt.*»

Bereits wenige Jahre später folgte eine Serie von deutschen Artikeln (Fedorow(v), 1892, 1894b, 1895, 1896) in der Zeitschrift für Kristallographie, die Konzept und Verständnis der Raumgruppen einem breiteren Fachpublikum verdeutlichen sollte.

Federovs Leben war nicht einfach. Selbst wenn er einer der wissenschaftlich herausstechendsten Persönlichkeiten am Gorny Institut war, hatte er dort zunächst keine permanente Anstellung und verbesserte seinen Lebensunterhalt durch geologische Kartiertätigkeiten. Nebenbei erfand er mit dem Universaldrehtisch einen Zusatz zum Polarisationsmikroskop, der dreidimensionale Winkelmessungen ermöglichte (Fedorow(v), 1894a), und entwickelte bereits 1889 ein Zweikreis-Refle-

xionsgoniometer zur verbesserten Kristallvermessung (Shafranovskii & Belov, 1962). 1905 wird Fedorov der erste gewählte Direktor des Gorny Instituts, was er als Lebensaufgabe bis zu seinem Tod 1919 auffasste.

Fedorov hinterliess auch als Anhänger des Perfektionismus (Streben nach Perfektion) einen philosophischen Nachlass: Während der Evolution wird Perfektion und Harmonie nur im Augenblick der Auflösung erreicht, um Platz für eine kommende harmonischere Generation zu schaffen. Wenn das Leben in vollem Schwung ist, können sich nur instabile Formen entwickeln. Die Kristallstruktur ist von einem Kern ausgehend so einzigartig regelmässig aufgebaut (maximale Harmonie und Perfektion), dass sie keine Mutationen kennt. Daher ist der Kristall auch ein Symbol des Todes (Galiulin, 2003). Dies schliesst wiederum den Kreis, da schon im klassischen Altertum das Zerstören eines Kristalls als Zeichen des Unheils gesehen wurde.

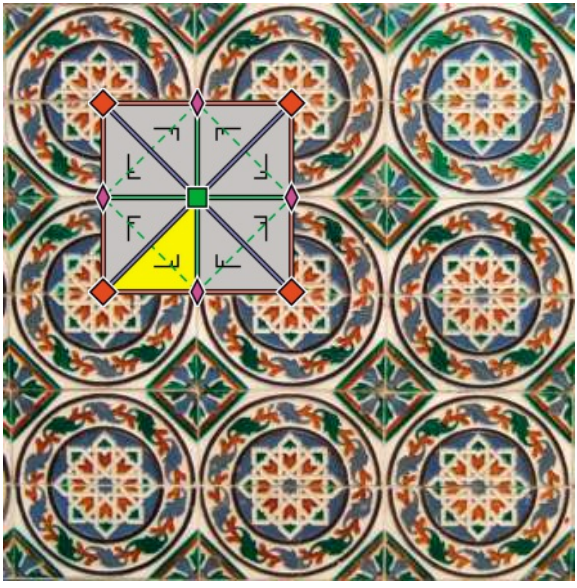


Abb. 28: Zum besseren Verständnis der Raumgruppen wird hier ein Beispiel der 17 ebene Gruppen (Fedorov, 1891b) gezeigt. Das Kachelmuster besitzt die Symmetrie der Gruppe p4m. Im Einschub sind die Lagen der unterschiedlichen Symmetrieelemente eingezeichnet. Vierzählige Drehachsen: Quadrate; zweizählige Drehachsen: Rauten; doppelte Linien: Spiegellinien; gestrichelte Linien: Gleitspiegellinien. Die kleineste Einheit, die innerhalb des Musters durch Symmetrieoperationen repetiert wird, ist gelb hervorgehoben.

Zur fast gleichen Zeit befassten sich weitere Wissenschaftler ebenfalls mit den Raumgruppen: **Leonhard Sohncke** (1842–1897) interessierte sich als Professor für Experimentalphysik am Polytechnikum zu Karlsruhe für Theorien der Kristallstruktur und erweiterte die von Bravais eingeführten 14 Punktgitter zu 65 Raumgruppen, die aber nur Symmetrieoperationen der ersten Art (Drehung und Schraubung) enthielten. Dies ist deshalb von Bedeutung, da chirale enantiomerenreine chemische Substanzen nur in den Sohncke-Raumgruppen kristallisieren. Chirale (händige) Moleküle lassen sich z.B. durch Spiegelung nicht in sich abbilden, sondern verhalten sich wie die linke und rechte Hand. Solche Molekülpaare bezeichnet man als Enantiomere.

Abb. 29: Arthur Moritz Schoenflies.

Arthur Moritz Schoenflies (1853–1928), ein deutscher Mathematiker, wurde vor allem als theoretischer Kristallograph bekannt, der mit einem von Fedorov unabhängigen Ansatz ebenfalls die 230 Raumgruppen ableitete. Nach Schoenflies wurde das kubische Mineral Schoenfliesit $MgSn(OH)_6$ benannt. Seit 1889 bestand ein lebhafter Briefwechsel zwischen Fedorov und Schoenflies, in dem sie sich gegenseitig auf Fehler aufmerksam machten und Argumente austauschten, so dass letztendlich beide Wissenschaftler zum selben Endergebnis der 230 Raumgruppen gelangten, die im Gegensatz zu Sohncke auch Symmetrieoperation der zweiten Art (Inversion und Spiegelung) enthielten. In seinem Buch vermerkte Schoenflies (1891): «*Die Notwendigkeit die Sohncke'sche Theorie so auszubilden, wie es durch die reine Strukturtheorie im engeren Sinn geschieht, wurde wohl zuerst von E. Fedorov betont.*» Die Ansätze von Schoenflies und Fedorov sind grundsätzlich unterschiedlich. Während für Schoenflies das Problem vor allem ein interessantes Beispiel der Gruppentheorie, insbesondere für unendliche Gruppen, darstellt, sind für Fedorov die Raumgruppen Hilfsmittel zur Beschreibung von tatsächlichen Kristallstrukturen (Shafranovskii & Belov, 1962). Im gleichen Jahr wie seine Ableitung der 230 Raumgruppen publizierte Fedorov (1891b) auch den Beweis, dass nur 17 unendliche ebene Symmetriegruppen existieren.

Neben Fedorov und Schoenflies muss mit dem Engländer **William Barlow** (1845–1934) ein dritter Wissenschaftler erwähnt werden, der ebenfalls unabhängig 230 Raumgruppen ableitete (Pope, 1935). Wegen seines ererbten Reichtums konnte es sich Barlow leisten, sich ausschliesslich mit seiner Leidenschaft der Kristallographie zu beschäftigen. Seine Publikationen zu diesem Thema erfolgten allerdings deutlich später als die Artikel von Fedorov und Schoenflies (Barlow, 1894, 1896). Trotzdem wurde Barlows Arbeit insbesondere im angelsächsischen Bereich häufig zitiert und auch ein Mineral, Barlowit $Cu_4BrF(OH)_6$, wurde nach ihm benannt.

Die Entdeckung der X-Strahlen

Das nächste Puzzleteil, das bei seiner zufälligen Entdeckung gar nichts mit Kristallen zu tun hatte, waren kurzwellige elektromagnetische Strahlen, die im deutschsprachigen Raum nach ihrem Entdecker Röntgenstrahlen und von Röntgen selbst sowie im internationalen Sprachgebrauch, wegen ihrer anfänglich unbekannten Natur, X-Strahlen genannt wurden.

Wilhelm Conrad Röntgen (geb. 1845 in Lennep, heute ein Stadtbezirk von Remscheid (nahe Düsseldorf), gest. 1923 in München) war ein deutscher Physiker, der 1895 die Röntgenstrahlen entdeckte und dafür 1901 als erster einen Nobelpreis für Physik erhielt. Ihm zu Ehren trägt auch das Karbonatmineral Röntgenit-(Ce) $Ca_2(Ce,La)_3(CO_3)_5F_3$ seinen Namen. Sein Vater war Tuchfabrikant und zog 1848 mit der Familie aus wirtschaftlichen Gründen in die benachbarten Niederlande. Wilhelm Conrad, der einzige Sohn, besuchte die Schule in Utrecht. Angeblich soll er dort kurz vor dem Abitur eine Karikatur seines Klassenlehrers gezeichnet haben, was disziplinarisch mit einem Schulverweis bestraft wurde. Er hatte also keinen Schulabschluss. Als Gasthörer an der Universität Utrecht erfuhr er von seinen Kommilitonen, dass man an der ETH-Zürich Maschinenbau ohne Abitur, aber nach bestandener Aufnahmeprüfung studieren konnte. Dort erhielt er 1868 ein Diplom als Maschinenbauingenieur, was ihn berechtigte, ein Doktoratsstudium in Physik an der Universität Zürich zu beginnen, das er 1869 mit der Promotion «Studien über Gase» abschloss. Er folgte dann seinem Doktorvater an die Universität Würzburg, wo ihm eine Habilitation wegen des fehlenden Abiturs verweigert wurde. Ein geschichtlicher Zufall kam ihm zu Hilfe. Nach dem Deutsch-Französischen Krieg (1870–1871) fiel Elsass-Lothringen an Deutschland. Strassburg und die dortige Universität waren jetzt deutsch aber noch mit französischen Zulassungsrichtlinien, ohne Notwendigkeit eines Abiturs als Schulabschluss. 1874 habilitierte Röntgen in Strassburg. Es folgte eine Lehrtätigkeit in Hohenheim, Strassburg und Giessen, bis er 1888 zum Ordinarius für Experimentalphysik in Würzburg berufen und dort 1893/94 zum Rektor der Universität gewählt wurde, also an der gleichen Universität, die ihm 20 Jahre zuvor die Habilitation versagt hatte.

Abb. 30a: Links – Wilhelm Conrad Röntgen, 1900. *Abb. 30b:* Rechts – Zeitgenössische Röntgenaufnahme einer Hand mit Ring.

Nachdem Röntgen in seiner Dissertation bereits über Gase gearbeitet hatte, umfasste sein aktuelles Forschungsinteresse in Würzburg Experimente zu elektrischen Gasentladungen. Ziel war, in einer fast luftleeren Glasröhre elektrische Entladungen bei hoher Spannung zu untersuchen. Um freigesetzte Strahlen zu erkennen, war der Raum abgedunkelt und die Glasröhre mit Leuchtschirmen umgeben. Beim Justieren geriet seine Hand zwischen Röhre und Leuchtschirm, und er sah die Knochen seiner Hand. Der experimentelle Versuchsaufbau wurde optimiert, und Röntgen verbesserte seine Aufnahmetechnik z. B. mit Testaufnahmen der Hände seiner Frau und Kollegen. Seine Beobachtungen publizierte Röntgen (1895,1896)

in den Sitzungsberichten der Würzburger Physikalisch-Medicinischen Gesellschaft. Die Berichte wurden mit grosser Begeisterung aufgenommen, weil man sofort die praktische Bedeutung für Medizin und Technik erkannte. Kant (2003) schreibt in einer Biographie über Wilhelm Conrad Röntgen:

«Sein langsamer, pedantischer Arbeitsstil erwies sich für die weitere Erforschung der Röntgenstrahlung als nicht sehr förderlich, und so verlor Röntgen trotz seiner Pionierrolle schnell den Anschluss an die internationale Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet. Nach seiner dritten Publikation hierzu (Röntgen, 1897) erlosch sein Interesse an dieser Thematik und er wandte sich erneut der Kristallphysik zu. Er hielt über seine Entdeckung nur einen öffentlichen Vortrag, und zwar am 23.1.1896 vor der Physikalisch-Medicinischen Gesellschaft zu Würzburg, … Röntgen hielt nicht einmal anlässlich der Nobelpreisverleihung den erwünschten Vortrag.»

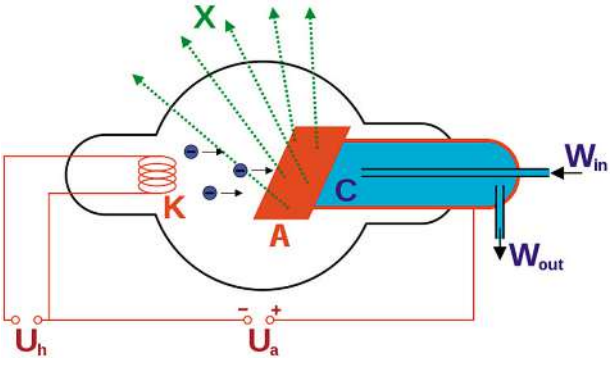


Abb. 31: Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre: K: Kathode (Glühwendel) wird mit einer Spannung U_h auf ca. 2000°C geheizt, so dass Elektronen freigesetzt werden. Die Elektronen werden in einem elektrischen Feld (U_a : 25–600 kV) in der evakuierten Röhre auf die Anode (A) beschleunigt; dabei entsteht Röntgenstrahlung (X). Eine Wasserkühlung (C) verhindert das Überheizen der Röhre.

München um die Jahrhundertwende, der Angelpunkt der physikalischen Forschung

Die herausragenden wissenschaftlichen Exponenten im Jahr 1912 an der Universität München in den Disziplinen, die hier von Belang sind, waren Paul Heinrich Groth in der Mineralogie und Kristallographie, W.C. Röntgen in der Experimentalphysik und Arnold Sommerfeld in der theoretischen Physik.

Röntgen, der 1900 einen Ruf nach München erhalten hatte, besass von den drei Ordinarien das grösste Institut, das insbesondere von Medizinstudenten frequentiert wurde. Ausserdem gehörten 12–15 Doktoranden zu seinem Lehrstuhl. Als Betreuer von Dissertationen, für die 3–4 Jahre eingeplant werden mussten, war Röntgen äusserst pedantisch und immer bedacht, Ungenauigkeiten, Fehler oder Fehlinterpretationen zu vermeiden. Von seinen Doktoranden erwartete er, dass

sie völlig selbständig arbeiteten. Auch informeller Wissensaustausch von Tür zu Tür innerhalb des Instituts war unerwünscht (Ewald, 1962). Röntgen besuchte auch nie das Physikkolloquium und wenn immer möglich vermied er persönliche Kontakte.

Sommerfelds Gruppe und Institut war viel kleiner und befand sich seit 1910 im gleichen Gebäude wie Röntgens Experimentalphysik. Als absolute Neuheit innerhalb der theoretischen Physik besass Sommerfeld ein Experimentallabor und eine Werkstatt. Er interessierte sich vor allem für Strömungsmechanik (Wissenschaft vom physikalischen Verhalten von Fluiden) und beschäftigte zwei Assistenten, Peter Debye (1936 Nobelpreis für Chemie: «Strukturforschung») und Walter Friedrich, ein ehemaliger Doktorand von Röntgen. Im Gegensatz zu Röntgens Institut war das akademische Leben in der theoretischen Physik durch Seminare, Pausendiskussionen und sogar Wissensaustausch in der Freizeit geprägt. Wir würden heute von einem modernen Lehr- und Forschungsinstitut mit hoher sozialer Kompetenz sprechen. 1909 stiess auch **Max von Laue** (geb. 1879 in Koblenz, gest. 1960 in Berlin), ein Schüler Plancks in Berlin, zu Sommerfelds Gruppe. Sommerfeld war Herausgeber des Physikbands «Enzyklopaedie der mathematischen Wissenschaften» und Laue wurde ab 1911 mit dem Verfassen des Artikels zum Thema Wellen-Optik beauftragt.

Geheimrat Groths Institut für Mineralogie und Kristallographie befand sich in einem ehemaligen Augustinerkonvent in der Innenstadt. Groth war zu diesem Zeitpunkt bereits in seinen 70er Jahren und wird als weltoffen und äusserst umgänglich beschrieben. Seine grössten Leistungen bestanden in der Entwicklung einer eigenen Mineralnomenklatur und in seinem fünfbändigen, umfassenden Werk «Chemische Kristallographie» (1906–1919). 1877–1920 war er auch Herausgeber der Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie.

Entdeckung der Röntgenbeugung am Kristall

Der Physiker **Peter Paul Ewald** (geb. 1888 in Berlin, gest. 1985 in Ithaca, New York) wählte sich 1912 bei Sommerfeld das Dissertationsthema mit dem für seine Forschungsrichtung ausgefallenen Titel: «*Dispersion und Doppelbrechung von Elektronengittern (Kristallen).*» Die Arbeit beschäftigte sich mit dem Zusammenhang zwischen der anisotropen Anordnung von atomaren Elektronensystemen innerhalb eines Kristalls und den resultierenden optischen Eigenschaften. Sommerfeld entschuldigte sich von Beginn an, dass er eigentlich keine Idee hätte, wie das Problem angegangen werden könnte. Bei der mathematischen Bearbeitung des Themas gelangte Ewald zu Schlussfolgerungen, die diametral zur vorherrschenden wissenschaftlichen Meinung standen. Zur Absicherung wünschte er sich eine Diskussion mit Laue über seine ungewöhnlichen Interpretationen. Das Gespräch verlief relativ einseitig, und Ewald musste folgern, dass Laue scheinbar keine Kenntnis von der Gittertheorie der Kristalle hatte (Ewald, 1962).

Beugung und Interferenz von Wellen

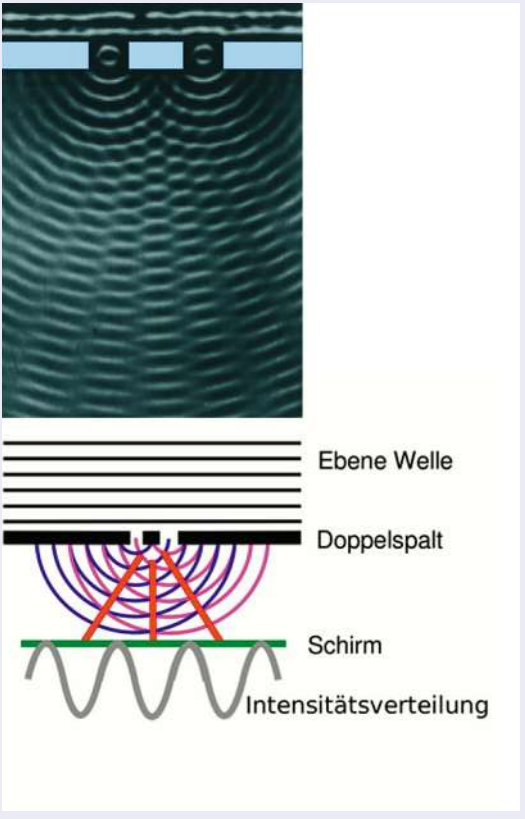


Abb. 32: Beugung von Wellen an einem Doppelspalt. Die Intensitätsverteilung auf dem Beobachtungsschirm entsteht durch Inferenz der Wellen, die vom Abstand der Spalten und der Wellenlänge abhängt (Grafik von W. Salzmann, Wissenstexte.de).

Die Beugung von elektromagnetischen Wellen (z.B. Licht, Röntgenstrahlen) lässt sich am einfachsten an Hand von Wasserwellen veranschaulichen *(Abb. 32)*. Trifft eine ebene Welle auf ein Hindernis, in dem in regelmässigen Abständen Durchlässe (Spalten) vorhanden sind, so entsteht an jedem Spalt eine halbkreisförmige Welle. Dies bezeichnet man auch nach seinem Entdecker als **huygenssches Prinzip.** Die so entstandenen Wellen interferieren miteinander. Das bedeutet, dass bei einer Überlagerung von Wellenbergen die Amplitude der Welle vergrössert wird. Entsprechendes gilt auch bei der Überlagerung von Wellentälern. Trifft aber ein Wellenberg auf ein Wellental, dann wird die Welle ausgelöscht. In einem optischen Experiment mit sichtbarem Licht verwendet man z.B. ein Gitter (Netz) mit Maschen, deren Grössenabmessungen in etwa der Wellenlänge des Lichtes entsprechen. An jedem Durchlass entsteht eine Kugelwelle, die ebenfalls miteinander interferieren und auf einem Beobachtungschirm ein Beugungsdiagramm produzieren. Das unten gezeigte Schema mit einem Doppelspalt *(Abb. 32)* zeigt auch, dass die Abstände der Maxima (Intensitätsverteilung) auf dem Schirm abhängig vom Abstand der Spalten sind. Röntgenstrahlen besitzen eine Wellenlänge, die mit den Netzebenabständen oder interatomaren Abständen eines Kristalls vergleichbar ist. Der Kristall hat bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen die Funktion eines dreidimensionalen Gitters und liefert ebenfalls ein Beugungsdiagramm.

Andererseits schien Laue äusserst interessiert am Abstand zwischen Atomen im Kristall. Ewald konnte zu diesem Zeitpunkt nur abschätzen, dass die Distanz im Bereich von 1/500–1/1000 der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes läge. Daraufhin soll Laue den weiteren Ausführungen nur unkonzentriert gefolgt sein, bis Laue die für ihn scheinbar entscheidende Frage stellte:

«Was würde passieren, wenn Sie annehmen, dass die Wellenlänge im Kristall deutlich kürzer wäre?»

Ewald erwiderte, dass seine Gleichungen unabhängig von der Wellenlänge gültig seien. Eine befriedigende Antwort auf seine Bedenken erhielt er nicht von Laue. Der Vollständigkeit halber sei mitgeteilt, dass Ewald die Doktorprüfung am 5. 3. 1912 bestand und später die dynamische Theorie der Röntgeninterferenzen begründete. Ewald wird ebenfalls durch einen Mineralnamen (Ewaldit, $Ba(Na,Ca,Y,Ce,K)(CO_3)_2$) geehrt.

Während der Osterferien trafen sich regelmässig einige Physiker, so auch 1912, zu gemeinsamen Skiferien in den Alpen. Bei dieser Gelegenheit diskutierte Laue mit Sommerfeld und anderen seine Idee, dass eine Wellenlänge in der gleichen Grössenordnung wie die interatomaren Abstände zu einem Beugungsbild führen müsste. Es war bekannt, dass sichtbares Licht an einem zweidimensionalen Gitter zu einem Punktediagramm gebeugt wird. Die Idee der Beugung an einem Kristallgitter wurde von den Gesprächspartnern vehement verworfen. Auf der Grundlage des damaligen Kenntnisstands konnte man annehmen, dass die thermische Auslenkung der Atome in einem Kristallgitter in der gleichen Grössenordnung sei wie die Wellenlänge von Röntgens X-Strahlen. Das Kristallgitter wäre dann lokal so stark deformiert, dass die für die Beugung notwendige Periodizität nicht zu Stande käme. Aus solchen Gründen muss sich auch Sommerfeld geweigert haben, Friedrich, seinen neuen Assistenten, Laue für erste Beugungsversuche an Kristallen zur Verfügung zu stellen (Ewald, 1962).

Zurück in München wurde die Diskussion in der Mittagspause unter Kollegen und Doktoranden fortgesetzt, wo die einhellige Meinung überwog, dass ein Experiment besser sei als alle graue Theorie. Paul Knipping, der gerade bei Röntgen promoviert hatte, erklärte sich bereit, Friedrich zu unterstützen, um «heimliche» Zusatzexperimente im bereits gut ausgestatteten Röntgenlabor von Sommerfeld durchzuführen. Sie konstruierten einen Bleikasten in dessen Mitte ein Kupfersulfatkristall fixiert war, auf allen Seiten umgeben von photographischen Platten, und auf der Vorderseite befand sich ein Loch für den Einlass der Röntgenstrahlung. Nach verschiedenen erfolglosen Versuchen bemerkten die beiden Experimentatoren auf der Fotoplatte hinter dem Kristall äusserst diffuse Flecken um einen durch den Primärstrahl verursachten Zentralfleck. Während der Mittagspause erfuhr auch Laue vom erfolgreichen Experiment. Noch am gleichen Tag soll er seine Theorie der Beugung an einem dreidimensionalen Kristallgitter formuliert haben (Ewald, 1962).

Röntgen war einer der ersten, der den Versuchsaufbau und das Resultat besichtigte. Er schien beeindruckt, äusserte sich aber nicht zum Thema Beugung.

Als echte Experimentatoren verbesserten Friedrich und Knipping die Kamera, machten Beugungstests mit und ohne Kristall, mit Pulver statt Einkristall und mit Spaltplättchen aus Bleiglanz, Zinkblende und Steinsalz. Die Kameradistanz wurde verändert und die Proben in unterschiedlichen Orientierungen belichtet. Wie zu dieser Zeit üblich berichtete Sommerfeld am 8.6. und 6.7.1912 vor der Bayerischen Akademie der Wissenschaften von den erfolgreichen Beugungsexperimenten. In den Sitzungsberichten erschienen zwei Publikation: (1) Friedrich, W., Knipping, P. und Laue, M.: «Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen» und (2) Laue, M.: «Eine quantitative Prüfung der Theorie für die Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen.» Laue hielt im Juni 1912 Vorträge über die Röntgenbeugung in Berlin und Würzburg und wurde enthusiastisch gefeiert, während seine Interpretationen in München noch immer mit einer gewissen Skepsis aufgenommen wurden.

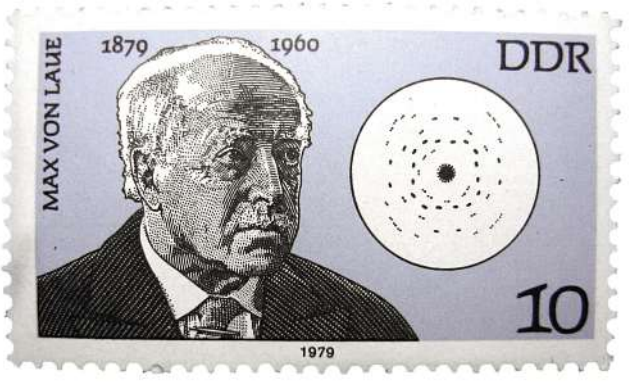


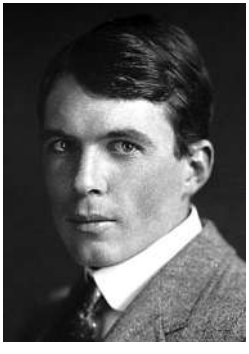
Abb. 33: Erinnerungsbriefmarke zum 100. Geburtstag von Max von Laue; neben seinem Portrait ist ein Röntgen-Beugungsmuster (Laue-diagramm) eines Kristalls dargestellt.

In Laues Auslegung der Beugungsexperimente weist Ewald (1962) auf eine wesentliche Fehlinterpretation hin. Laue beobachte in seinen Beugungsdiagrammen fünf unterschiedliche Wellenlängen, was er nicht richtig einordnen konnte. Diese unterschiedlichen Wellenlängen sind ein Ergebnis der Beugung polychromatischer Röntgenstrahlung an einem Gitter und nicht wie Laue fälschlicherweise annahm, das Ergebnis von Fluoreszenz, also charakteristischer Strahlung, die von den Metallen im untersuchten Kristall ausgesandt wird. Dieser Hinweis erscheint wichtig, da noch im gleichen Jahr Sohn und Vater Bragg (siehe unten) die korrekte Interpretation für die Beugungsexperimente lieferten. Max von Laue erhielt für die Entdeckung der Röntgenbeugung 1914 den Nobelpreis für Physik, wobei er öffentlich auf die Verdienste Friedrichs und Knippings hinwies und ankündigte, die Geldzuwendung mit den Beiden zu teilen. Das Mineral Laueit $Mn^{2+}Fe^{3+}{}_2(PO_4)_2(OH)_2 \times 8H_2O$ würdigt seine Leistungen auf dem Gebiet der Röntgenbeugung.

Physik Nobelpreisträger im Kraftfeld der Politik

Max von Laue und James Franck (mit Gustav Hertz Nobelpreis für Physik 1925) standen in Opposition zum Nationalsozialismus und hatten ihre Nobelpreis-Medaillen Niels Bohr (Nobelpreis für Physik 1922) in Kopenhagen anvertraut, um so eine Konfiszierung in Deutschland zu verhindern. Die Hitlerregierung verbot allen Deutschen das Annehmen des Nobelpreises oder den Besitz einer Nobelpreis-Medaille, nachdem 1935 der Nazigegner, Journalist und wegen Spionage verurteilte Carl von Ossietzky den Friedensnobelpreis erhalten hatte. Als 1940 deutsche Truppen Kopenhagen besetzten, wurden die beiden Nobelpreis-Medaillen mit den eingravierten Namen der Träger von einem Mitarbeiter Bohrs in Königswasser aufgelöst, um einer Enteignung durch die Nazis zu vorzukommen. Franck und Bohr, beide jüdischer Abstammung, entzogen sich dem Zugriff der Nazis. Franck emigrierte 1933 in die USA und Bohr, aktiv im Widerstand gegen die deutsche Besatzung in Dänemark, floh nach Schweden. Laue, der sich öffentlich für den von der «deutschen Physik» geächteten Albert Einstein eintrat, wurde 1943 vorzeitig emeritiert. Auch Ewald (siehe oben) emigrierte 1938 in die USA. Nach einem Brief von 1950, adressiert an die Königliche Schwedische Akademie der Wissenschaften, wurden die Goldlösungen nach Stockholm zurückgeschickt, wo für die Besitzer neue Medaillen geprägt wurden.

Die Umsetzung der Ideen von Röntgen, Fedorov, Schoenflies und Laue: Der Beginn einer «neuen» Kristallographie



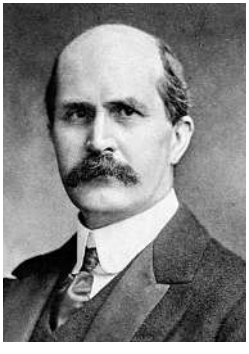
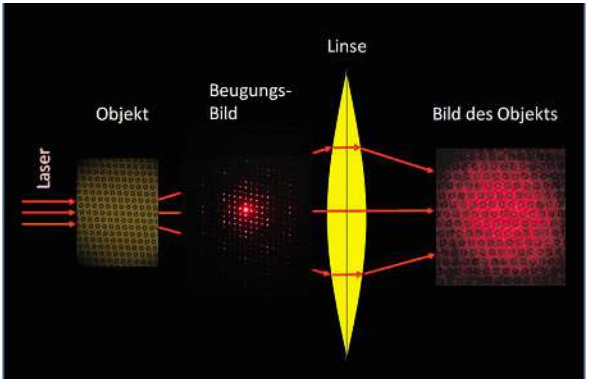


Abb. 34a: William Lawrence Bragg und *Abb. 34b:* William Henry Bragg, 1915.

Schon im Juli 1912 erreichte die Meldung der erfolgreichen Beugung von Röntgenstrahlen am Kristall Vater und Sohn Bragg, die gerade gemeinsame Ferien an der Küste der nordenglischen Grafschaft Yorkshire verbrachten. Vater **William Henry Bragg** (1862–1942), ein ursprünglich aus Australien stammender Physikprofessor an der Universität Leeds, war zu diesem Zeitpunkt 50 Jahre alt. Sein Sohn **William Lawrence Bragg** (1890–1971), ein Physikstudent am Trinity College in Cambridge, war 22 Jahre alt. Laues Ergebnisse versetzten sie in Erstaunen, aber der junge Bragg erinnerte sich an die noch nicht weit zurückliegende Optikvorlesung und folgerte, dass in Analogie zu zweidimensionalen optischen Experimenten durch periodische Stapelung von Gitterebenen in einem Kristall entsprechende Beugungspunkte durch Röntgenstrahlen

ebenfalls erzeugt werden können. Diese Erkenntnis war die Grundlage zur Lösung der Kristallstruktur auf der Basis von Beugungsreflexen. Die einfache und doch revolutionäre Ableitung lässt sich am einfachsten mit Hilfe von zwei Experimenten erklären *(Abb. 35)*. Durchstrahlt ein monochromatischer, paralleler Lichtstrahl (z. B. Laserstrahl) ein periodisches Muster (z.B. ein Netz oder ein Gitter), und der Identitätsabstand im Muster ist in der gleichen Grössenordnung wie die Wellenlänge des Lichtes, dann entsteht ein Beugungsdiagramm aus Punkten. Dieses Beugungsbild, das die Symmetrie des Objektes widerspiegelt, lässt sich durch eine optische Linse wieder zurück in das ursprüngliche Muster transformieren. Ersetzt man jetzt den Lichtstrahl durch einen Röntgenstrahl und das zweidimensionale Muster durch einen dreidimensionalen Kristall, dann entsteht ein entsprechendes Beugungsbild von Röntgenstrahlen, weil die Grössenordnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlen den Netzebenenabständen innerhalb eines Kristalls entspricht. Da aber alle Materialen für Röntgenstrahlen einen Brechungsindex von ungefähr 1 besitzen (keine Brechung), können keine konventionellen Linsen zur Abbildung konstruiert werden. Die Rücktransformation des Beugungsbildes erfolgt jetzt mathematisch über die Fourier-Transformation (heute mit Hilfe eines Computers). Voraussetzung ist die Kenntnis von Ort und Intensität der gebeugten Reflexe. Diese Rücktransformation führt zu einer Liste von Koordinaten der Atome, die als «Muster» einen Kristall periodisch aufbauen. Somit kann eine Kristallstruktur mit interatomaren Abständen in der Grössenordnung von 1 Å = 10^{-8} cm veranschaulicht und interpretiert werden.



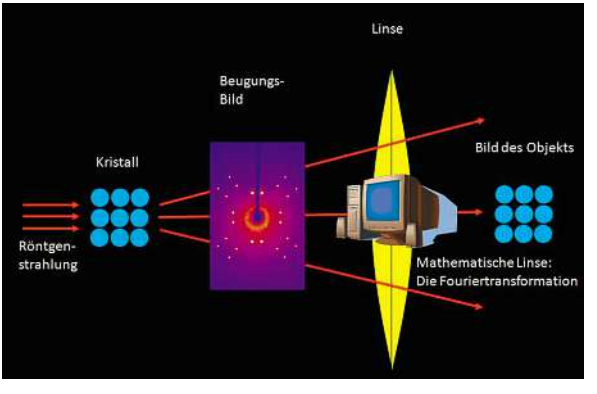


Abb. 35a: Oben – Schematische Darstellung eines Beugungsexperiments mit sichtbarem Licht an einem zweidimensionalen Gitter (Objekt). *Abb. 35b:* Unten – mit Röntgenstrahlen an einem Kristall. Da Röntgenstrahlen für Materialen einen Brechungsindex von etwa 1 besitzen, können keine einfachen Linsen konstruiert werden. Die Rücktransformation des Beugungsbildes zum Abbild erfolgt daher mathematisch.

… und heute? Die allgemeine Methodik der Strukturlösung ist geblieben nur die Technik hat sich geändert

1934 beschrieb der amerikanische Kristallograph **Arthur Lindo Patterson** (1902–1966) eine nach ihm benannte Berechnungsweise. Während die ersten Kristallstrukturen mit viel Erfahrung durch Ausprobieren bestimmt wurden, war es durch die Patterson-Methode erstmals möglich, Strukturen systematisch zu lösen.
Den Nobelpreis für Chemie 1985 erhielten gemeinsam **Herbert A. Hauptman** (1917–2011) und **Jerome Karle** (1918–2013) für die Entwicklung einer mathematischen Technik (Direct Methods) zur ab-initio Strukturbestimmung von Kristallen. Das Buch zu diesem Thema «Solution of the phase problem» hatten sie bereits 1953 verfasst. Aber die Zeit war noch zu früh, ihre Ideen in einem routinemässig anwendbaren Computerprogramm umzusetzen, mit dem «automatisch» eine Kristallstruktur gelöst werden konnte.
Der deutsche Bauingenieur, Erfinder und Unternehmer Konrad Zuse baute 1941 den ersten funktionstüchtigen elektromechanischen Computer (Z3 = Zuse3), dessen freiprogrammierbare Nachfolgeversion Z4 von 1950 bis 1955 an der ETH Zürich genutzt wurde. Die erste frei programmierbare Computersprache Fortran (formula transition) war seit 1957 von IBM verfügbar. Heute können solche Berechnungen routinemässig auf einem PC ausgeführt werden. In den letzten zehn Jahren wurde ein breites Spektrum moderner Strukturlösungsmethoden entwickelt, die auch äusserst erfolgreich auf Pulver-Röntgendaten angewandt werden können (z.B. Oszlányi & Süt, 2004; Erny & Favre-Nicolin, 2007).

Wenn der Sohne mit dem Vater…

Es war der 22-jährige Sohn Lawrence Bragg, der das Braggsche Gesetz der Röntgenbeugung aufstellte und somit die korrekte Interpretation für die von Laue, Friedrich und Knipping durchgeführten Experimente beisteuerte. Dieses Gesetz besagt, dass die Röntgenstrahlen an den Netzebenen eines Kristalls reflektiert werden. Netzebenen verlaufen parallel zu Kristallflächen. Es besteht somit bei bekannter Wellenlänge ein einfacher Zusammenhang zwischen dem Netzebenenabstand und dem Reflexionswinkel *(Abb. 36)*. Lawrence informierte seinen Vater über seinen «Geistesblitz» und beide diskutierten die möglichen Anwendungen. Sie arbeiteten forthin als Team im Bereich der Röntgenbeugung, wobei sich der Vater vor allem durch Entwicklung und Konstruktion eines Röntgen-Spektrometers (siehe unten) auszeichnete, das dann zur Umsetzung der Ideen des Sohnes verwendet werden konnte. Der Sohn Lawrence Bragg spezialisierte sich künftig auf «Strukturlösung» von Kristallen. 1915 erhielten Sohn und Vater Bragg gemeinsam den Nobelpreis für Physik «für ihre Verdienste um die Erforschung der Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlen».

Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen

Während die Ableitung der Beugungsbedingungen für Röntgenstrahlen an einem Kristallgitter von Max von Laue relativ anspruchsvoll war, gelang Lawrence Bragg eine einfache Interpretation. Er nahm an, dass sich das Gitter durch Ebenen (Gitter- oder Netzebenen) beschreiben lässt, die durch Gitterpunkte aufgespannt werden. Entsprechend den Kristallflächen lassen sich die Netzebenen mit drei ganzen Zahlen (Millerschen Indizes) beschreiben. Beugung an parallelen Netzebenen, die zueinander einen Abstand d (Netzebenenabstand) besitzen, ist nur möglich, wenn bei einem Reflexionswinkel θ der Weglängenunterschied FGH *(Abb. 36)* einem ganzen Vielfachen der Wellenlänge λ der Röntgenstrahlen entspricht. Nur dann zeigen die reflektierten Wellen auf der oberen und unteren Netzebene positive Interferenz. Das bedeutet, dass sich jeweils die Wellenberge und Wellentäler der oberen und unteren Welle überlagern; man sagt, die Wellen schwingen in Phase. Sind aber bei einem Reflexionswinkel θ die obere und untere reflektierte Welle (*Abb. 36* rechts) in Gegenphase, Berge der oberen Welle überlagern sich mit Tälern der unteren Welle und umgekehrt, dann findet in der Summe keine Reflexion statt und die Welle wird ausgelöscht.

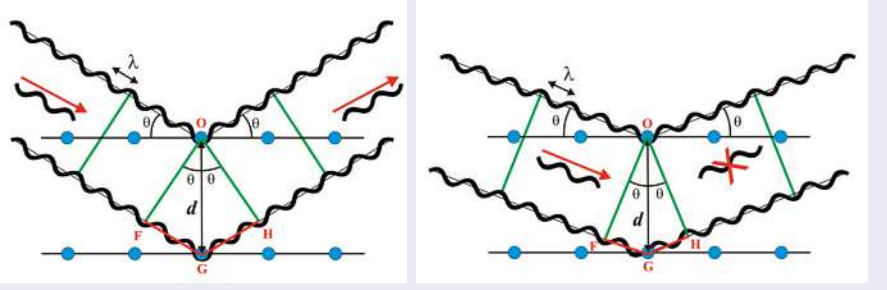


Abb. 36: Das Braggsche Reflexionsprinzip fordert, dass reflektierte Strahlen an parallelen Gitterebenen in Phase sind: Wellenberge und Wellentäler der oberen und unteren Welle müssen sich jeweils überlagern (links). Sind die reflektierten Strahlen in Gegenphase (rechts) dann ist keine Reflexion möglich (Grafik: Dept. Crystallography & Struc. Biol. Madrid, Spanien).

Das Braggsche Reflexionsprinzip von Wellen an Ebenen ist nicht nur auf Kristallgitter und Röntgenstrahlen beschränkt. Auch sichtbare Lichtwellen werden selektiv (in Abhängigkeit der Wellenlänge (Farbe)) an parallelen Schichten reflektiert. Das Farbenspiel von Schmetterlingsflügeln oder der Schiller des Gefieders mancher Vögel resultiert aus der Lichtreflexion an Flügelschuppen bzw. Federn. Auch der Edelstein Opal verdankt seine Farbvariation, je nach Reflexionswinkel, der Beugung an submikroskopischen Schichten von kleinen Opalkugeln.

Eine der ersten Strukturen, die von Sohn und Vater Bragg gelöst wurden, war die des Kochsalzes oder Halits NaCl. Wer vermutet, dass sie für diese Leistung nur Applaus ernteten, täuscht sich. Zahlreiche Chemiker waren bis dahin von der Existenz von NaCl Molekülen überzeugt, die auch die Struktur eines Halitkristalls prägen sollten. Stattdessen fand Bragg (1913) keine NaCl Moleküle, sondern eine schachbrettähnliche alternierende Anordnung von Na^+- und Cl^--Ionen, so dass jedes Na Kation gleichmässig (oktaedrisch) von sechs Cl Ionen umgeben ist und umgekehrt jedes Cl Anion von sechs Na Ionen. Der englische Chemiker H. E. Armstrong wettert z. B. noch 1927 in einem Brief an die Zeitschrift «Nature» (sinngemäss übersetzt):

«Diese Aussage widerspricht jeglichem gesunden Menschenverstand. Sie ist eine abstruse Absurdität und steht im Gegensatz zu den chemischen Prinzipien. Was auch immer Röntgenphysik sein mag, Chemie ist weder Schach noch Geometrie. Es darf nicht länger gestattet werden, dass solch ungerechtfertigte Verleumdungen über den molekularen Charakter, unserer wichtigsten chemischen Grundregel, verbreitet werden. Es ist an der Zeit, dass Chemiker wieder einmal Verantwortung für die Chemie übernehmen und Studienbeginner vor der Anbetung falscher Götter schützen. Zumindest sollte man den Anfängern beibringen, sich nicht mit einem Schachbrett-Beweis abspeisen zu lassen.»

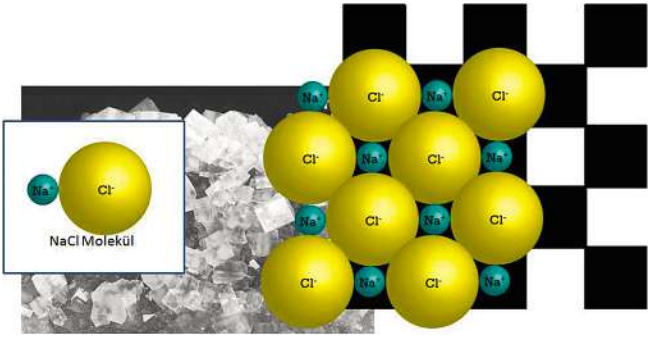


Abb. 37: Links – Isoliertes NaCl Molekül; rechts – Im Gegensatz dazu eine schachbrettähnliche Anordnung von Na^+- und Cl^--Ionen in der Kristallstruktur, in der keine isolierten NaCl Moleküle unterschieden werden können.

Zu Beginn der röntgenographischen Strukturforschung standen Mineralien im Vordergrund. Das hatte vor allem zwei Gründe: (1) Die Experimentatoren konnten die gewünschten Kristalle in der notwendigen Grösse und Qualität von einem Museum oder Händler beziehen und (2) die Ästhetik und Systematik der Mineralstrukturen faszinierte die Wissenschaftler. Daher sind die Braggs sowohl die Begründer einer modernen Kristallographie als auch Mineralogie. Das Mineral Braggit (Pt, Pd, Ni)S wurde erstmalig durch sein Röntgendiagramm als neue Mineralart erkannt (Bannister, 1937) und ehrt Sohn und Vater gleichzeitig.

Mit zunehmender Erfahrung der Forscher und Verbesserung der Messapparaturen wurden auch die untersuchten Strukturen zunehmend komplexer. Es ist insbesondere dem Schweizer Mineralogen und Kristallographen Paul Niggli (1888–

1953) zu verdanken, dass er in seinem 1919 erschienen Buch «Geometrische Kristallographie des Diskontinuums» die Bedeutung der 230 Raumgruppen für die Strukturlösung aufzeigte. Bereits seit 1914 gab es auch einen Schriftwechsel mit Austausch von Publikationen zwischen Fedorov und Lawrence Bragg (Shafranovskii & Belov, 1962). Der Amerikaner Ralph W.G. Wyckoff (1897–1994) definierte die unterschiedlichen Punktlagen (Wyckoff-Positionen innerhalb einer Raumgruppe), wobei ein Punkt, der nicht auf einem Symmetrieelement liegt, als allgemeine Lage bezeichnet wird, während ein Punkt auf einem Symmetrie-Element als spezielle Lage definiert wird (Wyckoff, 1922). Die Anzahl aller zueinander symmetrisch äquivalenten Punkte nennt man Multiplizität oder Zähligkeit der Punktlage. Je höher die Symmetrie einer Punktlage ist, umso geringer ist die Multiplizität. Eine graphische Darstellung der Punktlagen in allen 230 Raumgruppen erfolgte durch Astbury & Yardley (1924), beides Mitarbeiter von William Bragg am University College London. Entsprechende Tabellen und Abbildungen sind heute in den «International Tables for Crystallography Volume A: Space-group Symmetry» zusammengefasst.

Anstelle der polychromatischen Röntgenstrahlung, die man für die Laue-Technik verwendet, erkannten Vater und Sohn Bragg, dass es vorteilhaft für die Strukturlösung ist, wenn man mit monochromatischer Strahlung arbeitet. Ihr Gerät, das sie als Röntgen-Spektrometer bezeichneten, produzierte daher Röntgenstrahlung einer definierten Wellenlänge, die durch Schlitze auf einen Kristall im Zentrum eines ablesbaren Drehkreises fokussiert wird. Der Kristall wird so orientiert, dass eine Fläche {hkl} senkrecht steht und somit parallel zur Achse des Instruments ausgerichtet ist. Die Intensität eines reflektierten Strahls wird mit Hilfe eines Detektors gemessen, der an einem ebenfalls ablesbaren Drehkreis befestigt ist. Mit unterschiedlichen Kristall- und Zählrohrpositionen, die manuell eingestellt wurden, wird eine Vielzahl von Reflexen vermessen (Bragg, 1937).

Mit dieser Technik lösten Bragg & West (1926) die Kristallstruktur des Berylls $Be_3Al_2Si_6O_{18}$. Zum besseren Verständnis sind die Schritte der Strukturlösung *(Abb. 38 und 39)* hier stark vereinfacht widergegeben: (1) die Symmetrie des Beugungsmusters deutete auf die von Fedorov, Schoenflies und Barlow abgeleitete Raumgruppe Nr. 192 *P6/mmc* hin und (2) aus den Abständen der Reflexe wurde die Grösse der Elementarzelle bestimmt *(Abb. 38)*. (3) Mit Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des Berylls $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ erfolgte ein Vergleich mit einem Schema der Elementarzelle für die Raumgruppe *P6/mmc*, in dem die Lagen aller Symmetrieelemente vermerkt sind. Die Raumgruppengraphik (Astbury & Yardley, 1924) zeigt z. B. parallel zu den sechs-zähligen Achsen auch zwei drei-zählige Achsen (Dreiecke) und drei zwei-zählige Achsen (Oliven) pro Zelle *(Abb. 39a)*, wobei die Achsen auf den Kanten nur halb gezählt werden, da sie gleichzeitig zu zwei benachbarten Zellen gehören. Mit Hilfe eines Vergleichs der Zähligkeit einer Atomposition in der Raumgruppe (Wyckoff-Position) und der chemischen Zusammensetzung, können mit kristallchemischem Hintergrundwissen, Modelle über die Atomverteilung in der Elementarzelle entwickelt werden. Im Beispiel des Berylls

wurde Al auf den drei-zähligen- und Be auf den vertikalen zwei-zähligen Achsen platziert, während die sechs Si Positionen um die sechs-zählige Achse gruppiert wurden *(Abb. 39b)*. (4) Nachdem so ein Strukturvorschlag aus einer Kombination von Wissen, Beobachtung und Raten entwickelt wurde, erfolgt im nächsten Schritt mit Hilfe des Modells eine so genannte Strukturfaktorrechnung, wobei die Intensitäten aus dem Modell zurückgerechnet werden. (5) Das «beste» Strukturmodell ergibt die geringsten Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Reflexintensitäten.

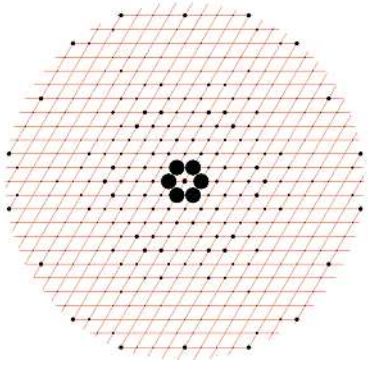


Abb. 38a: Links – Aquamarin, Edelsteinvarietät des Berylls (Foto: Olaf Medenbach). *Abb. 38b:* Rechts – Berechnetes hk0 Röntgen-Beugungsbild eines hexagonalen Berylls. Die unterschiedlichen Reflexintensitäten sind durch variable schwarze Kreisdurchmesser dargestellt. Das unterlegte Raster verdeutlicht das Gitter, und die Maschengrösse charakterisiert die Gitterkonstanten **a = b,** γ = 120°. Die Beurteilung einer Serie von Beugungsaufnahmen, die Gitterebenen in unterschiedlichen Kristallrichtungen repräsentieren, ermöglicht die Anzahl der hexagonalen Raumgruppen einzuschränken.

Nachdem zahlreiche Wissenschaftler (z. B. der Amerikaner Linus Pauling; siehe unten) von der neuen Technik begeistert waren, viele Mineralstrukturen aufklärten und allgemeingültige Regeln aufstellten, schrieb William Lawrence Bragg (1937) das Buch «Crystal Structures of Minerals», das erstmals einen Überblick über Methodik und Systematik aller bis zu diesem Zeitpunkt geklärten Mineralstrukturen ermöglichte. Die Ästhetik der Mineralstrukturen beeinflusste auch die zeitgenössische Design- und Kunstszene. So entwarfen H. Webster und A. C. Gill unterschiedliche Spitzenmuster auf der Grundlage von Kristallstrukturen. Lady Alice Bragg, die Frau von Sir Lawrence Bragg (1941 geadelt durch König Georg VI.),

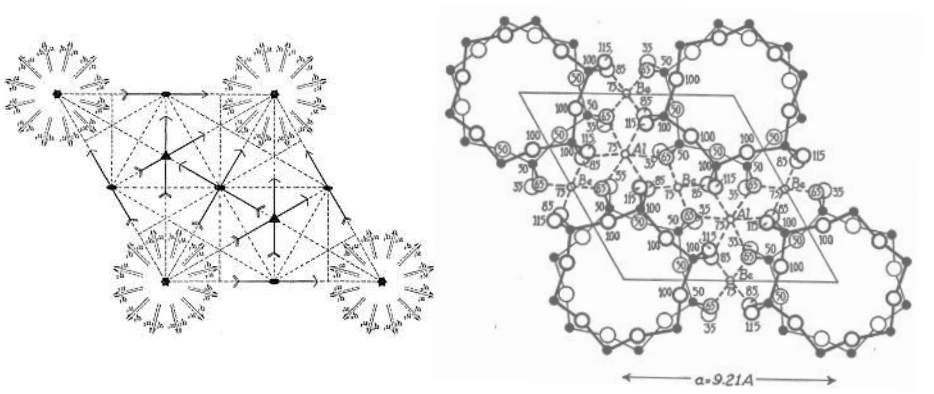


Abb. 39a: Links – Anordnung der Symmetrieelemente in der Raumgruppe *P6/mcc*, die für Beryll vom Beugungsbild abgeleitet wurde (Astbury and Yardley, 1924). *Abb. 39b:* Rechts – Bindungsmodell der Beryllstruktur $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ (Bragg, 1937), die von Bragg & West (1926) gelöst wurde.

trug anlässlich des Kongresses der Internationalen Kristallographischen Vereinigung (IUCr) 1951 in Stockholm ein Kleid aus seiner solchen Baumwollspitze mit dem Muster der Beryllstruktur *Abb. 40*). Sir Bragg war bei diesem Anlass Präsident der IUCr.

Abb. 40: Baumwollspitze (H. Webster und A. C. Gill) mit dem Muster der Beryllstruktur (Victoria & Albert Museum London).

Metamorphose von Forschungsschwerpunkten

Mit den Braggs sehen wir einen kontinuierlichen Übergang von der Strukturforschung an Mineralien und anorganischen Materialien zur Proteinkristallographie. In seiner Zeit am Cavendish Laboratorium in Cambridge hat auch der Sohn William Lawrence Bragg nach dem Zweiten Weltkrieg diesen Schritt vollzogen. Das entsprechende gilt für Pauling, der im nächsten Kapitel beschrieben wird, und ebenfalls auf dem mineralogischen Sektor begann, bis er nach dem Zweiten Weltkrieg ein Exponent der Proteinkristallographie wurde.

Viele der wegweisenden Wissenschaftler, unabhängig ob sie aus dem Bereich der Mineralogie, Chemie oder Physik stammten, wurden bis dahin mit einem Mineralnamen geehrt, weil ihr Forschungsbeitrag relevant für die Zukunft der Mineralogie war. Diese Ehrung erscheint auf den ersten Blick ziemlich willkürlich, so gibt es z. B. keinen anerkannten Fedorovit aber einen Schoenfliesit und Barlowit. Dieses Missverhältnis bedarf einer Erklärung. Tatsächlich gab es ursprünglich Mineralnamen wie z. B. Bravaisit, Wernerit, Mohsit, Fedorovit und Grothit, aber die Beschreibung dieser Spezies war entweder nicht eindeutig oder sie bezog sich auf eine Varietät eines bereits offiziell benannten Minerals. Daher erhielten diese Namen keinen offiziellen Status durch die International Mineralogical Association (IMA). Wenn einmal ein Mineralname verwendet wurde, auch ohne IMA Anerkennung, sieht man in der Zukunft davon ab, diesen Namen nochmals für eine andere Mineralart zu vergeben. Die Verwirrung wäre ansonsten vorprogrammiert.

Warum nur Beugung?

Der hier gegebene Überblick von Kristall-Untersuchungsmethoden und ihren Ergebnissen im zwanzigsten Jahrhundert konzentriert sich ganz auf die Beugung am Kristall. Unbestritten gibt es eine Vielzahl von spektroskopischen und anderen Methoden, die man in diesem Zusammenhang diskutieren könnte. Die Beugung (von Elektronen, Neutronen, Röntgenstrahlen) am Kristall wird aber als so herausragend behandelt, weil sie wie keine andere Methode ein direktes Abbild der gemittelten atomaren Struktur liefert. Es ist auch kein Geheimnis, dass der Autor dieses Artikels während seiner ganzen wissenschaftlichen Karriere dieser Methode treu geblieben ist und daher vielleicht eine gewisse Voreingenommenheit mitbringt. Ausserdem versteht man heute vielerorts den Begriff Kristallographie als Synonym für Strukturaufklärung mit Beugungsmethoden.

Strukturelle Gesetzmässigkeiten für Ionenkristalle

Abb. 41: Linus Pauling 1954.

10 Jahre nach der bahnbrechenden Idee der Braggs löste **Linus Carl Pauling** (geb. 1901 in Portland Oregon USA, gest. 1994) im Rahmen seiner Doktorarbeit am Caltech in Pasadena (Kalifornien, USA) die Kristallstruktur des Minerals Molybdänit (Dickinson & Pauling, 1923). Pauling blieb fast 40 Jahre (ab 1930 als ordentlicher Professor) am Caltech. Nur wenige Jahre nach seiner ersten Kristallstruktur publizierte er die fünf Paulingregeln (Pauling, 1929), die eine Erklärung, aber auch eine Vorhersage der Kristallstrukturen von Ionenkristallen ermöglichten. Pauling, ein Bewunderer von William Lawrence Bragg, besuchte 1930 sein «Vorbild» für einige Wochen in Manchester. Zu seiner Enttäuschung kam es weder zu einem näheren persönlichen Kontakt, noch zu einem wissenschaftlichen Austausch. Pauling versteht erst viele Jahre später, dass er, obwohl 10 Jahre jünger, von Bragg als Konkurrent empfunden wurde. Ein zweiter Kontakt wurde bestimmend für Paulings Leben. Bereits 1927 traf er bei einem Stipendiumsaufenthalt in München den angehenden Quantenphysiker J. Robert Oppenheimer. Ihre Wege kreuzten sich wieder ab 1928 in Pasadena. Oppenheimer wird als intellektueller «Freigeist und Paradiesvogel» beschrieben. Ihm fehlte aber die Begabung, halbwegs akzeptable Vorlesungen zu halten. Pauling half ihm dabei, dieses Defizit zu meistern, und es kam zu einer engen Freundschaft zwischen Oppenheimer und Pauling mit Frau Ava Helen. Oppenheimer kleidete sich fortan wie Pauling und schrieb diesem auch «merkwürdige» Gedichte. Die beiden Männer planten gemeinsam das Buch «Natur der chemischen Bindung» zu schreiben. Zum Eklat kam es als Oppenheimer in der Abwesenheit von Pauling dessen Frau Ava zu einem «Stelldichein» nach Mexiko einlud. Ava wies die Einladung empört zurück und berichtete den Vorfall ihrem Mann. Von da an gingen die beiden Männer getrennte Wege und Pauling änderte seinen Kleidungstil.

Beginn der Proteinkristallographie

Als Pauling (1939) endlich allein das Buch «Nature of the Chemical Bond = Natur der chemischen Bindung» publizierte, hatte er bereits Jahre zuvor seinen Forschungsschwerpunkt von Mineralien und anorganischen Substanzen auf Biomoleküle verlagert (z. B. Hämoglobin: Sauerstoff wird kovalent an das Hämoglobin gebunden, dadurch erhält arterielles Blut diamagnetische Eigenschaften, im Gegensatz zum paramagnetischen venösen Blut). Pauling gelingt 1949 mit Mitarbeitern der Nachweis, dass die Sichelzellenanämie eine Erbkrankheit

der roten Blutkörperchen ist. Die Veränderung einer einzigen Aminosäure des Hämoglobins ist für die Erkrankung verantwortlich. Diese Erkenntnis gilt als Beginn der molekularen Genetik.

Während des Zweiten Weltkriegs (1939–1945) verhielt sich Pauling zunächst weitgehend apolitisch, unterhielt aber zahlreiche militärisch relevante Forschungsprojekte, z. B. über Raketentreibstoff, Sprengstoff usw. Paulings Frau Ava Helen war immer schon Pazifistin. Als aber 1941 nach dem Überfall der Japaner auf Pearl Harbor auf Hawaii Amerikaner japanischer Abstammung in Internierungslagern inhaftiert wurden, empfand auch Pauling dies als Widerspruch zu den amerikanischen Prinzipien der Freiheit und Gerechtigkeit. 1942 wurde er von Robert Oppenheimer eingeladen, eine Position als Verantwortlicher der Chemieabteilung innerhalb des Manhattan-Projekts (Tarnname für Entwicklung und Bau der Atombombe) einzunehmen. Er lehnte unter verschiedenen Vorwänden ab, aber wahrscheinlich war sein gespaltenes Verhältnis zu Oppenheimer der tatsächliche Grund. Ungefähr ab diesem Zeitpunkt entwickelte sich Pauling zum Friedensaktivisten und Nukleargegner. Nach dem Abwurf amerikanischer Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki im Jahr 1945 trat er öffentlich gegen die Entwicklung von Atomwaffen auf und plädierte für den Weltfrieden. 1946 wurde er Mitglied der Antinuklearwaffen-Aktivistengruppe um Albert Einstein. Als er 1949 auch noch ein allgemeines Gesundheitssystem in den USA forderte, wurde er von Senator Joseph McCarthy einer «Konspiration mit kommunistischen Frontorganisationen» bezichtigt. Ironischerweise wurde gleichzeitig sein Werk «Nature of the Chemical Bond» von Exponenten der sowjetischen Wissenschaft als «feindlich» gegenüber einer marxistischen Denkweise eingestuft. Wegen mangelnder Vaterlandsliebe wurde ihm 1951–1954 die Verlängerung seines Passes verweigert, und erst als er 1954 den Nobelpreis für Chemie erhielt («Forschungen über die Natur der chemischen Bindung und deren Anwendung zur Erklärung von Strukturen komplexer Substanzen») wurde seine Reisebeschränkung aufgehoben. Das Zeolithmineral Paulingit $(K,Na,Ca)_{3\text{-}4}(Si,Al)_{21}O_{42}$ wurde 1960 ihm zu Ehren benannt.

Bereits 1951 veröffentliche Pauling mit verschiedenen Mitarbeitern eine Serie von Artikeln über die Proteinstruktur. Nach Ansicht des Herausgebers der «Proceedings of the National Academy of Sciene» handelte es sich um «die wissenschaftlich bedeutendsten der ersten fünfzig Bände». Pauling gab darin eine detaillierte Beschreibung der Protein α- und γ- Helix, mit Atomkoordinaten für beide Konfigurationen. Zusammen mit Robert B. Corey beteiligte er sich auch am Rennen um die Lösung der DNS Struktur (siehe unten); der publizierte Strukturvorschlag mit einer Dreifachhelix (Pauling & Corey, 1953) war allerdings nicht korrekt. 1962 folgte der Friedensnobelpreis für sein Engagement gegen die Verbreitung von Atomwaffen. Seit Ende der 1960er Jahre trat Pauling für eine umstrittene Überdosierung von Vitamin C gegen verschiedenste Krankheiten ein und schrieb mehrere Bücher zu diesem Thema. Pauling verstarb mit 93 Jahren an Krebs. Sein Biograph (Hager, 1995, 1998) schildert seinen Lebensweg, während sein wissenschaftlicher Nachlass z. B. von Dunitz (1997) kompetent gewürdigt wird.

Die Bausteine des Lebens werden entschlüsselt

Abb. 42: Rudolf Signer von 1935 bis 1972 Professor am Institut für organische Chemie der Universität Bern (Bild: Privatarchiv).

Meistens unerwähnt und von vielen vergessen hat **Rudolf Signer** (geb. 1903 in Herisau, gest. 1990 in Gümligen), von 1935 bis 1972 Professor am Institut für organische Chemie der Universität Bern, den Startschuss für das Rennen um die Lösung der DNS Struktur gegeben. Die Desoxyribonukleinsäure (DNS) ist ein in allen Lebewesen vorkommendes Biomolekül und Träger der Erbinformation.

Signer war Schüler des Kautschukforschers Hermann Staudinger in Freiburg im Breisgau, mit dem er zeitlebens engen Kontakt pflegte. Seit den zwanziger Jahren vertrat Staudinger die Theorie von den hochmolekularen Polymeren mit Abertausenden von Atomen. Die gängige Meinung zu diesem Thema aber war, dass es keine Moleküle mit mehr als etwa 50 Kohlenstoffatomen gibt. Inspiriert durch den schwedischen Gastwissenschaftler Caspersson, der DNS extrahiert aus der Kalbs-Thymusdrüse mitbrachte, begannen Signer und Caspersson in Bern mit der Technik der Strömungsdoppelbrechung, das Molekulargewicht dieser DNS zu bestimmen. Das Ergebnis ergab, dass die Moleküle aus etwa 40000–80000 Kohlenstoffatomen bestehen. Ausserdem erkannten sie die DNS-Moleküle als längliche Stäbchen, wobei die Basen, die aus planaren Ringe bestehen, senkrecht zur Längsachse des Kettenmoleküls angeordnet sind (Signer et al., 1938). Von da an begann Signer in seinem Berner Labor mit der systematischen schonenden Extraktion der DNS aus der Kalbs-Thymusdrüse.

Im Mai 1950 besuchte Signer einen Kongress für Kolloide und Biophysik in London und verschenkt 15 Gramm extrahierte DNS an interessierte Wissenschaftler. Da die reine DNS ein watteähnliches Produkt war, wurde Signers Geschenk auch als **«Das Manna aus Bern»** bezeichnet. Einer der glücklichen Empfänger war Maurice Wilkins, der die DNS auch an Rosalind Franklin zur strukturellen Untersuchung weitergab. Signers hochreine DNS war das Material, an dem die Struktur gelöst wurde. Für die Aufklärung der Doppelhelixstruktur erhielten Crick, Watson und Wilkins 1962 den Nobelpreis in Physiologie und Medizin.

Meili (2003a,b) diskutiert auch die Frage, ob die Strukturaufklärung nicht auch hätte in der Schweiz durchgeführt werden können. Er kommt zum Schluss, dass Signer als Wissenschaftler im eigenen Land zu isoliert war und die meisten Fachkollegen nichts von seinen Fähigkeiten und Leistungen wussten. Der herausragende Kristallograph in der Schweiz war damals Paul Niggli (1888–1953) an der ETH Zürich. Er war aber vor allem Theoretiker und engagierte sich ausserdem für mineralogische

Fragestellungen. Sein Schüler Werner Nowacki (1909–1988) war bereits seit 1939 Oberassistent für Kristallographie am Institut für Mineralogie und Petrographie in Bern, habilitierte 1939 und wurde 1949 zum Professor für Kristallographie befördert (Engel, 1989). Neben seiner stark theoretischen Ausrichtung baute er kontinuierlich ein Röntgenlabor auf, das dem damals neusten Stand entsprach und speziell die Untersuchung von makromolekularen Kristallen vorsah. Sein Interesse an Proteinstrukturen basierte sicherlich auf seinem Aufenthalt im Sommer 1947 bei Pauling in Pasadena, der am Caltech Biomoleküle strukturell untersuchte. Nach seinen eigenen Aussagen rechnete Nowacki fest damit, bei der strukturellen Untersuchung der DNS mit einbezogen zu werden. Dass dies nicht geschah, betrachtete er als eine der grossen Enttäuschungen in seinem Leben. Sowohl Nowacki als auch Signer waren beide keine besonders kommunikativen Persönlichkeiten, und die fachliche Distanz zwischen einem Institut für organische Chemie und einer Kristallographie am Institut für Mineralogie war sicher für eine Zusammenarbeit nicht besonders förderlich, auch wenn die räumliche Distanz nur weniger als hundert Meter betrug.

Herausragende Frauen in der Kristallographie

Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts war in England ein naturwissenschaftliches Studium für Frauen zwar möglich, aber eigentlich nicht vorgesehen. Während in Mädchenschulen z. B. nur Rechnen gelehrt wurde, wurde in Jungenschulen Mathematik angeboten. In den klassischen englischen Universitäten existierten «Girl Colleges» im Sinne eines abgeschotteten Bereichs innerhalb der Universität, wo man bevorzugt Fächer wie Hauswirtschaft studierte. Auch der Mensabereich war ursprünglich getrennt für männliche und weibliche Studierende. Wissenschaftliche Gespräche wurden abends unter den männlichen Kollegen in Zigarrenrauch geschwängerter Luft der englischen Clubs geführt. Für junge Frauen waren diese Umstände alles andere als eine optimale Vorrausetzung, sich als «Aussenseiterinnen» zu einem naturwissenschaftlichen Studium motivieren zu lassen. Aber trotzdem gab es sie und Frauen mit einem Physik- oder Chemiestudium wandten sich der Kristallographie zu. Rayner-Canham & Rayner-Canham (2008) stellen in ihrem Buch dazu eine interessante Hypothese auf. In der Zeit als die Kristallographie noch eine junge Wissenschaft war, vermittelten ihre akademischen Lehrer und Betreuer den Eindruck einer gewissen Bescheidenheit. Sie schienen ihre Forschung aus Vergnügen und zur schieren Freude zu betreiben. Anfänglich (das sollte sich bald ändern; siehe Rosalind Franklin) gab es in diesem aufstrebenden Wissenschaftszweig noch genügend Freiraum, um sich in einer ziemlich konkurrenzfreien Umgebung ungehindert entwickeln zu können. Dieses Umfeld schien eine besondere Anziehungskraft für Frauen zu besitzen.

William Henry Bragg (der Vater) stellte 1924 die junge und äusserst begabte **Kathleen Lonsdale geb. Yardley** (1903–1971) in seiner Forschungsgruppe an, nachdem sie zuvor, ebenfalls am University College London, einen Mastertitel in

Physik erworben hatte (Robinson, 2015). Lonsdale (1929) wies mit Röntgen-Beugungsmethoden nach, dass der Benzolring in Hexamethylbenzol-Kristallen hexagonal und planar ist. Sie war die Erste (Lonsdale, 1931), die die Fourier-Analyse benutzte, um damit die Struktur des kristallinen Hexachlorbenzols zu lösen. Nachdem die Diamantstruktur eine der ersten Strukturen war, die von Bragg & Bragg (1913) gelöst wurden, entwickelte sich Lonsdale zur Diamantexpertin. Aufgrund von zusätzlichen schwachen Röntgenreflexen unterschied sie zwei Typen von Diamanten, die sich später als stickstoffreich und stickstoffarm erwiesen. Ausserdem bestimmte sie Einschlüsse in Diamanten und charakterisierte synthetische Diamanten. Die hexagonal-gestapelte «Variante» des Diamants, die erstmals in einem Meteorit gefunden wurde, erhielt ihr zu Ehren den Namen Lonsdaleit. Neuste Untersuchungen scheinen aber zu bestätigen, dass es sich beim Lonsdaleit nicht um eine unabhängige Mineralart, sondern um eine stark verzerrte und fehlerhafte kubische Diamantstruktur handelt (Németh et al., 2014). 1945 wurde sie und die Biochemikerin Marjory Stephenson als erste Frauen in die Royal Society gewählt. Vier Jahre später wurde Lonsdale die erste fest angestellte Professorin am University College London. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde ihre Arbeit vor allem über kurzfristige Forschungsaufträge finanziert. Sie schrieb 1948 das Buch «Crystals and X-rays» und wurde als Herausgeberin der ersten drei Bänder der «International Tables for X-Ray Crystallography» (ab 1952) bekannt. In den 1960er Jahren begeisterte sie sich für die Untersuchung von kristallinen Konkrementen im menschlichen Körper (z. B. Blasen-, Nieren- und Gallensteine) und verfasste zahlreiche demographische Studien zu diesem Thema.

1935 trat sie mit ihrem Mann den Quäkern (pazifistische Religionsgemeinschaft mit christlichen Wurzeln) bei und musste im Zweiten Weltkrieg ins Gefängnis, weil sie sich weigerte, sich für zivile Verteidigungsdienste registrieren zu lassen oder eine Strafsteuer zu bezahlen. Als Reaktion auf die Atomwaffentests der USA, Sowjetunion und Grossbritanniens verfasste sie 1956 das Buch «Is Peace Possible?» und rief zum Weltfrieden auf.

Dorothy Crowfoot Hodgkin (1910–1994) war von 1928 bis 1932 eine der ganz wenigen Chemiestudentinnen in Oxford (Ferry, 1998). Für ihre Promotion wechselte sie nach Cambridge, um unter der Leitung von John Desmond Bernal Sterole (= Sterine: Membranlipide, wichtige Bestandteile der Zellmembran) strukturell zu untersuchen. Sie war von den Möglichkeiten der Röntgenstrukturanalyse so begeistert, dass sie dieser Technik während ihrer gesamten akademischen Karriere treu blieb und viele biologisch relevante Molekülstrukturen erforschte, darunter Pepsin (1934), Cholesterin (1941), Penicillin (1944), **Vitamin B12** (1956) und Insulin (1969). 1934 ging Dorothy Crowfoot zurück nach Oxford und heiratete 1937 den Politologen Thomas Lionel Hodgkin, mit dem sie drei Kinder hatte. Kurz nach der Geburt des ersten Kindes erkrankte sie schwer an Gelenkrheumatismus, worunter sie sehr litt, sich aber nicht von ihren Forschungen abhalten liess. Die spätere britische Premierministerin (1979–1990) Margaret Thatcher fertigte 1946/47 unter ihrer Leitung eine Bachelorarbeit in Chemie an. Dorothy Crowfoot

Hodgkin erhielt 1964 den Nobelpreis für Chemie (Vitamin B12). Sie war die dritte Frau nach Mutter und Tochter Curie, die diese höchste Auszeichnung für Chemie erhielt. Die britische Tageszeitung Daily Telegraph verkündete: *«British woman wins Nobel Prize – £18,750 prize to mother of three».* Die Schlagzeile in der Daily Mail war noch prägnanter: «*Oxford housewife wins Nobel».* Im Observer konnte man frei übersetzt lesen: «*Die freundlich erscheinende Hausfrau Mrs. Hodgkin hat einen Preis für ihr ganz und gar unhausfrauliches Fachkönnen erhalten, für Kristallstrukturen von grossem chemischen Interesse.*»

Abb. 43: Rosalind Franklin (Jewish Chron. Arch./Heritage-Images).

Im Januar 1951 begann **Rosalind Franklin** (1920–1958) als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Kings College in London, wo sich die Arbeitsgruppe um Sir John Randall auf den Bereich Biophysik spezialisiert hatte. Nach ihrer Promotion in Cambridge (1942–1945) über ein Thema zur effizienteren Nutzung der Kohle lernte Franklin 1947–1950 am «Laboratoire Central des Services Chimiques de L'Etat» in Paris das Einmaleins der Röntgenbeugung. Auch dort beschäftigte sie sich mit dem Thema Kohle und pyrolytisch erzeugtem Kohlenstoff, der teils aus kleinen Graphitplättchen, teils aus amorphem mikroporösem Kohlenstoff bestand. In London erhielt sie eine wissenschaftliche Anstellung wegen ihrer Expertise im Bereich der experimentellen Röntgenbeugung. Dies führte aber von Anfang an zu Missverständnissen. Die durchsetzungsfähige und direkte Konfrontation suchende Franklin trifft in London auf ihren Kollegen Maurice Wilkins, der als schüchtern und äusserst zurückhaltend beschrieben wird. Dem Zeitgeist folgend ging Wilkins davon aus, dass sie als Frau ihm als eine Art Laborantin unterstellt sei. Sir Randall musste erst klarstellen, dass Franklin als selbständige Wissenschaftlerin auf dem Gebiet der DNS-Struktur forschen wird. Diese Entscheidung war für Wilkins besonders verletzend, da er bisher dieses Thema bearbeitete. In den zahlreichen Berichten und Biographien rund um die Entdeckung der DNS Struktur finden sich viele widersprüchliche Angaben und Interpretationen zur Person Rosalind Franklin und zur zwischenmenschlichen Situation am Kings College in London. Aber folgende Beschreibung lässt sich unvoreingenommen extrahieren: Sie war eine kulturell gebildete und interessierte, selbstbewusste junge Frau mit starkem sozialem Engagement. In ihrem wissenschaftlichen Tätigkeitsbereich zeichnete sie sich durch grossen Enthusiasmus und hohe Fachkompetenz aus. Offensichtlich fühlte sie sich aber in ihrem neuen Arbeitsumfeld nicht besonders wohl. Zusammen mit ihrem Doktorand Raymond Gosling hat sie den Grundstein zur Lösung der DNS Doppelhelix-Struktur gelegt. Sie hatten eine Beugungsaufnahme der DNS angefertigt, aus der die Existenz der Doppelhelix ersichtlich war und daraus auch die richtigen Schlüsse und Interpretationen gezogen.

Nach ihren Untersuchungen an der DNS wechselte Franklin 1953 verbittert zum Birkbeck College der Universität London. Dort leitete sie eine Arbeitsgruppe, in der bahnbrechende Arbeiten über die Molekularstruktur von Viren (z. B. Tabakmosaikvirus, Poliovirus) ausgeführt wurden. 1958 verstarb Franklin im Alter von 38 Jahren. Ihr Teammitglied und späterer Nachfolger Aaron Klug führte ihre Forschungen fort und erhielt dafür 1982 den Nobelpreis in Chemie.

Ausgewählte und zum Teil widersprüchliche Literatur zum Thema Rosalind Franklin und die DNS

Gerhard Fröhlich: *Plagiate und unethische Autorenschaften.* Information – Wissenschaft & Praxis, 2006, 57, Heft 2, 81–89.
Jenifer Glynn: *Rosalind Franklin, 1920–1958*. in: E. Shils, C. Blacker (Hrsg.): *Cambridge Women – Twelve Portraits.* University Press, Cambridge 1995.
Aaron Klug: *The Discovery of the Double Helix.* in: T. Krude (Hrsg.): *DNA, Changing Science and Society.* University Press, Cambridge 2003.
Brenda Maddox: *Rosalind Franklin. Die Entdeckung der DNA oder der Kampf einer Frau um wissenschaftliche Anerkennung.* Campus, Frankfurt am Main 2002.
Anne Sayre: *Rosalind Franklin and DNA.* W. W. Norton & Co., New York 1975.
James D. Watson: *Die Doppel-Helix.* Rowohlt, Hamburg 1968, 1993.

Eine Intrige gegen Rosalind Franklin

Zum Verlauf einer einmalig skrupellos-dreisten Geschichte sind einige Vorkenntnisse notwendig: Zur Biophysik am Kings College in London gab es in Cambridge eine konkurrierende Gruppe am Cavendish-Laboratorium. Leiter und Cavendish-Professor 1938–1953 war dort William Lawrence Bragg. Bragg hatte noch eine Rechnung mit Pauling offen, der ihm bei der Beschreibung der Protein α-Helix zuvorgekommen war. Es wäre Bragg eine Genugtuung gewesen, mit der Lösung der DNS Struktur den Spiess umzudrehen. Am Cavendish Laboratorium leitete seit 1947 Max Perutz mit finanzieller Unterstützung des Medical Research Councils die Abteilung «Molekularstruktur biologischer Systeme». Dieses Themengebiet war auch international äusserst attraktiv. Der US-Amerikaner James Watson kam 1951 23-jährig direkt nach seiner Promotion in Zoologie aus Bloomington (Indiana) zur Arbeitsgruppe von Perutz, um die DNS zu studieren. In der gleichen Forschungsabteilung arbeitete auch seit 1949 der Brite Francis Crick an seinem Dissertationsthema über die Kristallstruktur des Hämoglobins. Crick ist ebenfalls Spezialist in der Röntgenbeugung, wie seine Koautorenschaft an einer Untersuchung über die Auswirkung einer schrauben-ähnlichen atomaren Anordnung (Beispiel α-Helix) auf das Röntgen-Beugungsbild ausweist (Cochran et al. 1952). Seit Jahren sind Wilkins in London, der dort mit Rosalind Franklin persönliche Probleme hat, und Crick in Cambridge gute Freunde. Als dritter in diesem Freundesbund kommt jetzt noch Watson hinzu, der sich mit Crick die Lösung der DNS Struktur zum Ziel gesetzt hat. Beide gelten als Erfinder des DNS-Doppelhelix-

Modells. Alle drei Crick, Watson und Wilkins erhielten 1962 den Nobelpreis in Medizin für die Struktur der DNS und deren Bedeutung für den Informationstransfer in lebender Materie. Man spekuliert, dass Wilkins diese Ehrung nicht zuletzt darum erhielt, um nach dem Tod von Rosalind Franklin die Bedeutung des Kings College an der DNS Strukturforschung hervorzuheben.

Einige Kriterien für die Vergabe eines Nobelpreises:

Die Bedeutung einer mit dem Nobelpreis gewürdigten Forschungsarbeit muss langlebig sein, das heisst, dass der Nobelpreis bis zu 50 Jahren nach der «Entdeckung» vergeben werden kann. Der Nobelpreis kann nicht an verstorbene Personen vergeben werden. Ein Nobelpreis darf nicht an mehr als drei Personen gleichzeitig vergeben werden.

Die wissenschaftlichen Dreistigkeiten, die der Entdeckung der DNS zu Grunde lagen, werden in der Literatur wiederum äusserst widersprüchlich analysiert und interpretiert. Auch hier sollen nur die unbestrittenen Umstände zur Sprache kommen: Die Forschergruppe aus Cambridge (Watson und Crick) erhielten, ohne Wissen und Einwilligung der Urheberin (Rosalind Franklin), Einblick auf das gelungenste Röntgenbeugungsbild der DNS. Die Ergebnisse einer Evaluation des Kings College durch den Medical Research Council mit allen Detailergebnissen Franklins händigte Perutz als Gutachter vom konkurrierenden Cavendish Labor seinen Kollegen Watson und Crick aus.

Mit diesen Informationen verfassten Watson und Crick (1953) einen Artikel über das Modell der molekularen Struktur von Nukleinsäuren *(Abb. 44)*, für den sie später den Nobelpreis erhielten. In einem Begleitbrief von Lawrence Bragg an den Herausgeber der Zeitschrift Nature verweist Bragg auf die weitreichende Bedeutung dieser Publikation und empfiehlt, dass die Arbeit ohne die allgemein übliche externe Begutachtung zum Druck angenommen werden sollte. Dies geschieht auch, und am 25. April 1953 erscheint der Artikel im Druck. Nachdem Sir Randall bei seinem Freund, einem Herausgeber der Zeitschrift Nature, Druck gemacht hatte (Editorial, 2013), wurde auch ein Artikel zum Thema DNS aus dem Kings College (Wilkins et al., 1953) ohne Begutachtung im gleichen Heft vorgesehen. Erbost über diese Abläufe forderte Rosalind Franklin, dass auch ihr Artikel (Franklin & Gosling, 1953a), der den experimentellen Nachweis für eine Doppelhelix in der DNS Struktur enthielt, ohne Evaluation gedruckt würde. Diesem Gesuch wurde ebenfalls entsprochen, und somit erschienen alle

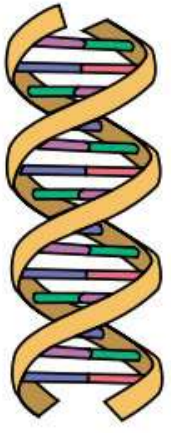


Abb. 44: Schematische Darstellung der DNS Doppelhelixstruktur. Phosphatrückgrad: beige; Nukleinbasen: Adenin (grün), Thymin (lila), Guanin (blau) und Cytosin (rot).

drei Artikel im gleichen Heft. Im Juli des gleichen Jahrs erfolgte die Publikation des zweiten Artikels von Franklin & Gosling (1953b) mit der Strukturlösung der DNS. Die Eile in der die Publikationen erfolgten wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass Pauling & Corey (1953) bereits im Dezember 1952 ein Manuskript zur Struktur der DNS eingereicht hatten, das im Februar 1953 in den Proceedings of the National Academy of Sciences im Druck erschien. Diese Veröffentlichung enthielt das Model einer Dreifachhelix der DNS, und die Nature-Artikel widersprachen diesem Modell.

Nachwort: Für die technische Durchführung der alles entscheidenden DNS Röntgenaufnahme Nr. 51 war Franklins Doktorand Raymond Gosling (1926–2015) verantwortlich (Editorial, 2013). Gosling, der zuvor schon 5 Jahre als Krankenhausarzt gearbeitet hatte, erhielt 1954 seinen Doktortitel in Physik für seine Promotionsarbeit «X-ray Diffraction Studies of Desoxyribose Nucleic Acid» am Kings College in London. Nach einem längeren Aufenthalt in der Karibik (University of the West Indies) kehrte er 1967 nach Grossbritannien an die Medical School des Guys Hospital in London zurück und arbeite dort als Hochschullehrer für medizinische Physik. Sein Beitrag zur DNS Struktur blieb eine Randnotiz. Francis Crick (1916–2004) promovierte ebenfalls 1954 in Cambridge mit der Arbeit: «X-Ray Diffraction: Polypeptides and Proteins» und erhielt 1962 den Nobelpreis. Da Rosalind Franklin zum Zeitpunkt der Verleihung des Nobelpreises für die Struktur der DNS bereits verstorben war, kam sie für eine entsprechende Ehrung nicht in Betracht.

Weitere Nobelpreisträger vom Cavendish Laboratorium

Max Ferdinand Perutz (geb. 1914 in Wien, gest. 2002 in Cambridge) erhielt 1962 zusammen mit seinem Mitarbeiter **John Kendrew** (1917 Oxford – 1997 Cambridge) den Nobelpreis in Chemie für die Strukturlösung der Proteine Hämoglobin und Myoglobin. Übrigens im selben Jahr als ihre Arbeitskollegen Watson und Crick, ebenfalls aus der Abteilung «Molekularstruktur biologischer Systeme» des Cavendish Laboratoriums, den Nobelpreis in Medizin (DNS) erhielten. Wir erinnern uns, dass Perutz als Gutachter den Forschungsbericht von Franklin an Watson und Crick weitergeleitet hatte. Perutz soll

Abb. 45: Max Perutz zusammen mit seiner Frau Gisela auf dem Ball anlässlich der Nobelpreisvergabe 1962.

sich später zu diesem ethisch nicht vertretbaren Vorgang geäussert haben: «*Er sei in Verwaltungsangelegenheiten unerfahren und arglos gewesen.*»

Der Lebenslauf von Perutz (Rhodes, 2012) ist typisch für eine Generation mit jüdischer Abstammung in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen: 1936 Studienabschluss (Biochemie) an der Universität Wien; anschliessend Emigration nach Cambridge, wo seine Doktorarbeit von William Lawrence Bragg betreut wurde; 1939 mit Ausbruch des Zweiten Weltkriegs Internierung von deutsch- und österreichstämmigen Einwanderern nach Neufundland (Kanada), Rückkehr nach England, Beteiligung an einem militärischen Forschungsprojekt zur Konstruktion eines unsinkbaren Flugzeugträgers aus Pykrete. Pykrete ist ein Verbundwerkstoff aus 14 % Sägemehl und 86 % Wassereis. Nach dem Krieg wird Perutz 1947 mit der Unterstützung Braggs Leiter der Abteilung «Molekularstruktur biologischer Systeme» am Cavendish-Laboratorium in Cambridge.

Das Phasenproblem bei den azentrischen Proteinen wurde durch Perutz und Mitarbeiter (Green et al., 1954; Perutz 1956) durch isomorphen Einbau von Schwermetallen (Quecksilber) im Protein gelöst. Dazu vergleicht man die Röntgen-Beugungsdaten zwei isomorpher Strukturen, eine mit und eine ohne Schwermetalle. Dieser «Trick» ermöglichte die Lösung der Hämoglobin- (Bragg & Perutz, 1954; Perutz, 1956) und Myoglobinstruktur (Kendrew et al., 1958). Auch heute noch wird diese Technik bei der Lösung von Proteinstrukturen angewandt. Die strukturellen Untersuchungen von Perutz und Kendrew waren der Schlüssel zum Verständnis des Sauerstofftransports vom Blut in die Muskeln.

Hämoglobin ist der eisenhaltige Proteinkomplex, der in den roten Blutkörperchen der Wirbeltiere über ein Eisenion Sauerstoff bindet, transportiert und abgeben kann. Hämoglobin verleiht dem Blut die rote Farbe.
Myoglobin ist ein Muskelprotein aus der Gruppe der kugelförmigen Proteine, das ebenfalls ein sauerstoffbindendes Eisenion besitzt. Myoglobin kann Sauerstoff aufnehmen und wieder abgeben und ist für den intramuskulären Sauerstofftransport verantwortlich. Es übernimmt den Sauerstoff aus dem Blut vom Hämoglobin und gibt ihn am Ort der physiologischen Verbrennungsprozesse in den Muskelzellen wieder ab.

Neben seinen wissenschaftlichen Ambitionen in der Molekularphysik war Perutz auch äusserst interessiert an den globalen Zusammenhängen von Wissenschaft und Politik (Perutz, 1999). Nach den Anschlägen vom 11. September 2001 schrieb er dem britischen Premier Tony Blair und appellierte an ihn, nicht mit militärischen Mitteln zu antworten:

«Ich bin alarmiert durch die amerikanischen Rufe nach Vergeltung und besorgt, dass Präsident Bushs Rache zum Tod tausender unschuldiger Menschen führen und uns in eine Welt aus eskalierendem Terror und Gegenterror stürzen wird. Ich hoffe, dass Sie ihren mässigenden Einfluss dazu nutzen können, dass dies nicht passiert.»

Periodizität und Nichtperiodizität

Ein **periodischer Kristall** ist durch ein Motiv (Baustein) gekennzeichnet, das durch Verschiebung um einen bestimmten Betrag in den drei Raumrichtungen zu einem unendlich grossen Muster erweitert werden kann. In einem hypothetischen eindimensionalen Kristall haben alle identischen Bausteine den gleichen Abstand, der als Translationsbetrag bezeichnet wird *(Abb. 46)*. Im dreidimensionalen Fall wird eine Elementarzelle durch drei Vektoren mit der Länge der Translationsbeträge aufgespannt. In einem Röntgen-Beugungsexperiment an einem periodischen Kristall entsteht ein Beugungsdiagramm von Punkten, wobei der Abstand der Punkte in Beziehung zu den Translationsbeträgen steht.

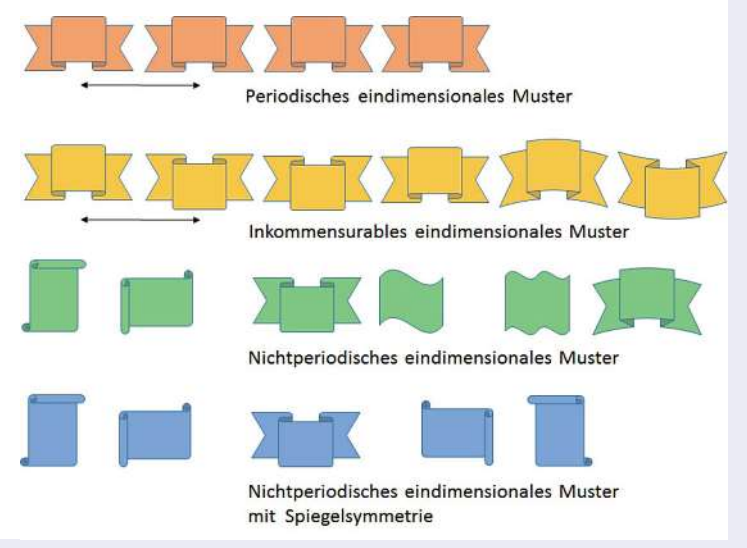


Abb. 46: Eindimensionale Anordnungen eines Motivs als Beispiele für periodische und nichtperiodische Kristalle.

In einem **inkommensurablen Kristall** ist das Motiv innerhalb des Musters nicht identisch, sondern jeweils leicht modifiziert *(Abb. 46)*. Für die ähnlichen Bausteine gilt das gleiche Translationsprinzip wie für einen streng periodischen Kristall. Zusätzlich zu den Beugungspunkten eines periodischen Kristalls entstehen in einem Röntgenexperiment schwache Satellitenreflexe, die inkommensurabel (nicht zusammen messbar) mit den Hauptreflexen sind. Die Satellitenreflexe *(Abb. 47)* können in höheren (zusätzlichen) Dimensionen indiziert werden.

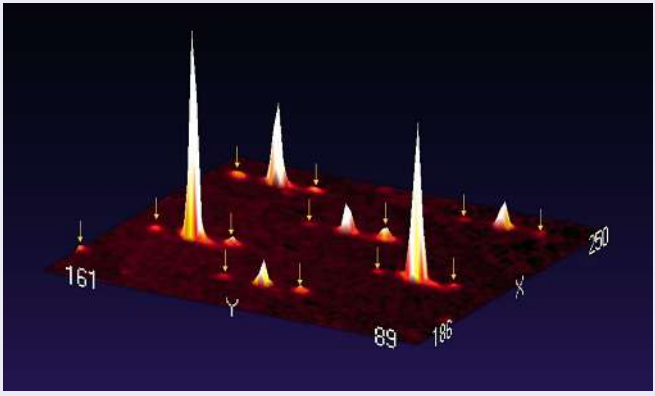


Abb. 47: Dreidimensionale Darstellung eines Einkristall-Beugungsbilds vom inkommensurabel modulierten Mineral Wagnerit $(Mg,Fe)_2PO_4(F,OH)$. Die Höhe der Reflexe repräsentiert ihre Intensität. Die mit Pfeilen gekennzeichneten Satellitenreflexe dekorieren die Schultern der intensiven Hauptreflexe, die einem periodischen Gitter entsprechen.

Eine **nichtperiodische Anordnung** von Bausteinen besitzt keine Translationssymmetrie *(Abb. 46)*. Solche Strukturen sind z.B. für Gläser charakteristisch, die amorph sind und somit keinerlei Symmetrie besitzen. Im Röntgen-Beugungsdiagramm produzieren sie kein Muster von Punkten.
Wie aber die Penrose-Kachelmuster *(Abb. 49a)* zeigen, können auch nichtperiodische Anordnungen geordnet sein, so dass sie **Spiegel- und Drehsymmetrie** aufweisen. Optische Beugungsexperimente an einem Penrose-Kachelmuster ergeben ein scharfes Punktediagramm (McKay, 1982). Ein **Quasikristall** ist ein dreidimensionales Analogon zum Penrose-Kachelmuster, also geordnet aber ohne Translationssymmetrie, und liefert ebenfalls im Röntgenexperiment ein Punktediagramm, das die Symmetrie des Musters wiedergibt.

Es kann nicht sein, was nicht darf sein…: Ende eines Paradigmas

Mindestens seit der Interpretation der Beugung von Röntgenstrahlen am Kristall durch Sohn und Vater Bragg galt die Lehrmeinung, dass einem Kristall ein dreidimensionales periodisches Gitter zugrunde liegt. Heute fasst man den Begriff Ordnung im Kristall viel weiter als mit dem ursprünglichen Kriterium der Periodizität. Die neue Definition sagt nicht mehr, was ein Kristall strukturell ist, sondern sie beruht auf der Existenz eines Beugungsbilds von Punkten, das ein Kristall produziert (Lifshitz, 2007; Grimm, 2015). Aus dem Vorhandensein dieser Beugungsreflexe schliesst man auf eine Fernbereichsordnung im atomaren Aufbau.

Goldschmidt et al. (1931) bestätigten ältere Messungen, dass beim Mineral Calaverit (Gold-Silber-Tellurid) das Gesetz der rationalen Flächenindizes nicht erfüllt ist. Erst als die Grundlagen für inkommensurabel modulierte Strukturen (siehe unten) durch de Wolff & van Aalst (1972) und Janner (1972) gelegt waren (Chapuis, & Arakcheeva, 2013), konnten Schutte & de Boer (1988) die Struktur des Calaverit unter Einbeziehung der Satellitenreflexe in einer vierdimensionalen Raumgruppe lösen. Inkommensurable Kristalle haben Strukturen, in denen Atompositionen gegenüber einem periodischen Gitter durch eine periodische Modulation verschoben sind. Dabei ist die Wellenlänge der Modulation unterschiedlich zu den Gitterkonstanten, also inkommensurabel. Die Gesamtstruktur ist daher nichtperiodisch.

Modulation der Struktur des Calaverits

Unter Vernachlässigung von Satellitenreflexen wurde die Durchschnittsstruktur des Calaverits von Tunell & Ksanda (1935), Tunell & Pauling (1952) und Pertlik (1984) in einer konventionellen (dreidimensionalen) Raumgruppe gelöst. Die inkommensurable Modulation (Schutte & de Boer, 1988), die auch die Kristalltracht beeinflusst (Goldschmidt et al., 1931), zeigt sich in der Verschiebung der Te Positionen, was mit einer fluktuierenden Wertigkeit zwischen Au^{1+} und Au^{3+} begründet wird. Durch die Modulation ist Au^{1+} zweifach und Au^{3+} vierfach von Te koordiniert.
Ein weiteres mit Erklärungen kommentiertes Beispiel von inkommensurabel modellierten Strukturen bei Mineralien folgt am Ende dieses Kapitels *(Abb. 51 und 52).*

Seit Generationen lernen Studenten in den Kristallographievorlesungen, dass fünfzählige Drehachsen in Kristallstrukturen nicht möglich sind, weil ihre Existenz dem Prinzip der Translation widerspricht. Es ist nicht möglich, eine Fläche lückenlos mit regelmässigen Fünfecken zu parkettieren *(Abb. 48).* Im Gegensatz dazu ist eine lückenlose Anordnung von Rechtecken, gleichseitigen Dreiecken, Quadraten und Sechsecken möglich. Daher war auch z. B. das Ikosaeder, ein Polyeder, der durch

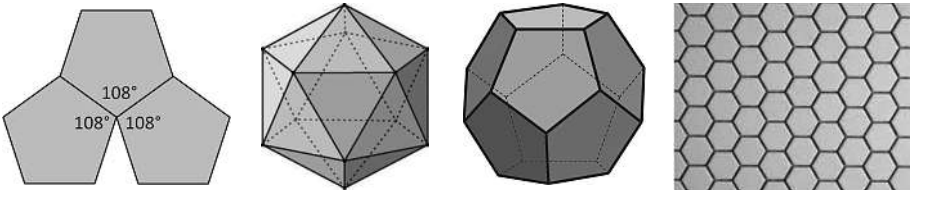


Abb. 48a–c: Von links nach rechts – Regelmässige Fünfecke können nicht zweidimensional lückenlos angeordnet werden; Ikosaeder und Pentagondodekaeder, platonische Körper mit sechs fünfzähligen Achsen, waren bis zur Entdeckung der Quasikristalle als Kristallform nicht erlaubt; reguläre Parkettierung durch Sechsecke.

zwanzig gleichseitige Dreiecke begrenzt ist *(Abb. 48)*, in der Kristallographie als Kristallform nicht «erlaubt». Ein Ikosaeder besitzt sechs fünfzählige Drehachsen. Entsprechendes gilt auch für das Pentagondodekaeder, das durch zwölf regelmässige Fünfecke begrenzt ist. Der Pyrit FeS_2 besitzt häufig die Form eines kubischen Pentagondodekaeders, dabei sind aber die begrenzenden Fünfecke nicht gleichseitig, sondern jede Fläche besitzt vier kürzere und eine längere Kante. Dies verhindert fünfzählige Drehachsen.

Einen neuen Aspekt zum Verständnis des Ordnungsbegriffs führte Penrose (1974) mit seinen Kachelmustern ein. Unter einem zweidimensionalen Penrose Muster versteht man eine Anordnung von zwei unterschiedlichen Arten von Kacheln (z. B. Rauten mit gleicher Kantenlänge aber unterschiedlichen Winkeln) zu einem lückenlosen nichtperiodischen Muster. Diese Anordnung kann so gewählt werden, dass nichtperiodische Muster mit fünfzähligen Drehachsen entstehen *(Abb. 49a)*.

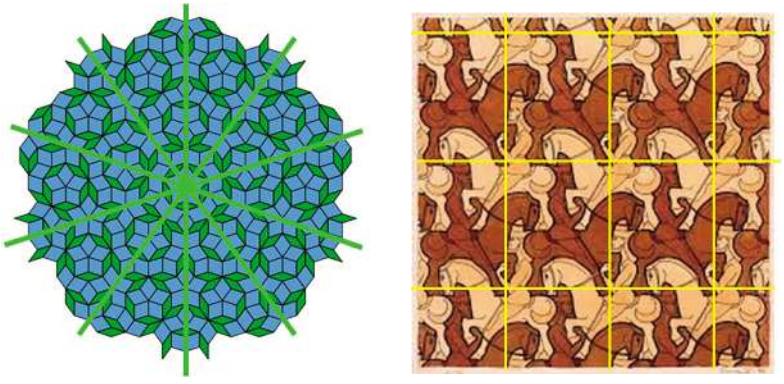


Abb. 49a: Links – Nichtperiodisches Penrose-Kachelmuster mit einer fünf-zähligen Drehachse im Zentrum und Spiegellinien (hell grün). *Abb. 49b:* Rechts – Periodische Anordnung von Reitern (Escher); die periodische Wiederholung wird durch das gelbe Raster verdeutlicht.

Nichtperiodische Parkettierungen wurden zuerst nur als interessante ästhetische oder mathematische Strukturen betrachtet. Mackay (1982) zeigte, dass solche Penrose Muster, obwohl ohne Periodizität, ein scharfes Beugungsdiagramm mit einer 10-fachen Drehachse produzieren. Nur zwei Jahre später berichten Shechtman et al. (1984):

«Wir haben einen metallischen Festkörper (Al-Legierung mit 14 at. % Mn) gefunden, der Fernbereichsordnung aufweist aber ikosaedrische Punktsymmetrie besitzt. Dieses Ergebnis ist nicht im Einklang mit der Gittertranslation. Das Beugungsbild ist scharf und entspricht dem eines Kristalls, aber es kann nicht mit einem Bravais-Gitter indiziert werden.»

Wenig später vervollständigen Levine & Steinhardt (1984) das Bild und schreiben:

«Ein Quasikristall ist die natürliche Erweiterung der Nomenklatur eines Kristalls hin zu Strukturen mit quasiperiodischer statt periodischer Translationsordnung … Wir

berechnen analytisch das Beugungsbild eines idealen Quasikristalls und zeigen, dass das neulich beobachtete Elektronen-Beugungsdiagramm einer Al-Mn Legierung ganz ähnlich zu einem ikosaedrischen Quasikristall ist.»

Interessanterweise wurde der Artikel von Levine & Steinhardt (Doktorand und sein Doktorvater) zwei Wochen vor dem Erscheinungsdatum der Entdeckung von Shechtman et al. (1984) zur Publikation eingereicht (Hargittai, 2011). Ursprünglich umfasste die Doktorarbeit von Dov Levine eine mathematische Untersuchung der Eigenschaften von Penrose Parkettierungen. Als sie aber von Dritten erfuhren, dass ihre theoretischen Ergebnisse über mögliche Ordnungszustände in Festkörpern tatsächlich in einer Metalllegierung gefunden wurden, nutzen sie die Gelegenheit und erweiterten ihr Manuskript.

Chapuis & Arakcheeva (2013) resümieren, dass diese neuen Arten von Festkörperstrukturen (inkommensurabel modulierte Kristalle und Quasikristalle) ein diskretes Beugungsbild gemeinsam haben, das mit mehr als drei ganzen Zahlen (in mehr als drei Dimensionen) vollständig indiziert werden kann. Daher können diese Strukturen unter dem Begriff «nichtperiodische Kristalle» zusammengefasst werden.

Daniel Shechtman (geb. 1941 in Tel Aviv), ein israelischer Physiker, erhielt 2011 den Nobelpreis in Chemie für die Entdeckung der Quasikristalle. Während seines dreijährigen Forschungsaufenthaltes 1972–1975 als Stipendiat in den Aerospace Research Laboratories bei Dayton (Ohio) beschäftigte er sich mit der Mikrostruktur und den physikalisch-metallurgischen Eigenschaften von Titan-Aluminiden. Seit 1975 arbeitete er am Institut für Materialwissenschaften der Technischen Universität Technion in Haifa. Es folgte 1981–1983 ein Sabbatical an der Johns-Hopkins University (Baltimore), wo er die Grundlage für die Entdeckung der Quasikristalle legte. Seit 2004 ist Shechtman auch Professor für Materialwissenschaften an der Iowa State University.

Shechtmans Entdeckung wurde lange kritisiert: «*Es gibt keine Quasikristalle, nur Quasi-Wissenschaftler*» soll der 1994 verstorbene Chemie-Nobelpreisträger Linus Pauling gesagt haben. Pauling war fest überzeugt und versuchte auch zu beweisen, dass «Quasikristalle» Artefakte seien, die durch Verzwillingung erklärt werden können (Pauling, 1985, 1987).

Der Leiter von Shechtmans Forschungsgruppe empfahl Shechtman, noch einmal die Lehrbücher zu lesen, und drängte ihn daraufhin, die Gruppe zu verlassen, um sie nicht zu blamieren (Wewetzer, 2011). Max Plank soll in seiner wissenschaftlichen Biographie geschrieben haben (aus dem Englischen (Hargittai, 2011) übersetzt):

«*Eine neue wissenschaftliche Erkenntnis triumphiert nicht, weil sie die Gegner überzeugt und ihnen den richtigen Weg zeigt, sondern weil die Opponenten langsam aussterben und eine neue Generation heranwächst, die mit der Neuheit vertraut ist.*»

Mit der Entdeckung der Quasikristalle, die wegen des nichtperiodischen Bauprinzips die Welt der Kristallographie revolutionierten, erhoffte man sich auch neue Anwendungsmöglichkeiten. Heute, 30 Jahre nach der ersten Beschreibung der

Paulings Argument gegen Quasikristalle

Auf den ersten Blick war die Skepsis von Pauling durchaus berechtigt. Als Shechtman et al. (1984) die Existenz von Quasikristallen publizierten, basierte ihre Entdeckung vor allem auf Elektronenbeugungsexperimenten an bis zu 2 µm grossen Körnen, die ein scharfes Beugungsbild charakteristisch für ikosaedrische Symmetrie lieferten. Eine Kristallstruktur des Quasikristalls wurde nicht präsentiert. Die Grundlagen dazu waren damals noch nicht ausgereift. Pauling glaubte, dass ein entsprechendes Beugungsdiagramm auch von einem Zwilling produziert werden könnte.

Kristalle mit z.B. pseudo-pentagonalem Habitus waren bekannt und konnten bis dahin immer als Zwillinge interpretiert werden. Auch im Mineralreich gibt es Beispiele dafür. Das Calcium-Vanadylsilikat Pentagonit $Ca(VO)(Si_4O_{10}) \times 4H_2O$ (Staples et al., 1973) besitzt einen idealisierten prismatischen Habitus mit fünfzähliger Drehachse *(Abb. 50)*, aber die einspringenden Winkel entlarven diesen Habitus eindeutig als Zwilling (bzw. Fünfling). Die unterschiedlichen Zwillingssektoren können bei diesem Mineral auch mit dem Polarisationsmikroskop unterschieden werden. Röntgenographische Strukturuntersuchungen bestätigten das Zwillingsmodel aus fünf orthorhombischen Sektoren (Evans, 1973). Das Röntgenbeugungsdiagramm eines solchen Fünflings entlang der Prismenachse zeigt eine zehnzählige Drehachse, und die Überlagerung der orthorhombischen Sektoren erweckt den Eindruck einer nicht periodischen Anordnung der Reflexe. Der Unterschied zwischen der Kristallstruktur eines orthorhombischen Fünflings und einem Quasikristall besteht darin, dass im Fünfling jeder Sektor für sich periodisch ist. Im Quasikristall existieren keine periodischen Sektoren.

Erste quantitative Röntgenstrukturanalysen an ikosaedrischen Quasikristallen gehen erst auf das Jahr 1988 zurück (Steurer & Deloudi, 2007). Paulings Kritik an Quasikristallen verstummte dann.

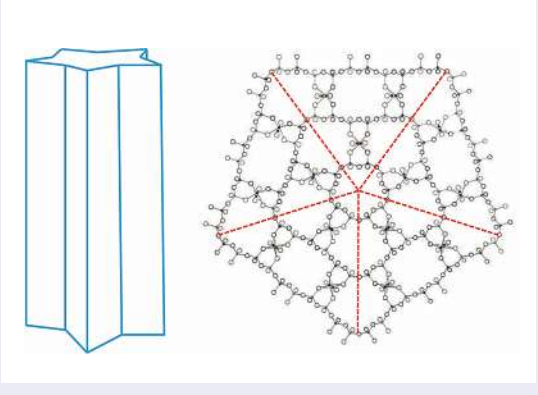


Abb 50: Links – idealisiertes pseudo-pentagonales Prisma des Minerals Pentagonit $Ca(VO)(Si_4O_{10}) \cdot 4H_2O$ (Staples et al., 1973). Die einfallenden Winkel charakterisieren den Habitus als Fünfling, zusammengesetzt aus orthorhombischen Sektoren. Rechts – Die Zwillingstruktur entlang der pseudo-fünfzähligen Achse wurde aus den periodischen in der Strukturlösung bestimmten Sektoren (begrenzt durch rote gestrichelte Linien) reproduziert (Evans, 1973).

Quasikristalle, gibt es allerdings keine kommerziellen Anwendungen, obwohl intensivst im Bereich der Materialwissenschaften daran geforscht wurde. Potentielle Einsatzbereiche (Dubois, 2012) bestehen z. B. im Bereich der Solartechnologie für Solarzellen, die den Infrarotanteil der Strahlung absorbieren; für harte Antihaftbeschichtungen mit geringem Abrieb als Ersatzprodukt für Teflon und für andere Spezialbeschichtungen mit besonderen Eigenschaften wie geringer thermischer Ausdehnung oder Oxidations- und Korosionsresistenz. Dass kommerzieller Einsatz bisher ausblieb, hängt sicherlich mit den relativ hohen Produktionskosten von Quasikristallen zusammen, die in Konkurrenz zu bereits günstigeren markterprobten Materialien stehen.

Als 2009 Quasikristalle erstmals auf der Erde gefunden wurden und später Anerkennung als Mineral fanden (Ikosaedrit, $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$ (Bindi et al., 2011) und Decagonit, $Al_{71}Ni_{24}Fe_5$ (Bindi et al., 2015)), betrachteten einige dies als Revolution in der Mineralogie (Bindi & Steinhardt, 2016), da ein solcher Fund die Skeptiker hinsichtlich der Langzeitstabilität (Millionen Jahre) der Quasikristalle überzeugen würde. Der derzeitige Stand der Forschung ist die Annahme, dass die terrestrischen Quasikristalle Teil eines kohligen Chondrits sind, also eines Meteorits, der auf die Bildung unseres Solarsystems vor 4,5 Milliarden Jahren zurückgeht. Als offene Frage diskutiert man, ob der für einen Meteoriten dieses Typs ungewöhnliche Al-Gehalt im Ikosaedrit und Decagonit während des Impakts durch Separation aus einer Al-führenden FeNi Phase entstand, oder ob die Anreicherung von Al bereits im solaren Nebel vor dem Impakt geschah (Bindi & Steinhardt, 2016).

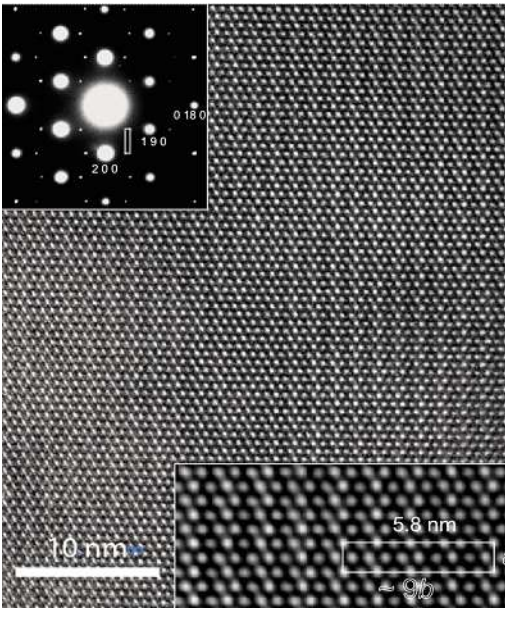


Abb. 51: Das Elektronen-Beugungsdiagramm (oben links) zeigt starke Reflexe, die auf gedachten vertikalen Linien angeordnet sind. Jeweils zwischen diesen Linien erkennt man die schwachen aber scharfen Satellitenreflexe, die nicht auf vertikalen Linien liegen, sondern abwechselnd rechts und links von der Linie abweichen. Diese Abweichung ist typisch für ihren inkommensurablen Charakter. Näherungsweise wurden die Beugungsreflexe in einer Elementarzelle mit einer neunfachen Überstruktur entlang **b** indiziert. Das zentrale Hauptbild, das an ein Textilmuster erinnert, zeigt die mit einem hochauflösenden Elektronenmikroskop abgebildete Mikrostruktur des Minerals Wagnerit (Lazic et al., 2014). Der Ausschnitt rechts unten ist eine Vergrösserung des Musters mit Lage der Elementarzelle (Reproduced with permission of the International Union of Crystallography).

Während sich Quasikristalle auf intermetallische Legierungen zu beschränken scheinen, sind inkommensurabel modulierte Strukturen viel häufiger und treten z.B. auch als Übergangsphasen bei Hochtemperaturumwandlungen auf. Eine der ersten im Detail untersuchten inkommensurablen Strukturen war die des γ-Na_2CO_3 (de Wolff, 1974; van Aalst et al., 1976). Auch im Mineralreich sind inkommensurabel modulierte Strukturen relativ weit verbreitet. Da die Satellitenreflexe oft schwach sind, blieben sie lange in Röntgen-Beugungsexperimenten für die Strukturlösung unberücksichtigt, obwohl die Satelliten im Elektronen-Beugungsexperiment mit dem Transmissions-Elektronenmikroskop deutlich hervortreten.

Vertreter der Melilitgruppe, Fresnoit und Levyclaudit waren die ersten Mineralstrukturen, die als inkommensurabel verfeinert wurden (Bindi, 2008). Auch Wagnerit $(Mg,Fe)_2PO_4(F,OH)$, ein Phosphatmineral der Triplit-Triploidit Obergruppe (Chopin et al., 2014), besitzt eine inkommensurabel modulierte Struktur (Lazic et al., 2014). Die Modulation verändert sich in Wagnerit-Mischkristallen mit dem Einbau des grösseren Fe^{2+} anstelle des kleineren Mg. Man kann die beobachtete Modulation am einfachsten veranschaulichen, wenn man berücksichtigt, dass die Struktur durch den Fe für Mg Ersatz verspannt wird. Die Struktur gleicht diese Verspannung durch eine energetisch günstigere «Kräuselung» (Modulation) entlang einer kristallographischen Achse aus, so dass im Beugungsexperiment zusätzliche Satellitenreflexe auftreten. Im Falle des Wagnerits kann die Struktur auch näherungsweise kommensurabel (je nach Mg, Fe Substitution) mit unterschiedlichen Überstrukturen beschrieben werden (Chopin et al., 2014). Die kristallographische **b**-Achse nimmt dann vielfache Werte (2, 3, 5, 7, 9) der periodischen Basisstruktur an *(Abb. 51 und 52)*. Die nur näherungsweise korrekte Überstruktur besitzt den Vorteil, dass die Struktur in einem dreidimensionalen Model wiedergegeben werden kann.

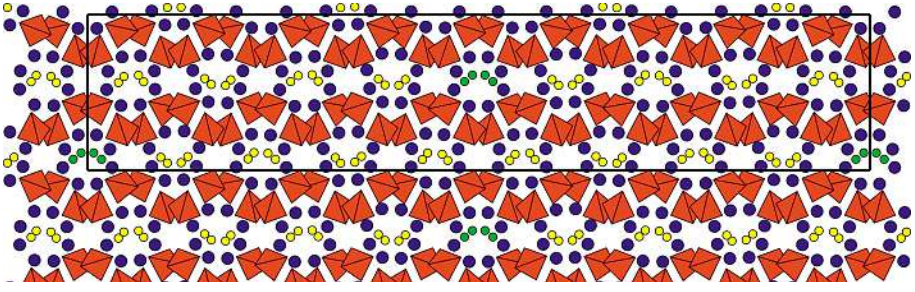


Abb 52: Schematische Darstellung der Wagneritstruktur $(Mg,Fe)_2PO_4(F,OH)$ mit einer neunfachen Überstruktur, die aus Röntgen-Einkristall-Beugungsdaten bestimmt wurde (Armbruster et al., 2008). Rote Tetraeder symbolisieren PO_4 Einheiten. Blaue Kreise kennzeichnen (Mg, Fe) Positionen, grüne und gelbe Kreise sind Fluorpositionen. Die Basisstruktur besitzt eine horizontale Translation, die dem Abstand zwischen den Ringen von blauen Kreisen entspricht. Die horizontale Modulation (Kräuselung) der Struktur ist besonders deutlich in der unterschiedlichen Orientierung der zu Halbkreisen angeordneten gelben/grünen Kreise zu sehen. Ausserdem sind die Ringe von blauen Kreisen leicht unterschiedlich nach oben bzw. unten verschoben.

Neue Kohlenstoffmodifikationen

Nur ein Jahr nach der Entdeckung der Quasikristalle durch Shechtman et al. (1984) kam es zu einer weiteren Zufallsentdeckung, die auf den ersten Blick eine gewisse Verwandtschaft zu den Quasikristallen aufweist. Bis dahin kannte man nur die unterschiedlichen Stapelvarianten des Graphits und Diamants als stabile kristalline Kohlenstoffmodifikationen. Als Kroto et al. (1985) Graphit mit einem Laser bestrahlten und verdampften, um die Existenz von langen Kohlenstoffketten im interstellaren Raum zu untersuchten, erhielten sie erstaunlich stabile Cluster der Zusammensetzung C_{60}, die sie nach ihrer Form als Buckminsterfullerene bezeichneten. Kroto, Curl und Smalley erhielten 1996 für ihren Beitrag zur Entdeckung dieser neuartigen Moleküle den Nobelpreis in Chemie.

Wenn man in einer Graphitstruktur, die nur aus Kohlenstoff 6-Ringen besteht, einige 5-Ringe einbaut, dann kommt es zu einer Wölbung der Schicht. Oder andersherum, eine Ebene lässt sich nicht lückenlos mit regulären Fünfecken und Sechsecken parkettieren. Mit zwölf regulären Fünfecken und 20 Sechsecken lässt sich aber ein Polyeder konstruieren, den wir als Fussball kennen. Wenn wir an jeder Ecke der Fünf- bzw. Sechsecke ein Kohlenstoffatom annehmen, erhalten wir die Molekularstruktur von C_{60} mit fünfzähliger Drehsymmetrie. In einem C_{60} Kristall stapeln sich die einzelnen C_{60} Moleküle, zusammengehalten über schwache van der Waals Kräfte, zu einer kubisch flächenzentrierten Anordnung *(Abb. 53)*. Dadurch geht die reguläre fünfzählige Molekülsymmetrie in der Kristallstruktur verloren. Der Name Buckminsterfulleren oder umgangssprachlich «Buckyball» stammt von dem futuristischen amerikanischen Designer Richard Buckminster Fuller (1895–1983), der eine C_{60} ähnliche Domstruktur konzipiert hatte.

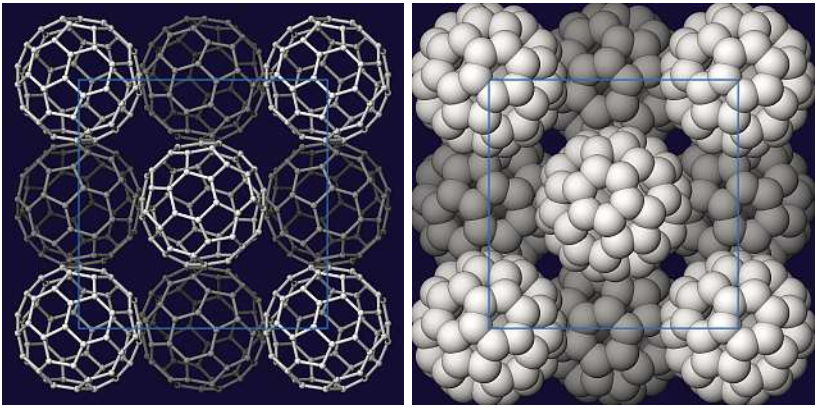
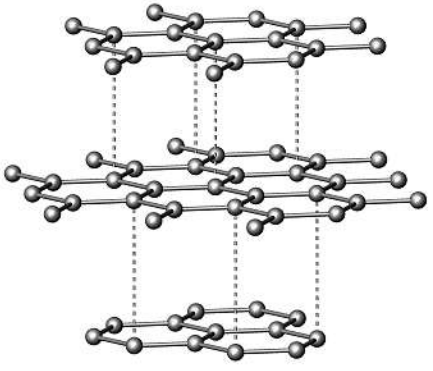


Abb. 53a,b: Kubisch flächenzentrierte Anordnung der «Buckyballs» in der Kristallstruktur des C_{60}. Bei Raumtemperatur sind die «Kugeln» durch Rotation um die 3-zähligen Achsen ungeordnet und nehmen unterhalb 249 K eine geordnete Anordnung mit optimierten intermolekularen Wechselwirkungen an (David et al., 1991). Links: Bindungsmodell der geordneten Tieftemperaturmodifikation von C_{60}; rechts: entsprechendes Raumfüllungsmodell.

Die C_{60} Molekularstruktur wurde bereits vor der Entdeckung durch Kroto et al. (1985) von Osawa (1970) vorhergesagt, aber die japanische Publikation fand keine internationale Beachtung. Ähnlich erging es Bochvar & Galpern (1973), die in einer auf Russisch publizierten Untersuchung die quantenchemische Stabilität und elektronische Struktur von C_{60} bestimmten. Neben den als erste beschriebenen «Buckyballs» mit C_{60} Zusammensetzung kennt man heute kugelförmige Kohlenstoffmoleküle beliebiger Grösse, Kohlenstoffröhren (zylindrische Fullerene) und Polymere. Es hat sich eine regelrechte Fullerenchemie entwickelt. Auch Atome können in die Kohlenstoffkäfige eingebaut werden, um in dieser Umgebung unter unterschiedlichen Bedingungen untersucht zu werden. Die Anwendung von Fullerenen ist insbesondere im biomedizinischen Bereich äusserst vielseitig: z. B. im Bereich Gen- und Medikamentenabgabe sowie für die fotodynamische Therapie von Tumorzellen.

2011 erhielten Geim und Novoselov aus Manchester den Nobelpreis in Physik für bahnbrechende Experimente am zweidimensionalen Material «Graphen». Geim (2009) definierte freistehendes oder isoliertes Graphen als eine einzelne atomare Schicht von Graphit *(Abb. 54)*, die ausreichend von ihrer Umgebung abgetrennt ist, um als freistehend zu gelten. Geim & Novoselov (2007) separierten mit einem Klebeband («Scotch Tape») eine monomolekulare Schicht von Graphit und hafteten sie auf die SiO_2-Oberfläche eines Silizium-Mikroplättchens. Die SiO_2 Unterlage isolierte die Graphenschicht vom Silizium, während der Siliziumchip als Elektrode verwendet werden konnte, um unterschiedliche Ladungsdichten auf der Graphenoberfläche zu erzeugen. Elektronische und materialwissenschaftliche Anwendungen sind offensichtlich.



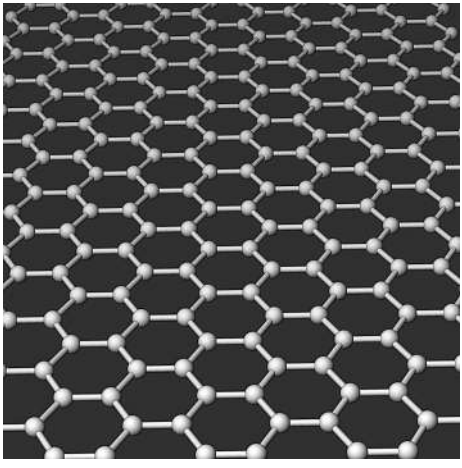


Abb. 54a: Links – Schichtstruktur des Graphits mit starken C-C Bindungen innerhalb der Schichten und weichen Bindungen (gestrichelt) zwischen den Schichten. *Abb. 54b:* Rechts – isolierte Schicht im Graphen.

Mechanisch ist Graphen etwa 100-mal stärker als der stärkste Stahl mit der entsprechenden Dicke einer monoatomaren Graphenschicht (3.35 Å). Graphen besitzt gute Strom- und Wärmeleitfähigkeit und ist fast durchsichtig. Schon 2014 wurde der weltweite Markt für Graphen auf 9 Millionen US Dollar geschätzt, mit den höchsten Umsätzen im Bereich Halbleitertechnologie, Elektronik, Batterien und Verbundwerkstoffe. Karbonfasern, die in ihrer reinen Form etwa seit den 1960er Jahren z. B. für Verbundwerkstoffe produziert werden, bestehen dagegen aus Graphit, wobei die Schichten parallel zum Faserverlauf ausgerichtet sind.

Heute: Besser, schneller, kleiner

Im Laufschritt der technischen Entwicklungen veränderten sich auch die Möglichkeiten für Beugungsexperimente. Grosse Forschungszentren wurden gebaut, die mit Hilfe eines Synchrotrons oder Röntgenlasers Röntgenstrahlen ungeahnter Brillanz und Qualität für Experimente zur Verfügung stellen können (z. B. Feldhaus et al., 2005; Margaritondo & Ribic, 2011). Auch die für Beugungsexperimente ausgerichteten Neutronenquellen wurden kontinuierlich aufgerüstet (z. B. Shull, 1995). Nicht nur bessere und schnellere Messungen an immer kleineren Proben sind möglich, sondern auch bisher kaum vorstellbare neue Anwendungen können verwirklicht werden.

Auch im Bereich der experimentellen Untersuchungsmöglichkeiten auf dem Beugungssektor in unseren universitären Forschungsinstituten ist die technische Entwicklung offensichtlich. Vor 40 Jahren hat ein Röntgen-Einkristalldiffraktometer mit den notwendigen Steuerungs- und Berechnungscomputern einen ganzen Raum in Anspruch genommen. Eine Messung an einem Kristall dauerte mit einem Punktzähler oft mehrere Wochen, und es war vernünftig, viel Zeit in Anspruch zu nehmen, um den optimalen Kristall auszuwählen und mit fotografischen Filmmethoden zuvor Kristallqualität und Symmetrie zu bestimmen. Zu dieser Zeit war eine Kristallstrukturanalyse eine anspruchsvolle, zeitintensive und oft auch handwerklich und intellektuell herausfordernde Tätigkeit. Neue kompakte «Mikro-source» Röntgenquellen arbeiten mit viel geringeren Leistungen, erreichen aber durch Fokussierung höhere Strahlungsintensitäten auf einem Mikrokristall. Die gross dimensionierten Hochspannungsgeneratoren der klassischen Röntgenröhren entfallen und die Notwendigkeit der Kühlung wird reduziert. Auch auf der Detektorseite hat sich einiges geändert. Verschiedene Typen von Flächenzählern (z. B. CCD) erlauben eine gleichzeitige Messung einer Vielzahl von Beugungsreflexen. Selbstverständlich ist auch diese Technik erst mit einer Verbesserung der neuen Computersysteme in Leistung, Geschwindigkeit und Speicherkapazität möglich geworden. Eine Messung, die vor 40 Jahren einen Monat dauerte, ist heute in einem Tag erledigt. Viel kleinere Kristalle können heute untersucht werden. Es gilt die Faustregel:

«Alles, was man als Einkristall auf einer Nadel fixieren kann, kann auch gemessen werden.»

Auch Messungen von Kristallaggregaten sind möglich. Mit anderen Worten, Kristalle im Bereich zwischen 0.001 und 0.01 mm eröffnen die Möglichkeit einer Strukturuntersuchung. Wenn noch kleinere Partikel untersucht werden müssen (z. B. im nm = 10^{-6} mm Bereich), bieten z. B. die Elektronen-Beugungs-Tomographie (Mugnaioli, 2016) oder die Kombination von Röntgen-Pulverbeugung, Elektronenbeugung und hochauflösender Transmissions-Elektronen-mikroskopie (Baerlocher & McCusker, 2012) interessante Alternativen zur konventionellen Strukturlösung.

Heute stehen auch kleinste Desktop Röntgen-Pulverdiffraktometer von verschiedensten Herstellern zur Verfügung, die eine einwandfreie Identifizierung und Quantifizierung von Pulverdiffraktogrammen ermöglichen. Die Miniaturisierung geht weiter!

Mineralogie wird extraterrestrisch: Röntgenexperimente auf dem Mars

Am 26.11.2011 startete MSL (Mars Science Laboratory) an Bord einer AtlasV Rakete von Cape Canaveral. Am 6.7.2012 landete MSL auf dem Mars und setzte den Rover Curiosity (Neugier) aus, der u.a. röntgenographische Analysen der Marsoberfläche durchführte. An Bord des Marsgefährts befand sich ein Instrument, das nach seinem Verwendungszweck CheMin genannt wurde.

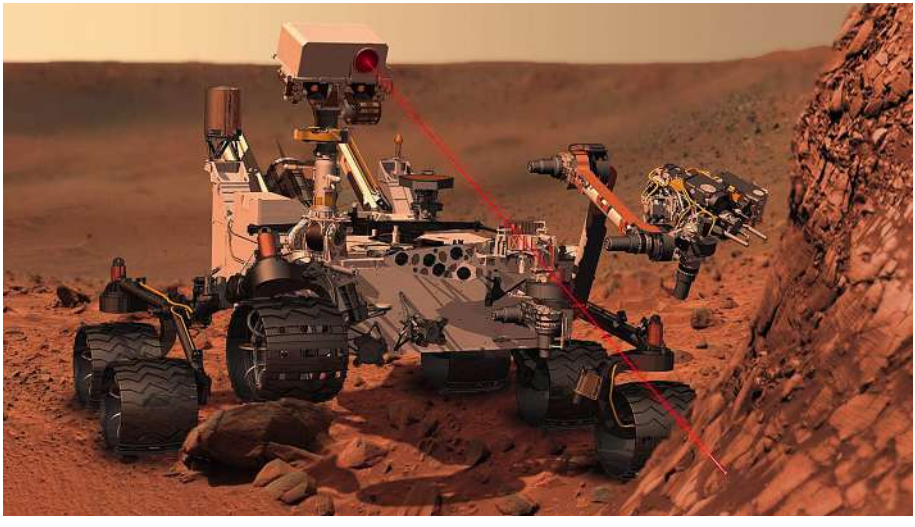


Abb. 55: Künstlerische Darstellung des Rovers Curiosity bei Gesteinsmessungen auf dem Mars (NASA).

CheMin hat die Form eines 25 cm Kantenlänge Würfels und wiegt ca. 10 kg (Blake et al., 2012). Es besteht aus einem Röntgen-Pulverdiffraktometer mit der Möglichkeit einer gleichzeitigen chemischen Analyse über Messung eines Rönt-

gen-Fluoresenzspektrums. Mit einer Bohrmaschine entnommenes Gesteinspulver wird durch ein vibrierendes Trichtersystem von aussen in die scheibenförmigen Messzellen von CheMin geleitet. Eine Mikrofokus Co Röntgenquelle durchstrahlt gepulverte Mars-Gesteinsproben in der Wechselzelle. Das Beugungsbild und auch das energiedispersive analytische Spektrum werden mit einem CCD Flächendetektor aufgenommen. Die Rohdaten werden bereits im Rover reduziert und dann zur Analyse auf die Erde gesendet. Eine einzelne Analyse auf dem Mars dauerte bis zu 40 Stunden.

CheMin analysierte auf dem Mars bisher fünf Proben (Downs et al., 2015). Die erste Messung fand am Landungsort Rocknest statt, wo eine windtransportierte Staubschicht analysiert wurde. Eine Abschätzung des Röntgendiagramms ergab, dass zwischen 13–40 Gew. % nichtkristalline Phasen (Glas) vorliegen. Die kristallinen Phasen bestanden vor allem aus Feldspat (41 %), Pyroxen (28 %) und Olivin (22 %). Somit besass der Staub eine erstaunliche Ähnlichkeit zu den basaltischen Verwitterungsböden auf dem Mauna Kea (Hawaii).

An der Lokalität Yellowknife Bay wurden zwei Proben aus einem Tonstein 450 m östlich der Landungsstelle erbohrt. Der Tonstein enthält signifikante Mengen an Tonmineralien (saponitischer Smektit) und Magnetit. Zusätzlicher Pyroxen, Feldspat und Olivin haben eine ähnliche Zusammensetzung wie in der windtransportierten Staubschicht. Geringe Konzentrationen von Ca-Sulfaten (Bassanit und Anhydrit) sowie Pyrrhotin (Magnetkies) vervollständigen die Analyse. Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit einem Ablagerungsmilieu in einem Süsswassersee mit fast neutralem pH, mit geringer Salinität, aber variablem RedOx Potential. Auch dieses Marsgestein hat ein fast entsprechendes Analogon auf der Erde: Die Sheepbed Tonsteine am Griffith Park in der Nähe von Los Angeles sind ebenfalls Fe-reich und mit Basalten vergesellschaftet.

Die Analyse Windjana erfolgte an einem Sandstein mit folgenden Hauptbestandteilen: 21 Gew. % Augit (Klinopyroxen), 15 % monokliner Sanidin oder Orthoklas (Feldspat), 12 % Pigeonit (Klinopyroxen), 10 % Magnetit, 8 % Tonmineralien und 20 % nichtkristalline Komponenten. Der relative hohe Anteil an feinkristallinen Tonmineralien könnte anzeigen, dass der grobkristalline Sandstein nachträglich in wässrigem Milieu umgewandelt wurde.

Eine weitere Bohrkampagne folgte im September 2014 an der Lokalität Confidence Hills (Rampe et al., 2015; Cavanagh et al. 2015), wo eine 12 m dicke Schicht von Sedimenten untersucht wurde. Die Mineralogie des Gesteins zeigt verschiedene wichtige Besonderheiten: (1) Die Konzentration an Hämatit übertrifft die an Magnetit, (2) ein nicht genauer spezifizierbares 10 Å Schichtsilikat wurde gefunden, (3) verschiedene Feldspäte wurden analysiert: Plagioklase und Alkalifeldspäte, (4) Olivin, Ortho- und Klinopyroxene haben eine Zusammensetzung, die einem Basalt entspricht und (5) sulfatische Nebenbestandteile (z. B. Jarosit) wurden entdeckt. Die Anwesenheit von Jarosit $KFe_3^{3+}[(OH)_6|(SO_4)_2]$ deutet auf eine Umwandlung der Sedimente durch Schwefelsäure hin. Entsprechende Beobachtungen konnten an den bisher untersuchten Tonsteinen auf dem Mars nicht gemacht werden.

… und was bringt die Zukunft?

Diese Frage wurde mehrfach als Diskussionsbeitrag zu meinen Vorträgen über das Thema dieses Artikels gestellt. Leider besitze ich nicht die nötige visionäre Fähigkeit, um diesen Aspekt befriedigend beantworten zu können. Als Beispiele für mein Unvermögen, Dinge korrekt vorherzusagen, sollen folgende Fehleinschätzungen gelten: Als junger Wissenschaftler war ich so durch das Paradigma der Periodizität beim Aufbau eines Kristalls geprägt, dass ich in Ermanglung des notwendigen Hintergrundwissens sicherlich Linus Pauling in seinem Skeptizismus gegenüber Quasikristallen unterstützt hätte. Als junger Wissenschaftler hatte mir mein Bauchgefühl gesagt, dass es auf dem Mars nie Wasser gab. Vielleicht war ich durch eine unbewusste religiöse Indoktrinierung im Glauben an das Einzigartige auf unserer Erde so verblendet, dass die wissenschaftliche Vernunft ausgeschaltet wurde. Noch vor zwanzig Jahren hätte ich es als äusserst unwahrscheinlich eingeschätzt, dass 2012 in situ Röntgenanalysen auf dem Mars durchgeführt werden können. Von so einer Person verlangen sie einen aussagekräftigen Blick in die Zukunft?

Allerdings, nachdem in der Vergangenheit zahlreiche Grundregeln zum Aufbau der Kristalle und seiner Komponenten durch Experimente aufgestellt und auch mit einem theoretischen Korsett versehen wurden, ist es mehr als verständlich, diese Informationen zu sammeln, in eine Computersprache umzusetzen und für Vorhersagen zu nutzen. Strukturmodellierung wird künftig in seiner Bedeutung die experimentelle Strukturaufklärung übertreffen. Die stetige Verbesserung der Computertechnologie wird die Basis liefern. Ich erinnere mich, dass schon vor Jahren ein Strukturmodellierer proklamiert hat:

«*Man gebe mir eine chemische Zusammensetzung und ich berechne die Kristallstruktur unter jedem Druck und Temperatur.*»

Das wäre grossartig und bewundernswert! Wenn aber dadurch experimentelles Arbeiten so stark eingeschränkt würde, dass keine neuen Regeln gefunden werden können, wäre dies ein Rückschritt. Modellierung ist im Prinzip eine Reproduktion bekannten Wissens auf ein neues Beispiel.

Auffallend in der Gegenwart ist die Tendenz, dass naturwissenschaftliche Forschung auch im universitären Rahmen zunehmend irgendwie nützlich für die Gesellschaft sein muss, um finanziell gefördert zu werden. Immer häufiger wird die Frage gestellt, für was man «das» brauchen kann. Es wird scheinbar vergessen, dass viele grosse Entdeckungen Zufallsprodukte waren (Röntgenstrahlen, Quasikristalle und Fullerene) und dass die Frage nach dem wie und warum gerade in den Naturwissenschaften ein Kulturgut ist, unabhängig wie nutzbringend die Fragestellung auch sein mag. Wenn sich dieser Trend in der Zukunft fortsetzt, halte ich auch dies für einen gravierenden Rückschritt.

Dank

Meinen ehemaligen Kollegen und Mitarbeitern Jürg Hauser, Martin Fisch, Nicola Döbelin und Remo Widmer danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Olaf Medenbach (Witten) unterstützte mich durch seine freizügige Zurverfügungstellung von Abbildungen und Einblick in die Funktionsweise historischer optischer Instrumente. Bei Thomas Burri bedanke ich mich für die Einladung, mein Vortragsthema hier in gedruckter Form vorlegen zu dürfen, und für wertvolle Anregungen, das teilweise anspruchsvolle Thema für Laien verständlich darzustellen. Zahlreiche Hörer meiner ursprünglichen Präsentation haben wesentliche Diskussionsbeiträge oder Fragen geliefert, die in der vorliegenden Version berücksichtigt wurden, und die zur Vervollständigung und Attraktivität dieses Artikels beigetragen haben.

Referenzen

Armbruster, T., Chopin, C., Grew, E. S., Baronnet, A. (2008): The triplite-wagnerite group: A modulated series. Geochim. Cosmochim. Acta, 72(12), A32.

Astbury, W. T. & Yardley, K. (1924): Tabulated data for the examination of the 230 space groups by homogeneous X-rays. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A224, 221–257.

Baerlocher, C. & McCusker, L. B. (2012): Combination of X-ray powder diffraction, electron diffraction and HRTEM data. In: Uniting Electron Crystallography and Powder Diffraction; NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics; Ed.: Kolb, U. et al., Springer Media, Dordrecht, 303–314.

Bannister, F. A. (1937): The discovery of braggite. Z. Kristallogr., 96, 201–202.

Barlow, W. (1894): Ueber die geometrischen Eigenschaften homogener starrer Structuren und ihre Anwendung auf Krystalle. Z. Kristallogr., 23, 1–63.

Barlow, W. (1896): Nachtrag zu den Tabellen homogener Structuren und Bemerkungen zu E. von Fedorow's Abhandlung über regelmässige Punktsysteme. Z. Kristallogr., 25, 86–91.

Bartholin, E. (1669): Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira et insolita refractio detegitur, Copenhagen.

Beckmann, J. (1780): Beyträge zur Geschichte der Erfindungen. Verlag P. G. Kummer, Leipzig, 577 S.

Bergman, T. (1773): De formis crystallorum, praesertim e spatho ortis. Nov. Act. Reg. Soc. Sc. Ups., Vol. 1, 150–155.

Berzelius, J. J. (1815): Versuch durch Anwendung der electrisch chemischen Theorie und der chemischen Verhältnisslehre ein rein wissenschaftliches System der Mineralogie zu begründen. Gehlen, A. F. Übersetzung aus dem Schwedischen, Schrag, Nürnberg, 86 S.

Bindi, L. (2008): When minerals become complex: an elementary introduction. Rend. Lincei, 19, 1 – 16.

Bindi, L. & Steinhardt, P. J. (2016): Natural quasicrystals: A new frontier in mineralogy and its impact on our understanding of matter and the origin of the solar system. In: Highlights in Mineralogical Crystallography, Ed.: Armbruster, T. & Danisi, R. M., Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 109–125.

Bindi, L., Steinhardt, P. J., Yao, N., Lu, P. J. (2011): Icosahedrite, $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$, the first natural quasicrystal. Am. Miner., 96, 928–931.

Bindi, L., Yao, N., Lin, C., Hollister, L. S., Andronicos, C. L., Distler, V. V., Eddy, M. P., Kostin, A., Kryachko, V., Macpherson, G. J., Steinhardt, W. M., Yudovskaya, M., Steinhardt, P. J. (2015): Decagonite, $Al_{71}Ni_{24}Fe_5$, a quasicrystal with decagonal symmetry from the Khatyrka CV3 carbonaceous chondrite. Am. Miner., 100, 2340–2343.

Black, G. F. (1918): An outline of the life of Réne Just Haüy. Am. Miner., 3, 90–91.

Blake, D. and MSL Science Team (2012): Characterization and calibration of the CheMin mineralogical instrument on Mars Science Laboratory. Space. Sci. Rev., 170, 341–399.

Bochvar, D. A. & Galpern, E. G. (1973): On hypothetical systems: carbon dodecahedron, s-icosahedron and carbon-s-icosahedron. Dokl. Acad. Nauk SSSR, 209, 610–612 (in Russ).

Bragg, W. H. & Bragg W. L. (1913): The structure of diamond. Proc. Roy. Soc. Lond., 89, 277–291.

Bragg, W. L. (1913): The Structure of some crystals as indicated by their diffraction of X-rays. Proc. Roy. Soc. Lond., 89, 248–277.

Bragg, W. L. (1937): Atomic Structure of Minerals. Oxford University Press, London, 292 S.

Bragg, W. L. & Perutz, M. F. (1954): The structure of haemoglobin: Fourier projections on the 010 plane. Proc. Roy. Soc. Lond., A225, 315–329

Bragg, W. L. & West, J. (1926): The structure of beryl, $Be_3Al_2Si_6O_{18}$. Proc. Roy. Soc. Lond., A111, 691–714.

Bravais, A. (1850): Mémoire sur les systèmes formés par les points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace. J. Ecole Polytech., 19, 1–128. (English translation: Memoir 1, Crystallographic Society of America, New York, 1949.)

Brewster, D. (1818): On the laws of polarisation and double refraction in regularly crystallised bodies. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 108, 199–273.

Brewster, D. (1817–1820): On the connection between the primitive forms of crystals, and the number of their axes of double refraction. Mem. Wernerian Nat. Hist. Soc., 3, 50–74.

Bruun-Neergard, T. C. (1807): Ueber den Haüyn (la Haüyne), eine neue mineralische Substanz. J. Chem. Phys., 4, 417–429

Burckhardt, J. J. (1984): Die Entdeckung der 32 Kristallklassen durch M. L. Frankenheim im Jahre 1826. N. Jb. Miner. Mh., 1984, 481–482.

Caley, E. R. & Richards, J. F. C. (1956): Theophrastus on Stones: Introduction, Greek Text, English Translation, and Commentary. Ohio State University, Columbus, 238 S.

Cavanagh, P. D. et al. (2015): Confidence Hills mineralogy and CheMin results from base of Mt. Sharp, Pahrump Hills, Gale Crater Mars. 46th Lunar and Planetary Science Conference (2015), Woodlands, Texas, 2735.

Chapuis, G. & Arakcheeva, A. (2013): The aperiodic nature of incommensurately modulated structures. Rend. Lincei, 24, Suppl. 1, 77–84.

Chopin, C., Armbruster, T., Grew, E. S., Baronnet, A., Leyx, C., Medenbach, O. (2014): The triplite–triploidite supergroup: structural modulation in wagnerite, discreditation of magniotriplite, and the new mineral hydroxylwagnerite. Eur. J. Mineral., 26, 553 – 565.

Cochran, W., Crick, F. H. C., Vand, V. (1952): The structure of synthetic polypeptides. I. The transform of atoms on a helix. Acta Cryst., 5, 581–586.

David, W. I. F., Ibberson, R. M., Matthewman, J. C., Prassides, K., Dennis, T. J. S., Hare, J. P., Kroto, H. W., Taylor, R. , Walton, D. R. M. (1991): Crystal structure and bonding of ordered C_{60}. Nature, 353, 147–149.

Denso, J. D. (1765): Uebersetzung: Plinius Naturgeschichte, Band 2, Buchhandlung A. F. Rösens, Rostock und Greifswald, 860 S.

De Wolff, P. M. D. (1974): The pseudo-symmetry of modulated crystal structures. Acta Cryst., A30, 777–785.

De Wolff, P. M. D. & van Aalst, W. (1972): The four dimensional group of γ-Na_2CO_3. Abstract X-4, IUCr conference in Kyoto, Japan. Acta Cryst., A28(S4), 111.

Dickinson, R. G. & Pauling, L. (1923): The crystal structure of molybdenite. J. Am. Chem. Soc., 45(6), 1466–1471.

Downs, R. T. and the MSL Science Team (2015): Determining mineralogy on Mars with the CheMin X-ray diffractometer. Elements, 11, February, 45–50.

Dubois, J. M. (2012): Properties and applications of quasicrystals and complex metallic alloys. Chem. Soc. Rev., 41, 6760–6777.

Dunitz, J. D. (1997): Linus Carl Pauling 1901–1994: A Biographical Memoir. National Academies Press, Washington D.C., 220–261.

Editorial (2013): Due credit. Nature, 496, 18. April, 270.

Engel, P. (1989): Memorial of Werner Nowacki March 14, 1909 – March 31, 1988. Am. Miner., 74, 1394–1396.

Erny, R. & Favre-Nicolin, V. (2007): Direct space methods of structure determination from powder diffraction: principles, guidelines and perspectives. Z. Kristallogr., 222, 105–113.

Evans, H. T. Jr. (1973): The crystal structures of cavansite and pentagonite. Am. Miner., 58, 412–424.

Ewald, P. P. (1962): Laue's discovery of X-ray diffraction by crystals. In: P. P. Ewald, ed., Fifty Years of X-ray Diffraction, International Union of Crystallography, Utrecht, Nederland, 31–56.

Fedorov, E. S. (1885): The Elements of the Study of Configurations. Zap. Imp. S.-Peterburgsk. Mineral. Obshch., Ser. 2, 21, 240 S. (in Russ.).

Fedorov, E. S. (1891a): The symmetry of regular systems of figures. Zap. Imp. S.-Peterburgsk. Mineral. Obshch., Ser.2, 28, 1–146 (in Russ.). English translation: D. and K. Harker (1971) Symmetry of Crystals, American Crystallographic Association Monograph No. 7, Bufallo, N.Y., 50–131.

Fedorov, E. S. (1891b): Symmetry in the plane. Zap. Imp. S.-Peterburgsk. Mineral. Obshch., Ser. 2, 28, 345–390 (in Russ.).

Fedorow, E. (1892): Zusammenstellung der krystallographischen Resultate des Herrn Schoenflies und der meinigen. Z. Kristallogr., 20, 25–75.

Fedorow, E. (1894a): Universal- (Theodolith-) Methode in der Mineralogie und Petrographie. Z. Kristallogr., 22, 229–268.
Fedorow, E. (1894b): Das Grundgesetz der Kristallographie. Z. Kristallogr., 23, 99–113.
Fedorow, E. (1895): Theorie der Krystallstructur, I. Teil. Z. Kristallogr., 24, 209–252.
Fedorow, E. (1896): Theorie der Krystallstructur, II. Teil. Z. Kristallogr., 25, 113–224.
Feldhaus, J., Arthur, J., Hastings, J. B. (2005): X-ray free-electron lasers. J. Phys., B38(9), 799–819.
Ferry, G. (1998): Dorothy Hodgkin: A Life. Granta, London, 432 S.
Frankenheim, M. L. (1826): Crystallonomische Aufsätze. ISIS oder Enzyklopädische Zeitung, 5 und 6, 497–515 und 542–565.
Franklin, R. E. & Gosling, R. G. (1953a): Molecular configuration in thymonucleate. Nature, 171, 740–741.
Franklin, R. E. & Gosling, R. G. (1953b): Evidence for 2-chain helix in crystalline structure of sodium deoxyribonucleate. Nature, 172, 156–157.
Gadolin, A. (1871): Mémoire sur la déduction d'un seul principe de tous les systémes cristallographiques avec leurs subdivisions. Acta Soc. Sci. Fenn., 9, 1–71.
Galiulin, R. V. (2003): To the 150th anniversary of the birth of Evgraf Stepanovich Fedorov (1853–1919): Irregularities in the fate of the theory of regularity. Crystallogr. Rep., 48(6), 899–913.
Garcke, H. (2012): Kepler, Kristalle und Computer. Mitt. Deutsch. Math. Verein., 20(4), 219–228.
Garner, J. (2014): Das Zinn der Bronzezeit in Mittelasien. II: Die montanarchäologischen Forschungen an den Zinnlagerstätten (Archäologie in Iran und Turan). Phillip von Zabern, Darmstadt, 494 S.
Geim, A.K. (2009): Graphene: Status and prospects. Science, 324, 1530–1534.
Geim, A. K. & Novoselov, K. S. (2007): The rise of graphene. Nature Mater., 6, 183–191.
Gerhard, C. A. (1781): Versuch einer Geschichte des Mineralreichs, Erster Theil. C. F. Himburg, Berlin, 302 S.
Gilder, J. & Gilder, A.-L. (2004): Heavenly Intrigue: Johannes Kepler, Tycho Brahe, and the Murder Behind One of History's Greatest Scientific Discoveries; Doubleday, New York, 320 S.
Goldschmidt, V., Palache, C., Peacock, M. (1931): Über Calaverit. N. Jb. Miner., 63, 1–58.
Grassmann, J. G. (1829): Zur physischen Krystallonomie und geometrischen Combinationslehre. Morin, Stettin, 1. Heft.
Gratacap, L. P. (1918): Haüy's Traité de Minéralogie. Am. Miner., 3, 100–125.
Green, D. W., Ingram, V. M., Perutz, M. F. (1954): The structure of haemoglobin. IV. Sign determination by the isomorphous replacement method. Proc. Roy. Soc. Lond. A225, No.1162, 287–307.
Grew, E. S., Locock, A. J., Mills, S J., Galuskina, I. O., Galuskin, E. V., Hålenius U. (2013): IMA Report: Nomenclature of the garnet supergroup. Am. Miner., 98, 785–811.
Grimm, U. (2015): Aperiodic crystals and beyond. Acta Cryst., B71, 258–274.
Guglielmini, D. (1707): De Salibus dissertatio epistolaris physico-medico-mechanica. Haaring, Leiden.
Hager, T. (1995): The Force of Nature: The Life of Linus Pauling, Simon and Schuster, 720 S.
Hager, T. (1998): Linus Pauling: And the Chemistry of Life (Oxford Portraits in Science), Oxford University Press, New York, Oxford, 144 S.
Hales, T. C. (2005): A proof of the Kepler conjecture. Ann. Math., 162, 1065–1185.
Hales, T. C. (2006): Historical overview of the Kepler conjecture. Discrete Comput. Geom., 36, 5–20.
Hargittai, I. (2011): «There is no such animal (וזכ היח ויא)»–Lessons of a discovery. Struct. Chem., 22, 745–748.
Haüy, R. J. (1801): Traité de Minéralogie. Conseil des Mines, Chez Louis, Paris, 4 Text- und ein Tafelband.
Henry, D. J., Novák, M., Hawthorne, F. C., Ertl, A., Dutrow, B. L., Uher, P., Pezzotta, F. (2011) Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. Am. Miner., 96, 895–913.
Hessel, C. (1830): Krystal. Johann Samuel Traugott Gehler's Physikalisches Wörterbuch. Bd. 5, Abtheilung 2; I bis K, E.B. Schwickert, Leipzig, 1023–1340.
Hessel, J. F. C. (1897): Krystallometrie oder Krystallonomie und Krystallographie, auf eigenthümliche Weise und mit Zugrundelegung neuer allgemeiner Lehren der reinen Gestaltenkunde, sowie mit vollständiger Berücksichtigung der wichtigsten Arbeiten und Methoden anderer Krystallographen

bearbeitet. 2 Bände Oswalds's Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 88 und 89, Wilhelm Engelmann, Leipzig, 165 und 192 S.

Huang, Y., Zhu, C., Wang, L., CaO, X., Su, Y., Jiang, X., Meng, S., Zhao, J., Zeng, X. C. (2016): A new phase diagram of water under negative pressure: The rise of the lowest-density clathrate s-III. Scie. Adv., 2, e1501010.

Huygens, C. (1690): Traité de la lumière. Gauthier-Villars, Ed. 1920, Paris, 155 S.

Huygens, C. (1890): Abhandlung über das Licht. Herausg: E. Lommel, W. Engelman Verlag, Leipzig, 114 S.

Jameson, R. (1820): A System of Mineralogy, in which Minerals are Arranged According to the Natural History Method. 3. Ed. Vol. 1, A. Constables & Co. Edinburgh, 405 S.

Janner, A. (1972): Symmetry groups of lattice vibrations. Abstract X-6, IUCr conference in Kyoto, Japan. Acta Cryst., A28(S4), 111.

Kahr, B. (2011): Et tu, crystallographer? Murder charges against close-packing pioneers evaluated. Cryst. Growth Des., 11, 4–11.

Kant, H. (2003): Roentgen, Wilhelm Conrad. Neue Deutsche Biographie, 21, 732–734.

Karsten, D. L. G. (1791): Tabellarische Übersicht der mineralogisch einfachen Fossilien, 2. Auflage (1792) H. A. Rottmann, Berlin, 35 S.

Kendrew, J. C., Bodo, G., Dintzis, H. M., Parrish, R. G., Wyckoff, H., Phillips, D. C. (1958): A three-dimensional model of the myoglobin molecule obtained by X-ray analysis. Nature, 181 (4610), 662–666.

König, R. & Hopp, J. (1994): Plinius, C. S. Naturalis Historiae, Libri XXXVII: Lateinisch-deutsch, Artemis & Winkler Verlag, Zürich, 260 S.

Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., Smalley, R. E. (1985): C_{60}: Buckminsterfullerene. Nature, 318, 162–163.

Kubbinga, H. (2012): Crystallography from Haüy to Laue: controversies on the molecular and atomistic nature of solids. Z. Kristallogr., 227, 1–26.

Kunz, G. F. (1918): The life and work of Haüy. Am. Miner., 3, 60–89.

Lazic, B., Armbruster, T., Chopin, C., Grew, E. S., Baronnet, A., Palatinus, L. (2014): Superspace description of wagnerite-group minerals $(Mg,Fe,Mn)_2(PO_4)(F,OH)$. Acta Cryst., B70, 243–258.

Leadbetter, A. J., Ward, R. C., Clark, J. W., Tucker, P. A., Matsuo, T., Suga, H. (1985): The equilibrium low-temperature structure of ice. J. Chem. Phys., 82(1), 424–428.

Leonhard, C. C., Kopp, J. H., Gaertner, C. L. (1817): Einleitung und Vorbereitung zur Mineralogie. J. C. Herrmannsche Buchhandlung, Frankfurt am Main, 315 S.

Levine, D. & Steinhardt, P. J. (1984): Quasicrystals: A new case of ordered structures. Phys. Rev. Lett. 53, 2477.

Lifshitz, R. (2007): What is a crystal. Z. Kristallogr. 222, 313–317.

Lonitzer, A. (1577): Kräuterbuch, Martin Lechler, Frankfurt.

Lonsdale, K. (1929): The structure of the benzene ring in hexamethylbenzene. Proc. Roy. Soc. Lond., A123, 494–515.

Lonsdale, K. (1931): An X-ray analysis of the structure of hexachlorobenzene, using the Fourier method. Proc. Roy. Soc. Lond., A133, 536–552.

Mackay, A. L. (1982): Crystallography and the Penrose pattern. Physica, A114, 609–613.

Margaritondo, G. & Ribic, P. R. (2011): A simplified description of X-ray free-electron lasers. J. Synchrotron Rad., 18, 101–108.

Meili, M. (2003a): Knapp am Nobelpreis vorbei: Signers DNA. Unipress, Universität Bern, Heft 14.

Meili, M. (2003b): Signer's gift- Rudolf Signer and DNA. Chimia, 57, 735–740.

Mitscherlich, E. (1821): Sur la relation qui existe entre les proportions chimiques et la forme cristalline. II. Mémoires sur les arséniates et les phosphates. Ann. Chim. Phys., 19, 350–419.

Mohs, F. (1822): Grundriss der Mineralogie. Erster Theil. Terminologie, Systematik, Nomenklatur, Charakteristik. Arnoldsche Buchhandlung, Dresden, 604 S.

Mohs, F. (1824): Grundriss der Mineralogie. Zweiter Theil. Physiographie. Arnoldsche Buchhandlung, Dresden, 730 S.

Morison, S. E. (1971): The European Discovery of America. The Northern Voyages A.D. 500–1600. Oxford University Press, New York, 712 S.

Moses, A. J. (1918): Haüy's law of rational intercepts. Am. Miner., 3, 32–33.

Mugnaioli, E. (2016): Investigation of bio-related minerals by electron-diffraction tomography: Vaterite, dental hydroxyapatite, and crystalline nanorods in sponge primmorphs. In: Highlights in Mineralogical Crystallography, Ed.: Armbruster, T. & Danisi, R. M., Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 149–167.

Naumann, C. F. (1824): Über plagiobasische Krystallsysteme. ISIS oder Enzyklopädische Zeitung, 9, 954–959.

Naumann, C. F. (1826): Grundriss der Krystallographie. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 408 S.

Németh, P., Garvie, L. A. J., Aoki, T., Dubrovinskaia, N., Dubrovinsky, L., Buseck, P. R. (2014): Lonsdaleite is faulted and twinned cubic diamond and does not exist as discrete material. Nature Comm., 5, 5447.

Neumann, F. E. (1823): Beiträge zur Krystallonomie. E. S. Mittler, Berlin-Posen, 152 S.

Osawa, E. (1970): Superaromaticity. Kagaku, 25, 854–863 (in Jap.).

Oszlányi, G. & Süt , A. (2004): Ab initio structure solution by charge flipping. Acta Cryst., A60, 134–141.

Pauling, L. (1929): The principles determining the structure of complex ionic crystals. J. Am. Chem. Soc., 51, 1010–1026.

Pauling, L. (1939): The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals. Cornell University Press, Ithaca, N.Y; H. Milford, Oxford University Press, London, 429 S.

Pauling, L. (1985): Apparent icosahedral symmetry is due to directed multiple twinning of cubic crystals. Nature, 317, 512–514.

Pauling, L. (1987): Evidence from X-ray and neutron powder diffraction patterns that the so-called icosahedral and decagonal quasicrystals of $MnAl_6$ and other alloys are twinned cubic crystals. Proc. Nat. Acad. Scie. 84(12), 3951–3953.

Pauling, L. & Corey, R. B. (1953): A Proposed structure for the nucleic acids. Proc. Nat. Acad. Scie., 39(2), 84–97.

Penrose, R. (1974): The role of aesthetics in pure and applied mathematical research. Bull. Inst. Math. Appl., 10, 266–271.

Pertlik, F. (1984): Kristallchemie natürlicher Telluride III: Die Kristallstruktur des Minerals Calaverit, $AuTe_2$. Z. Kristallogr., 169, 227–236.

Pertlik, F. (2006): Argumente für die Existenz eines diklinen Kristallsystems in der Fachliteratur des 19. Jahrhunderts. Ein Beitrag zur Geschichte der Kristallographie. Mitt. Österr. Miner. Ges., 152, 17–29.

Perutz, M. F. (1956): Isomorphous replacement and phase determination in non-centrosymmetric space groups. Acta Cryst., 9, 867–873.

Perutz, M. (1999): Ich hätte Sie schon früher ärgern sollen. Verlag Brüder Hollinek, Purkersdorf, Österreich, 316 S.

Pope, W. J. (1935): William Barlow 1845–1934. Obituary Notices of Fellows of the Royal Society 1(4), 367–370.

Rampe, E. P. et al. (2015): Mineralogy of the Pahrump Hills Region, Gale Crater, Mars. 25th Goldschmidt Conference, Prague, Czech Republic. Abstract 2875.

Rayner-Canham, M. & Rayner-Canham, G. (2008): Chemistry was their Life: Pioneer British Woman Chemists 1888–1949. Imperial College Press, 560 S.

Rhodes, D. (2012): Climbing mountains – A profile of Max Perutz 1914–2002: a life in science. EMBP Reports, 3(5), 393–395.

Robinson, L. (2015): A crystal clear vision: Celebrating the multi-faceted legacy of Kathleen Lonsdale. JOM, 67, 9–2.

Romé de L'Isle, J.-B. L. (1783): Cristallographie, ou description des formes propres à tous les corps du règne minéral, dans l'état de combinaison saline, pierreuse ou métallique. Imprimerie de Monsieur, Paris, 3 Textbände und ein Bildband, 626 S.

Röntgen, W. C. (1895): Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mitteilung. Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft Würzburg, 137–147.

Röntgen, W. C. (1896): Eine neue Art von Strahlen. 2. Mitteilung. Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft Würzburg, 11–17.

Röntgen, W. C. (1897): Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. Mathematische und Naturwissenschaftliche Mitteilungen aus den Sitzungsberichten der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Physikalisch-Mathematische Klasse, 392–406.

Schoenflies, A. (1891): Krystallsysteme und Krystallstruktur. Teubner Verlag, Leipzig, 638 S.

Schrauf, A. (1866): Lehrbuch der physikalischen Mineralogie, I. Band. W. Braumüller, Wien, 426 S.

Schutte, W. J. & de Boer, J. L (1988): Valence fluctuations in the incommensurately modulated structure of calaverite ($AuTe_2$):. Acta Cryst., B44, 486–494.

Shafranovskii, I. I. & Belov, N.V. (1962): E. S. Fedorov 1853–1919. In: P. P. Ewald, ed., Fifty Years of X-ray Diffraction, International Union of Crystallography, Utrecht, Nederland, 341–350.

Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., Cahn, J. W. (1984): Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. Phys. Rev. Lett., 53(20), 1951–1953.

Shull, C. G. (1995): Early development of neutron scattering. Rev. Mod. Phys., 67(4), 753–757.

Signer, E., Caspersson, F. T. Hammarsten, E. (1938): Molecular shape and size of thymonucleic acid. Nature, 141, 121.

Sohncke, L. (1876): Die unbegrenzten regelmässigen Punktsysteme als Grundlage einer Theorie der Krystallstructur. Verhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Karlsruhe, Heft 7, 83 S.

Staples, L. W., Evans, H. T. Jr., Lindsay, J. R. (1973): Cavansite and pentagonite, new dimorphous calcium vanadium silicate minerals from Oregon. Am. Miner., 58, 405–411.

Steurer, W. & Deloudi, S. (2007): Fascinating quasicrystals. Acta. Cryst., A64, 1–11.

Tunell, G. & Ksanda, C. J. (1935): The crystal structure of calaverite. J. Wash. Acad. Sci., 25, 32–33.

Tunell, G. & Pauling, L. (1952): The atomic arrangement and bonds of the gold-silver ditellurides. Acta Cryst., 5, 375–381.

Van Aalst, W., den Hollander, J., Peterse, W. J. A. M. & de Wolff, P. M. (1976): The modulated structure of γ-Na_2CO_3 in a harmonic approximation. Acta Cryst., B32, 47–58.

Watson, J. D. & Crick, F. H. C. (1953): Molecular structure of nucleic acids. Nature, 171, 737–738.

Weber, L. (1923): Die «Crystallographia» des Luzerner Arztes Dr. Moritz Anton Cappeler. Zum 200. Gedenktag der Herausgabe des Prodromus Crystallographiae. Schweiz. Miner. Petrog. Mitt., 3, 112–152.

Weber, P. X. (1915): Dr. Moritz Anton Kappeler, 1685—1769. Geschichtsfreund, Stans, 93 S.

Weiss, C. S. (1809): De indagando formarum crystallinarum charactere geometrico principali dissertatio. Lipsiae [Leipzig].

Weiss, C. S. (1815): Übersichtliche Darstellung der verschiedenen natürlichen Abtheilungen der Krystallisationssysteme. Abh. k. Akad. Wiss. Berlin, 1818, 290–336.

Werner, A. G. (1817): Abraham Gottlob Werner's letztes Mineralsystem. Freyberg, Wien, 58 S.

Werner, A. G. & Hoffmann, C. A. S. (1789): Mineralsystem des Herrn Inspektor Werners mit dessen Erlaubnis herausgegeben von C.A.S. Hoffmann. Bergmännisches Journal, Jg. 2, Bd. 1, 369–398.

Wewetzer, H. (2011): Revolution in der Kristallwelt. Der Tagesspiegel, 5. Oktober 2011.

Whewell, R. W. (1837): History of the Inductive Sciences, Vol. 3. J.W. Parker, London, 624 S.

Wilkins, M. H. F., Stokes, A. R., Wilson, H. R. (1953): Molecular structure of nucleic acids: Molecular structure of deoxypentose nucleic acids. Nature, 171, 738–740.

Wollaston, W. H. (1809): Description of a reflective goniometer. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 99, 253–258.

Wyckoff, D. (1967): English translation: Albertus Magnus, Book of Minerals. Clarendon Press, Oxford, 309 S.

Wyckoff, R. W. G. (1922): The Analytical Expression of the Results of the Theory of Space Groups. Carnegie Institution of Washington, 201 S.

Yen, F. & Chi, Z. H. (2015): Proton ordering dynamics of H_2O. Phys. Chem. Chem. Phys., 17, 12458–12461.

Victoria Matzka[1] & Markus Fiebig[2]

Gibt es Mittelmoränenablagerungen? – eine Literaturrecherche auf der Basis von Bildmaterial und eigenen Beobachtungen

Kurzfassung: Eine Mittelmoräne besteht aus Gesteinsschutt, der von einem Gletscher mitgeführt wird. Zumeist handelte es sich zuerst um Seitenmoränenmaterial, das beim Zusammenfluss zweier Gletscher in Mittelmoränenmaterial übergeht. Mittelmoränen sind normalerweise im Ablationsgebiet von Gletschern an der Eisoberfläche sichtbar. Um zu überprüfen, was aus Mittelmoränenmaterial im Bereich von Gletscherzungen wird, wurden Fotomaterial und historische Karten ausgewertet. Dabei wurde bestätigt, dass sich Mittelmoränen im Gletscherzungenbereich oft in Form von topographischen Rücken an der Gletscheroberfläche abzeichnen und dabei auch in ihrer Breite zunehmen. Das Mittelmoränenmaterial schützt unterlagerndes Eis vor Sonnenbestrahlung und verhindert dadurch das Abschmelzen. Es bilden sich Eiskerne in den Mittelmoränenrücken. Auf der Basis von Foto- und Literaturauswertungen kann eine typische Mächtigkeit des Mittelmoränenmaterials von 10 bis 15 cm bestätigt werden. Ebenfalls als zutreffend erweist sich aufgrund des analysierten Fotomaterials, dass der Schutt nicht bis an die Gletscherbasis reicht. Am direkten Übergang von Gletscherzungen ins Gletschervorfeld sind End- bzw. Seitenmoränenablagerungen, Schmelzwassersysteme oder Stauseen sowie Toteislöcher zu beobachten. Direkt und eindeutig von Mittelmoränen abgeleitete Ablagerungen konnten ausserhalb der Gletscherzungen bei der Fotorecherche nicht festgestellt werden. Es scheint normalerweise keine unmittelbare Erhaltung von Mittelmoränenmaterial stattzufinden. Vielmehr findet entweder eine Inkorporation von Mittelmoränenmaterial im Endmoränenkörper statt, oder es entwickeln sich typische glazifluviale Umlagerungen. Für kalte Gletscher sind im Rahmen der vorliegenden Recherche weder Mittelmoränen noch deren Ablagerungen beobachtet worden. Gletscher inpolaren Räumen, z.B. auf Spitzbergen, sind zumeist polythermal.

Abstract: A medial moraine consists of debris transported by a glacier. In the usual case, it forms where two glaciers merge and their lateral moraines develop into a medial moraine. Mostly medial moraines become visible on the ice surface in the ablation zone. In order to investigate their characteristics and further devel-opment and especially their behaviour at the glacier snout, photo material as well as histo-

[1] Dipl.-Ing. BSc MSc Victoria Matzka, Purkersdorf, A
[2] Prof. Dr. Markus Fiebig, Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien, A

rical maps are analysed and interpreted. It was confirmed, that this specific type of moraine develops a ridge and widens significantly down-glacier. As the debris protects the ice against the progressive ablation process, medial moraines are likely to develop an ice core. Photos of the glacier snout show that the debris-layer does not reach the glacier bed, however, the layer seems to be only 10 to 15 cm thick. The glacier foreland shows meltwater systems, lateral moraines and terminal moraines as well as kettle holes. The investigation of current glacier foreland does not show any depositional forms of medial moraines. Instead the material of medial moraines seems to become incorporated in the end moraines, or glacial fluvial sedimentation develops. This study does not reveal any medial moraines or forms of deposition for cold glaciers. Polar glaciers are in most cases polythermal.

Einleitung

Mittelmoränen sind eine spezielle Form von Oberflächenmoränen, die meist gut auf Gletscheroberflächen sichtbar sind. Nicht jeder Gletscher weist diese Moränenform auf. Ihre Entstehung beruht nach Agassiz (1841) auf dem Zusammenfluss zweier Gletscherzungen. Eyles und Rogerson (1978) sowie Benn und Evans (2010) differenzieren Mittelmoränen in Bezug auf ihren Entstehungsort und ihre Schuttherkunft. Interessant ist die Fragestellung, wie sich Mittelmoränen an der Gletscherfront verhalten. Einige aktuelle Publikationen (Wagner 1997, 2001, 2002, 2003, 2014) weisen darauf hin, dass aus Mittelmoränenmaterial direkt eigene geomorphologische Ablagerungsformen entstehen könnten. Basierend auf diesem Ansatz interpretierte Wagner (2001) eiszeitliche Grundmoränenablagerungen, Drumlins sowie Ufermoränen in Mittelmoränenablagerungen um und postulierte, dass Mittelmoränenmaterial eine direkte, dominante, landschaftsbildende Bedeutung hat. Während den Eiszeiten würden die Mittelmoränen der Vorlandgletscherzungen als Transportbänder fungieren und wesentliche Schuttvolumina ins Gletschervorfeld liefern. Dort würden sie punktförmig oder linienförmig in Fliessrichtung, als mächtige Gletscherschuttakkumulationen abgelagert und somit zu wichtigen geomorphologischen Körpern führen.

Diese Ansätze wurden in der Fachwelt kritisch aufgenommen (Graf et al. 2003). Die Ablehnung beruht u.a. darauf, dass in den genannten Publikationen von Wagner kein Hinweis auf rezent entstehende Mittelmoränenablagerungen zu finden ist (Burri, 2014).

Um diese Fragen der Ablagerungen von Mittelmoränenmaterial zu untersuchen, wurden rezente Gletscher aus geographisch und klimatisch unterschiedlichen Gebieten anhand von Bild- und Kartenmaterial analysiert. Besonderes Augenmerk wurde auf den Verlauf und den Verbleib des Mittelmoränenmaterials gelegt.

Grundlagen

Nach Agassiz (1841) entstehen sogenannte Mittelmoränen im Bereich des Zusammenflusses zweier Gletscherzungen. Dabei bildet sich aus zwei inneren Seitenmoränen in der Konfluenzzone eine gemeinsame Mittelmoräne. Diese Beobachtung wurde auch von Klebelsberg (1948) publiziert und eine Zunahme der Höhe von Mittelmoränenrücken gletscherabwärts konstatiert.

Eyles und Rogerson (1978) sowie Benn und Evans (2010) differenzieren Mittelmoränen aufgrund des Entstehungsortes relativ zur Schneegrenze sowie aufgrund der Schuttherkunft. Nach Benn und Evans (2010) können Mittelmoränen sowohl oberhalb als auch unterhalb von Firnlinien entstehen. Findet der Zusammenfluss von Gletscherzungen oberhalb der Firnlinie statt, ist die entsprechende Mittelmoräne aufgrund der Akkumulation von Niederschlag zunächst nicht an der Oberfläche sichtbar. Sie bildet sich erst unterhalb der Firnlinie durch die fortschreitende Ablation an der Gletscheroberfläche aus. Dies gilt auch für Material, das oberhalb der Firnlinie durch Steinschläge auf die Eisoberfläche gelangt (Gomez und Small, 1985). Mittelmoränen können auch unterhalb von Firnlinien durch den Zusammenfluss von zwei Gletscherzungen entstehen und sind dann gleich an der Gletscheroberfläche erkennbar.

In der Literatur (Z.B. Eyles und Rogerson, 1978, Gomez und Small, 1985) wird beschrieben, dass der Schutt der Mittelmoränen zwar im Gletschereis transportiert wird, jedoch nicht subglazialen Ursprungs ist. Grundmoränen können allerdings an Seitenmoränen angekleistert sein, stehen dann aber nicht mehr für den Transport in der Mittelmoräne zur Verfügung, da sie an der Seitenmoräne fixiert sind.

Viele Autoren (Klebelsberg, 1948; Gudmundsson et al., 1997; Bauder, 2001; Muskett et al., 2008; Bennett und Glasser, 2009) haben festgestellt, dass Mittelmoränen Eiskerne aufweisen und somit nicht zur Gänze aus Schutt bestehen. Die Schuttschicht schützt darunter liegendes Eis vor dem Abschmelzen und fördert so die Entstehung von Schuttrücken an der Gletscheroberfläche.

U.a. Anderson (2000) fügte die Beobachtung hinzu, dass Mittelmoränen sich gletscherabwärts deutlich verbreitern Durch das Abschmelzen des oberflächennahen Eises tritt eine Rückbildung ein, die zur seitlichen Verlagerung des Materials beiträgt.

Auch die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers beeinflusst das Aussehen von Mittelmoränen. Änderungen der Fliessgeschwindigkeiten führen zu stark deformierten und gestörten Mittelmoränenformen. Z.B. weist der Malaspina Gletschers in Alaska (USA) stark gefaltete Mittelmoränen auf. Die Formen werden im Zusammenhang mit sogenannten Surges erklärt (Post, 1969; Post, 1972; Muskett et al., 2008).

Untersuchungsmethode

Die Untersuchungsmethode beinhaltete die Analyse und Interpretation von Bild- und Kartenmaterial rezenter Gletscher sowieso die vereinzelte Betrachtung historischen Materials. Die historischen Daten dienten dazu, rezente und vergangene Gletscherstände vergleichen zu können. Dabei war es möglich den Verlauf von Mittelmoränen über einen längeren Zeitraum zu verfolgen. Das Bild- und Kartenmaterial wurde nach den folgenden Kriterien untersucht, analysiert und interpretiert:

- Entstehungsort von Mittelmoränen
- Verlauf von Mittelmoränen
- Zusammenhang zwischen Mittelmoränen und Fliessrichtung von Gletschern
- Störungen und Unregelmässigkeiten in Mittelmoränen
- Anzahl der Mittelmoränen pro Gletscher
- Gegebenenfalls Abstand zwischen den einzelnen Mittelmoränen
- Verbleib von Mittelmoränenmaterial an der Gletscherzunge
- Schuttbedeckung der Gletscherzunge im Bereich der Gletscherfront
- Mächtigkeit von Mittelmoränenmaterial im Bereich von Gletscherzungen
- Farbe von Mittelmoränenmaterial in Bezug zum Einzugsgebiet
- Charakterisierung der Ablagerungen im Gletschervorfeld.

Von diesen Untersuchungsparametern werden im folgenden Text nur die wichtigsten eingehend und anhand charakteristischer Beispiele diskutiert. Die vollständige Analyse findet sich in Matzka (2014).

Lage der untersuchten Gletscher

Die untersuchten Gletscher befinden sich in den europäischen Ost- und Westalpen, dem U.S Bundesstaat Alaska, in Kanada und auf Spitzbergen. Bei der Auswahl wurden auch polare Gletscher einbezogen, die sich heute in klimatischen Regionen befinden, die eiszeitlichen Verhältnissen in Mitteleuropa entsprechen könnten.

Die untersuchten Gletscher in den heutigen europäischen Ost- und Westalpen sind temperierte Talgletscher. Ihre Akkumulationsgebiete befinden sich teilweise noch oberhalb von Tälern, aber die Ablationsgebiete sind als Gletscherzungen komplett innerhalb von Tälern ausgeprägt. Die untersuchten Gletscher in Alaska und Kanada entsprechen ebenfalls dem Talgletschertyp, dehnen sich allerdings aufgrund ihrer grösseren Eisfracht und Einzugsgebietsfläche am Austritt in die Gebirgsvorländer zu flächenhaften Vorlandvergletscherungen, sogenannten Piedmont-Gletschern, aus. Malaspina und Bering Gletscher sind Beispiele dafür. Zwei der untersuchten Gletscher, bei denen es sich um polythermale oder temperierte Gletscher handelt, befinden sich nördlich des Polarkreises auf der norwegischen Inselgruppe Spitzbergen.

Als **«Kalte Gletscher»** werden alle Gletscher mit Temperaturen an der Eisbasis kleiner 0°C definiert. Dieser kälteste Gletschertyp auf der Erde ist bisher vergleichsweise wenig untersucht und kommt zumeist als recht dünne Gletscherzungen im Transantarktischen Gebirge bei Jahresdurchschnittstemperaturen unter –20° C vor. Kalte Gletscher könnten aber beispielsweise auf dem Mars eine grössere Verbreitung und Bedeutung haben. Kalte Gletscherzungen zeigen oft eine sehr steile Stirn (wie eine Klippe), sind an der Basis «trocken» und tendieren dazu den Untergrund glaziotektonisch zu deformieren. Zurückgelassene subglaziale «Kaltgletscher»-Sedimente enthalten weder zugeschliffene Komponenten noch Gletscherschrammen und liegen typischerweise im Verbund mit überlagernden äolischen Sanden vor. In «Kaltgletscher»-Ablagerungen dominiert die Sandfraktion, während die für temperierte Gletscherzungen typische Feinfraktion weitgehend fehlt. Damit unterscheiden sich kalte Gletscherzungen und ihre Ablagerungen grundlegend von den entsprechenden Sedimenten temperierter Gletscherzungen.

«Polythermale Gletscher» sind Mischtypen mit temperierten und kalten Gletscherbereichen. Sie kommen sowohl in alpinen als auch in polaren Gebieten der Erde vor und zeigen Charakteristika sowohl der warmen, sprich temperierten, als auch der kalten Gletscher. Die grössten Vergletscherungen auf der Erde, das antarktische und grönländische Inlandeis, sind trotz des extrem kalten polaren Klimas aufgrund des geothermischen Wärmeflusses polythermale Vergletscherungen. Polythermale Gletscher transportieren oft an ihrer Basis grosse Mengen an Gletscherschutt und können ausgedehnte subglaziale Seen überdecken. Während polare polythermale Gletscher oft an ihren Rändern kalt sind und im Zentrum Schmelzwasser an der Basis führen, weisen alpine polythermale Gletscher temperierte Zungen auf, kommen aber aus kalten Einzugsgebieten.

«Temperierte Gletscher» zeigen Temperaturen an der Gletscherbasis, die um 0°C liegen und flüssiges Schmelzwasser erlauben. Dieser sehr häufige, vergleichsweise gut untersuchte und wärmste Gletschertyp auf der Erde produziert typische Grund- und Endmoränenlandschaften mit gekritzten Geschieben, Gletscherschliffen und Grundmoränensedimenten. Durch den sogenannten lodgement-Prozess (= Ausschmelzen Korn für Korn) entstehen die schlechtsortierten, hochverdichteten Grundmoränensedimente. An der sehr wechselhaften, oft topographisch unregelmässigen Gletscherstirn tritt Schmelzwasser sowohl supraglazial als auch subglazial aus und sortiert zunehmend das schlecht sortierte primäre Moränenmaterial. Fein zermahlenes Gesteinsmehl in Schluffkorngrösse stammt weitgehend aus solchen temperierten Gletschern und findet sich auch in den äolischen Lössen und weltweit verblasenen Staubsedimenten der Erde.

Hambrey & Fitzsimons (2010): Development of sediment-landform associations at cold glacier margins, Dry Valleys, Antarctica. – Sedimentology 57: 857–882

Hambrey, M. & Glasser, N. (2012): Discriminating glacier thermal and dynamic regimes in the sedimentary record. – Sedimentary Geology 251–252: 1–33

www.antarcticglaciers.org/modern-glaciers/glacial-processes

Die Entwicklung von Gletschern in den europäischen Ost- und Westalpen ist vergleichsweise besser dokumentiert. Am Grossen Vernagtferner in Österreich hat beispielsweise die Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften sehr umfangreiches Datenmaterial inklusive Massenbilanz und Flächenausdehnungen über lange Zeiträume gesammelt (www.glaziologie.de). Auch einige schweizerische Gletscher sind sehr gut erforscht.

Bei den untersuchten Gletschern in den europäischen Ost- und Westalpen handelt es sich um den Grossen Aletschgletscher, den Unteraargletscher, den Gornergletscher, den Morteratsch- und den Persgletscher sowie den Haut Glacier d'Arolla in der Schweiz, die Pasterze und den Grossen Vernagtferner in Österreich sowie um das Mer de Glace und einen kleineren Moränenkomplex in Val Thorens in Frankreich.

Bei den temperierten Gletschern, die sich im US Bundesstaat Alaska sowie im Yukon in Kanada befinden, handelt es sich um den Bering Gletscher, die Malaspina Vorlandvergletscherung, den Yanert Gletscher, Muldrow Gletscher, Black Rapids Gletscher, Walsh Gletscher, Susitna Gletscher, Yentna Gletscher, Speel Gletscher und den Kaskawulsh Gletscher. (e.g. Clarke, 1991; Truffer et al., 1999).

Jene untersuchten Gletscher die sich auf Spitzbergen befinden sind der Kongsvegen und Kronebreen. Diese beiden Gletscher bilden eine gemeinsame kalbende Gletscherfront. Es handelt sich dabei um sogenannte polythermale Gletscher, die sowohl kalte als auch temperierte Eisabschnitte aufweisen (Woodward et al. 2002).

Untersuchung rezenter Mittelmoränen

Im Folgenden werden beispielhaft nur die Merkmale der Mittelmoränen des Grossen Aletschgletschers, der Pasterze und des Malaspina Gletschers beschrieben. Im Rahmen der Untersuchungen wurden aber alle zuvor aufgelisteten Gletscher genauer untersucht (Matzka, 2014).

Grosser Aletschgletscher

Der Grosse Aletschgletscher befindet sich am Südhang des Jungfraumassivs in den Berner Alpen und ist der grösste und längste Gletscher in den europäischen Alpen (Schweizerisches Gletschermessnetz, 1973).

Die Mittelmoränen des Grossen Aletschgletschers sind auffällige schwarze Schuttbänder. Sie bilden sich am Konkordiaplatz durch den Zusammenfluss der einzelnen Firnfelder des Aletschgletschers aus deren Seitenmoränen *(Abb. 1)*. Dabei entsteht am Fuss des Trugberges die sogenannte Trugbergmoräne und am Fuss des Kranzberges die Kranzbergmoräne. Wie *Abb. 1* zeigt, fliessen diese beiden Mittelmoränen in konstantem Abstand zueinander, der Fliessrichtung und Strömungsrichtung des Gletschers entsprechend talabwärts.

Abbildung 1: Zusammenfluss der Firnfelder des Grossen Aletschgletschers am Konkordiaplatz und die daraus resultierende Entstehung der beiden Mittelmoränen. Die Trugberg- und Kranzbergmoräne fliessen als dunkle Schuttbänder, gut an der Eisoberfläche erkennbar, talabwärts. (Foto aus Alean, 2004; bearbeitet)

Die orographisch rechte Moräne, die Kranzbergmoräne, bleibt bis zur Gletscherfront erhalten. Im Gegensatz dazu vereinigt sich die Trugbergmoräne mit der Seitenmoräne (Bachmann, 1978).

Die Kranzbergmoräne erreicht die Front und verbreitert sich deutlich gegen ihr Ende hin. Diese Eigenschaften entsprechen jenen bei Klebelsberg (1948) und Anderson (2000) beschriebenen Merkmalen von Mittelmoränen. Die Kranzbergmoräne verbreitet sich so sehr, dass ihr Schutt die Gletscherzunge an der Front nahezu komplett überdeckt.

Pasterze

Die Pasterze liegt am Fusse des Grossglockners in den Hohen Tauern in Österreich. Die Gletscherzunge der Pasterze befindet sich im Moment am Pasterzenboden und ist umgeben von sechs Einzugsgebieten, wobei vor allem das Teufelskampkees, das Glockenerkarkees, das Kellerbergkees und das Schwerteckkees zu nennen sind (Bachmann, 1978).

Die Pasterze bricht über den sogenannten Hufeisenbruch hinunter auf den Pasterzenboden. Das Eis wird bei der Überwindung der Geländestufe stark zerrissen. Die Länge der Gletscherzungen beträgt ca. 4 km (Karl Franzens Universität Graz – Institut für Geographie und Raumforschung, 2013a).

Die Gletscherzunge der Pasterze weist die Eigenart auf, dass sie aus einem schuttbedeckten und einem schuttfreien Teil besteht (Bachmann, 1978).

Nach Kellerer – Pirklbauer et al. (2008) beeinflusst die Schuttbedeckung die Ablation. Da sich die Albedo durch die Schuttbedeckung verändert, kann eine geringe Schuttschicht die Ablation und damit auch die Abschmelzrate erhöhen. Wenn die Schuttbedeckung von grösserer Mächtigkeit ist, wirkt sie als Schutz gegen die Sonneneinstrahlung und verringert die Ablation. Jener Teil der Gletscherzunge, der nicht von Schutt bedeckt ist, schmilzt seit den 1990er Jahren elfmal schneller ab als der schuttbedeckte Teil (Kellerer – Pirklbauer et al., 2008).

Die Mittelmoränen der Pasterze haben sich erst im Laufe der Jahre entwickelt. Dies ist einem Vergleich von Fotoaufnahmen aus unterschiedlichen Jahren zu entnehmen. Verglichen werden dabei Aufnahmen aus den Jahren 1971–2012

Abbildung 2: Die Pasterze im Jahr 1938 (oberes Bild) und 2003 (unteres Bild). Im Jahr 1938 ist die Fläche des schuttfreien Eisteiles noch deutlich grösser als im Jahr 2003. Auch die Mittelmoräne ist im Jahr 1938 noch nicht zu erkennen und wird erst in den folgenden Jahren auf der Eisoberfläche sichtbar (Zängl und Hamberger, 2004).

(Karl- Franzens- Universität Graz – Institut für Geographie und Raumforschung, 2013b), Aufnahmen vom 8. Juli 2013 (Matzka, 2014), sowie Fotos von 1938 und 2003 (Zängl und Hamberger, 2004).

Abb. 2 zeigt, dass im Jahr 1938 die Pasterze noch mit dem Glocknerkees zusammen hängt und die Mittelmoräne am Fusse des Felsbuckels, der zwischen dem Glocknerkees und der Pasterze aus dem Eis ragt, entsteht (Zängl und Hamberger, 2004). Im Jahr 2003 ist zu erkennen, dass dieser Felsbuckel frei von Eis dasteht. Nach Zängl und Hamberger (2004) sind die Mittelmoränen im Jahr 2003 gut zu erkennen. Aufgrund des Gletscherrückganges besteht der Zusammenhang zwischen Glocknerkees und Pasterze im Jahr 2003 nicht mehr.

Fotos von Zängl und Hamberger (2004) zeigen, dass die orographisch rechte Mittelmoräne im Jahr 1938 schon vorhanden war. In den folgenden Jahren ver-

Abbildung 3: Die Pasterze weist im Sommer 2013 einen schuttbedeckten und schuttfreien Teil auf. Die Mittelmoräne zieht sich bis an die Gletscherstirn. Links im Bild die NE-Wand des Grossglockners (Matzka, 2014)

einigt sie sich mit der Schuttbedeckung auf der orographisch rechten Gletscherseite. Die ca. 2000 m hohe Glockner Nordostwand liefert diese grossen Schuttmengen. Im Jahr 2003 ist diese Mittelmoräne nicht mehr von dem schuttbedeckten Gletscherteil zu unterscheiden.

Abb. 3 zeigt die Pasterze am Fusse des Grossglockners im Jahre 2013. Zu erkennen ist der orographisch rechte – schuttbedeckte Teil, die Mittelmoräne und der schuttfreie Eisteil.

Die Mittelmoräne der rezenten Gletscherzunge bleibt bis zur Gletscherfront erhalten und verbreitert sich gletscherabwärts *(Abb. 3)*.

Abb. 4 zeigt die Gletscherfront und bietet, da die Mittelmoräne im Schnitt dargestellt ist, einen guten Einblick in das Eisinnere. Die vergrösserte Aufnahme der Gletscherfront zeigt das Eisinnere sowie die Mittelmoräne im Schnitt. Das Material liegt der Eisoberfläche auf.

Abbildung 4: Das Foto zeigt die Gletscherfront im Sommer 2013. Gut erkennbar ist, dass der Schutt der Mittelmoräne auf der Eisoberfläche aufliegt (siehe Kreis) und sich im Eisinneren nicht Richtung Gletscherbasis fortsetzt. Die Mächtigkeit des Schuttes ist vergleichsweise gering und ermöglich kein grosses Transportvolumen durch die Mittelmoräne. Gut erkennbar ist auch die deutlich höhere Eismächtigkeit im schuttbedeckten Teil des Gletschers. (Matzka, 2014)

Diese Mittelmoräne ist also keine bis an die Eisbasis reichende Schuttakkumulation, sondern entspricht auch dem in der Literatur beschriebenen Eisrücken mit Schuttüberzug (Gudmundsson et al., 1997; Bauder, 2001; Bennett und Glasser, 2009).

Die orographisch rechte Mittelmoräne bleibt nicht bis zur Gletscherfront erhalten. Stattdessen endet sie im schuttbedeckten Gletscherteil. Sie ist deshalb nicht mehr als eigenständige Mittelmoräne zu erkennen. Der Vergleich von Fotomaterial aus dem Jahr 2003 mit 2013 zeigt, dass die orographisch rechte Mittelmoräne im Jahr 2003 noch deutlich länger als Mittelmoräne auf der Gletscherzunge erhalten gewesen ist. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Fläche des schuttbedeckten Gletscherteiles in den letzten Jahren zugenommen hat.

Das Gletschervorfeld der Pasterze ist gekennzeichnet durch Schmelzwasserkanäle und fluvial umgelagertem «ausgewaschenen» Moränenmaterial sowie Seesedimenten (Krainer und Poscher, 1992). Für Gletschervorfelder charakteristische Ablagerungen von Endmoränen finden im Moment im Gletschervorfeld der Pasterze nicht statt. Durch den fortschreitenden Eisrückgang in den letzten Jahrzehnten hat sich im Gletschervorfeld ein kleiner Sandersee gebildet. Als Folge ist auch

eine periglaziale Sanderfläche entstanden, die als Talsander bezeichnet wird (Krainer und Poscher, 1992).

Ein weiteres Charakteristikum für Gletschervorfelder ist das Auftreten von Toteislöchern. *Abb. 5* zeigt ein solches Toteisloch im Vorfeld der Pasterze.

Abbildung 5: Toteisloch im Gletschervorfeld der Pasterze im Juli 2013. (Matzka, 2014)

Malaspina Gletscher

Das Gletschersystem des Malaspina Gletschers befindet sich im U.S. Bundesstaat Alaska sowie in Yukon in Kanada (Muskett et al., 2008). Der Malaspina Gletscher bildet eine grosse Vorlandvergletscherung (Piedmont-Gletscher), deren Breite bis zu 65 km beträgt (Alean und Hambrey, 2013). Dem Gletschersystem sind unter anderem auch der Marvin, Agassiz, Hitchock und Lucia Gletscher zuzuordnen.

Abb. 6 zeigt schematische Darstellungen des Moränensystems der Vorlandvergletscherung. Links im Bild *(Abb. 6 Skizze a)* ist die Gletscherzunge des Agassiz Gletschers zu erkennen, während rechts in der Abbildung jene des Marvine Gletschers zu sehen ist.

Die Mittelmoränen zwischen den Gletscherzungen des Marvine und Malaspina Gletschers bilden sich durch den Zusammenfluss der Eisströme am Fusse der Samovar Hills. Diese Konfluenzzone ist auch durch eine flächenhafte Schuttbedeckung gekennzeichnet.

Gut erkennbar in *Abb. 6* sind die auffälligen Falten der Mittelmoränen. Nach Muskett et al. (2008) weisen auch diese Mittelmoränen Eiskerne auf. Das beobachtete schon Russell (1893), der nur eine Schuttschicht von wenigen Zentimetern beschreibt.

Auffällige Faltungen von Mittelmoränen zeigen auch nach Copland et al. (2003), dass es sich um einen Surge Gletscher handelt. Beim Malaspina Gletscher wurde ein grosser Surge in den Jahren 1999–2002 beobachtet (Muskett et al., 2008).

Um eine bessere Vorstellung von den einzelnen Mittelmoränenverläufen zu erhalten, wurden in *Abb. 6* einzelne Verläufe farblich hervorgehoben. In *Abb. 6* Skizze d. werden alle drei Verläufe (schwarz, rot, blau) dargestellt. Erkennbar ist

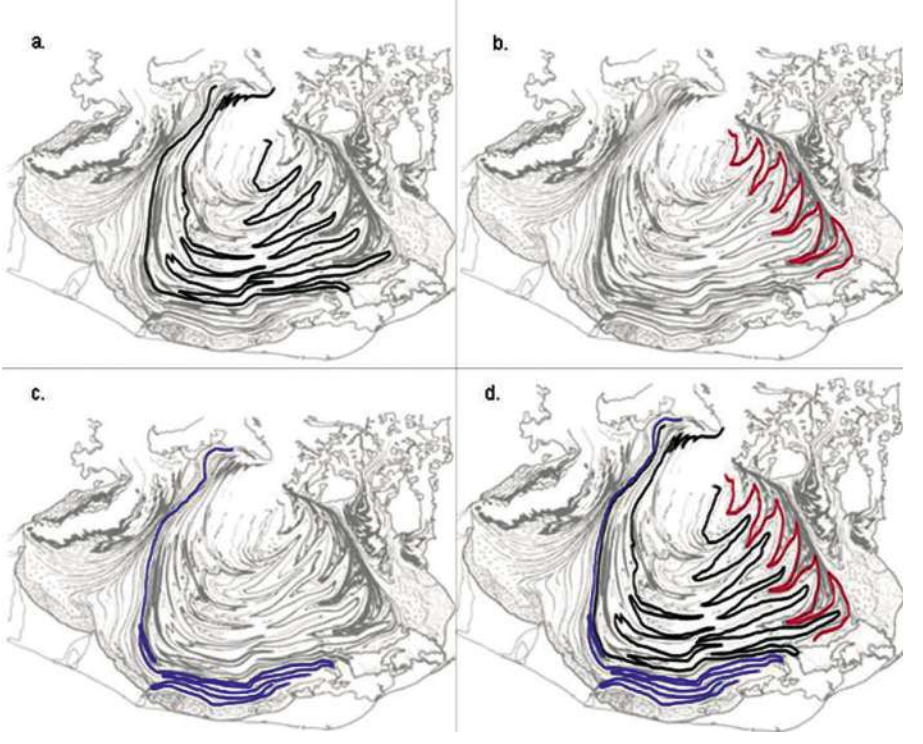


Abbildung 6: Farbliche Unterscheidung einzelner Mittelmoränen des Malaspina Gletschers. Es wurden drei Moränenverläufe in schwarz (a.), rot (b.) und blau (c.) hervorgehoben. Die vierte Darstellung fasst alle drei Mittelmoränenverläufe zusammen, um die Verläufe direkt vergleichen zu können. (verändert nach LaChapelle und Post, 1971)

ein Unterschied zwischen den Mittelmoränen an der orographisch rechten und linken Gletscherseite. Jene am linken Rand weisen von Beginn an Falten auf. Die Mittelmoränen auf der rechten Seite fliessen im Gegensatz dazu länger gerade, bevor sie im späteren Verlauf deutliche Falten ausbilden.

Auffällig ist, dass die Verläufe der Mittelmoränen auf der linken Seite (rot, schwarz) nahezu parallel verschoben sind. Die innere Mittelmoräne (schwarz) umrandet die Gletscherstirn und schliesst sich mit der Moräne der linken Gletscherseite zusammen. Im Gegensatz dazu endet die äussere Mittelmoräne (rot) am linken Gletscherrand an der Gletscherstirn.

Diskussion

Die Analyse und Untersuchung der beschriebenen Gletscher zeigt zwar einige Unterschiede im Verlauf von Mittelmoränen aufgrund von verschiedenen Fliesseigenschaften, aber Mittelmoränenablagerungen an der Gletscherfront und im unmittelbaren Gletschervorfeld konnten nicht identifiziert werden.

Die Auswertung des Bildmaterials bestätigte, dass sich Mittelmoränen gletscherabwärts verbreitern können, zumeist einen Eiskern ausbilden und in rezenten Gletschervorfeldern in Schmelzwassersysteme und Sanderflächen übergehen. Die kalbende Gletscherfront der beiden Gletschern Kronebreen und Kongsvegen, sowie die Gletscherstirn der Pasterze bieten einen Einblick in das Eisinnere und zeigen, dass dort Mittelmoränenmaterial auf der Eisoberfläche aufliegt und nicht bis an die Gletscherbasis reicht.

Auch konnte beobachtet werden, dass Mittelmoränen nicht immer bis zur Gletscherfront erhalten bleiben. Die orographisch linke Mittelmoräne des Grossen Aletschgletschers, die Trugbergmoräne, vereinigt sich mit der Seitenmoräne. Dies kann auch beim Mer de Glace, dem Haut Glacier d'Arolla, dem Gornergletscher, dem Morteratschgletscher und dem Unteraargletscher beobachtet werden. Diese Mittelmoränen enden in Seitenmoränen. Wagner (2001) bezeichnet deshalb Wallmoränen am Eisrand unterhalb solcher Übergänge als sekundäre Mittelmoränen (was als Seitenmoränenbenennung nur zur Verwirrung führen kann).

Auch die Beobachtungen, dass Mittelmoränen in ihrem Inneren volumenmässig mehr Eis- als Schuttform sind, weisen darauf hin, dass das transportierte Gesteinsvolumen von Mittelmoränen als gering einzustufen ist. Dies steht scheinbar im Widerspruch zum optischen Eindruck an der Gletscheroberfläche, wo Mittelmoränenschuttrücken als grosse Schuttakkumulationen erscheinen.

Die Gletschervorfelder werden dominiert von Seitenmoränen- und Endmoränenwällen, Schmelzwasserkanälen und -flüssen sowie Toteislöchern. Offensichtliche Mittelmoränenablagerungen konnten bisher in rezenten Gletschervorfeldern nicht festgestellt werden. Erreicht Mittelmoränenmaterial die Gletscherstirn, kommt es zum Abschmelzen der Eiskerne. In Folge breitet sich das Mittelmoränenmaterial flächenhaft und nicht punktförmig, wie bei Wagner (2002) beschrie-

Abbildung 7: Schmelzwasser und flächenhaft verbreitetes Material im Gletschervorfeld der Pasterze im Juli 2013 (Matzka, 2014).

ben, auf dem Untergrund aus und wird im unverdichteten Zustand leicht von Schmelzwässern abtransportiert.

Wagner (2001) postuliert, dass Oberflächentransport von Mittelmoränenmaterial eine bedeutende Rolle für glaziale Schuttablagerungen insgesamt gespielt hat. Entscheidend für die Schuttbereitstellung sind nach Wagner (2001) die Gipfel der Berge, die in der Eiszeit aus dem alpinen Eisstromnetz hinausragten und die wesentliche Gesteinszufuhr gewährleistet haben sollen. Dazu ist zu bedenken, dass die Bereitstellung von Schutt aus dem Gletscher-Untergrund in der Eiszeit eine Volumen-mäßig dominante Rolle gespielt haben sollte, da viele alpine Tälern ja glazial übertieft sind und damit dort ein viel grösseres Gesteinsvolumen erodiert worden sein muss, als im Bereich der Nunatakker, also der stehengebliebenen Berge neben und im Eis.

Wagner (2002) fügt hinzu, dass während eines längeren Stadiums des Gletschergleichgewichts kontinuierlicher Mittelmoränentransport zu grossen Schuttakkumulationen an der Gletscherstirn geführt haben soll. Da diese Stadien über Jahrhunderte angedauert hätten, ist es nach Wagner (2002) plausibel, dass sich bedeutende Mittelmoränenablagerung hätten bilden können. Diese sollen genau

dort entstanden sein, wo die Mittelmoräne den Gletscherrand erreichte. Da die Gletscher sich heute massiv im Rückzug befinden, wären solche Ablagerungen eben heute nicht mehr beobachtbar. Im Bereich der eiszeitlichen Endmoränewälle sind allerdings auch keine solchen isolierten Aufragungen von ehemaligen Mittelmoränenablagerungen zu beobachten.

Mittelmoränen von Surge Gletscher weisen besondere Störungen und Faltungen auf. Eine konzentrische Anordnung in Vorlandgletscherzungen Nordamerikas erinnert an Endmoränenkränze des eiszeitlichen europäischen Alpenvorlands. Allerdings sind nach unserer Kenntnis auch in den verfalteten Mittelmoränenkränzen Nordamerikas keine nennenswerten Gesteinsvolumina enthalten. Wenn man von einem katastrophalen Eiszusammenbruch der Vorlandvergletscherungen am Ende der letzten Eiszeit (van Husen, 2000) ausgeht, dann dürften die Landschaftsmuster, die früher als Rückzugsstadien interpretiert wurden, weder etwas mit Rückzugsstadien noch mit Mittelmoränenakkumulationen zu tun haben.

Wagner beschreibt schließlich in sämtlichen Publikationen seine Theorie vorwiegend an kalten Gletschern. Solche kalten Gletscher spielen allerdings auch in heutigen Polarregionen nur eine sehr untergeordnete Rolle, da flächenhaft polythermale Gletscher dominant zu sein scheinen. Es liegt kein plausibler Grund vor, warum nicht auch in der Eiszeit eher polythermale Vorlandgletscher dominiert haben und kalte Gletscher nur punktuell existierten. Aufgrund der extrem kalten Temperaturen könnte ev. auf dem Mars eine andere Situation vorherrschen und vielleicht dort kalte Gletscher eine wirklich wichtige Rolle spielen. Auf der Erde ist das für das quartäre Eiszeitalter recht unwahrscheinlich.

Zuletzt führt Wagner (2002) aus, dass Mittelmoränenschutt von Schmelzwässern weitertransportiert wurde. Deshalb bezeichnet er Schmelzwasserschotter als Mittelmoränenablagerungen. Das ist nomenklatorisch völlig abzulehnen, da der Begriff Moränenmaterial, bzw. Till, nur für kaum oder nicht durch Schmelzwasser sortiertes Material verwendet wird. (Gletscherkommission d. SANW, 1993).

Um die Frage nach dem Mittelmoränenmaterial noch einmal genauer «auf den Grund» zu gehen, könnten geophysikalische Untersuchungen, wie zum Beispiel Radaruntersuchungen, von Vorteil sein. Dabei könnte das Eisinnere erforscht werden und explizit im Feld untersucht werden, ob manche Mittelmoränen wirklich bis an die Eisbasis reichen oder ob es sich auch in Felduntersuchungen immer um rein auf der Oberfläche existierende Moränenakkumulationen handelt. Diese verbesserte Kenntnis über das Innere der Gletscher bleibt aber zukünftigen Projekten vorbehalten. Genauso ist das ausgedehnte Studium eventueller kalter Gletscher auf dem Mars, wenn überhaupt, künftigen Generationen vorbehalten.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung konnten keine geomorphologisch relevanten Mittelmoränenablagerungen identifiziert werden. Mittelmoränen scheinen lediglich als Oberflächenmoränen auf aktiven Gletschern existent zu sein. Da die Schuttschicht der Mittelmoränen zumeist nur eine sehr geringe Mächtigkeit aufweist, ist auch auf längere Zeit nur ein begrenzter Volumentransport anzunehmen. Eventuelle besondere Anhäufungen von Mittelmoränenmaterial dürften an der Gletscherstirn in den meisten Fällen umgehend durch Schmelzwässer weitertransportiert worden sein und konnten damit nicht zu landschaftsbildenden geomorphologischen Formen akkumulieren. Wenn überhaupt, dann sind Mittelmoränenablagerungen vermutlich als ungewöhnliche Spezial- und Einzelfälle einzustufen und haben damit wohl kaum landschaftsbildende Relevanz.

Literaturverzeichnis

Agassiz, L. 1841. Untersuchungen über die Gletscher. nebst einem Atlas von 32 Steindrucktafeln. Solothurn: In Kommission bei Jent & Gassmann.

Alean, J. 2004. Grosser Aletschgletscher Konkordiaplatz. http://swisseduc.ch/glaciers/alps/grosser_aletschgletscher/aletsch_flugbilder-de.html?id=2 (Zugriff am 11 November 2013).

Alean, J., und M. Hambrey. 2013. Gletscher der Welt. Bern: Haupt Verlag.

Anderson, R. S. 2000. A model of ablation- dominated medial moraines and the generation of debris-mantled glacier snouts. Journal of Glaciology, 46(154), 459–469.

Bachmann, R. C. 1978. Gletscher der Alpen. Stuttgart: Hallwag Verlag Bern-Stuttgart.

Bauder, A. C. 2001. Bestimmung der Massenbilanz von Gletschern mit Fernerkundungsmethoden und Fliessmodellierungen. Eine Sensitivitätsstudie auf dem Unteraargletscher. Dissertation. ETH Zürich.

Benn, D. I., und D. J. A. Evans. 2010. Glaciers & Glaciation. 2. Hrsg. London: Hodder Education.

Bennett, M. R., und N. F. Glasser. 2009. Glacial Geology, Ice Sheets and Landforms. 2. Hrsg. Chichester: Wiley-Blackwell.

Burri, T. 2014. Mittelmoränen – Rezension zum neuen Buch von Gerhart Wagner. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern, Neue Folge, 71, 175–186.

Clarke, T. S. 1991. Glacier dynamics in the Susitna River basin, Alaska, USA. Journal of Glaciology, 37(125), 97–106.

Copland, L., M. J. Sharp,und J. A. Dowdeswell. 2003. The distribution and flow characteristic of surge-type glaciers in the Canadian High Arctic. Annals of Glaciology, 36(1), 73–81.

Eyles, N., und R. J. Rogerson. 1978. A framework for the investigation of medial moraine formation: Austerdalsbreen, Norway, and Berendon Glacier, British Columbia, Canada. Journal of Glaciology, 20(82), 99–113.

Gletscherkommission d. SANW. 1993. Das Lexikon zur Glaziologie, Schnee- und Lawinenforschung in der Schweiz. Redaktion Schweizer Lexikon und der Gletscherkommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften Hrsg. Luzern: Verlag Schweizer Lexikon Mengis+Ziehr.

Gomez, B., und J. Small. 1985. Medial moraines of the Haut Glacier d' Arolla, Valais, Switzerland: Debris supply and implications for moraine formation. Journal of Glaciology, 31(109), pp. 303–307.

Graf, H. R., R. Burkhalter, T. Gubler, O. Keller, M. Maisch, C. Schindler, C. Schlüchter, und G. Wyssling. 2003. Das «Mittelmoränen-Modell» – aus wissenschaftlicher Sicht. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 148(3), 79–87.

Gudmundsson, G. H., A. Iken, und M. Funk. 1997. Measurements of ice deformation at the confluence area of Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. Journal of Glaciology, 43(145), 548–556.
Karl Franzens Universität Graz – Institut für Geographie und Raumforschung, 2013a. Die Pasterze. http://geographie.uni-graz.at/de/pasterze/uebersicht/ (Zugriff am 3 Oktober 2013).
Karl Franzens Universität Graz – Institut für Geographie und Raumforschung, 2013b. Pasterze-Fotos 1971–2012. http://geographie.uni-graz.at/de/pasterze/fotos/ (Zugriff am 11 November 2013).
Kellerer- Pirklbauer, A., G. K. Lieb, M. Avian, und J. Gspurning. 2008. The response of partially debris-covered valley glaciers to climate change: The example of the Pasterze Glacier (Austria) in the period 1964 to 2006. Geografiska Annaler, 90(4), 269–285.
Klebelsberg, R. v. 1948. Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie. Wien: Springer-Verlag.
Krainer, K., und G. Poscher. 1992. Sedimentologische Beobachtungen im Gletschervorfeld der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern). Carinthia II, 182(102), 317–343.
LaChapelle, R., und A. Post. 1971. Glacier Ice. Seattle&London: University of Washington Press.
Matzka, V. 2014. Die räumliche Verteilung von Moränenschutt anhand ausgewählter Beispiele. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur.
Muskett, R. R., C. S. Lingle, J. M. Sauber, A. S. Post, W. V. Wendell, und B. T. Rabus. 2008. Surging, accelerating surface lowering and volume reduction of the Malaspina Glacier system, Alaska, USA, and Yukon, Canada, from 1972 to 2006. Journal of Glaciology, 54(188), 788–800.
Post, A. 1969. Distribution of surging glaciers in western north America. Journal of Glaciology, 8(53), 229–240.
Post, A. 1972. Periodic surge origin of folded medial moraines on Bering Piedmont Glacier, Alaska. Journal of Glaciology, 11(62), 219–226.
Russell, I. C. 1893. Malaspina Glacier. The Journal of Geology, 1(3), 219–245.
Schweizerisches Gletschermessnetz. 1973. Grosser Aletschgletscher, Naters/ Ried-Mörel (VS). http://glaciology.ethz.ch/messnetz/glaciers/aletsch.html (Zugriff am 3 Oktober 2013).
Truffer, M, R.J. Motyka, W. D. Harrison, K. A. Echelmeyer, B. Fisk, und S. Tulaczyk. 1999. Suglacial drilling at Black Rapids Glacier, Alaska, U.S.A: drilling method and sample description. Journal of Glaciology, 45(151), 495–505.
Van Husen, D. 2000. Geological Processes during the Quaternary. Mitt. Österr. Geol. Ges., 92(1999), 135–156.
Wagner, G. 1997. Eiszeitliche Mittelmoränen im Berner Mittelland – Mit einer Karte 1:25.000. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern. Neue Folge, 54, 91–138.
Wagner, G. 2001. Mittelmoränen eiszeitlicher Alpengletscher in der Schweiz. Eine morphologische Studie. Eclogae geologicae Helvetiae, 94, 221–235.
Wagner, G. 2002. Eiszeitliche Mittelmoränen im Kanton Zürich. 1. Teil: Gebiet des Linthgletschers in der Zürichsee- Talung und im Knonauer Amt. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft, 147(4), 151–163.
Wagner, G. 2003. Eiszeitliche Mittelmoränen. Ein vergessenes Paradigma der alpinen Quartärmorphologie. Zeitschrift für Geomorphologie, 47(3), 373–392.
Wagner, G. 2014. Mittelmoränen: Heute und in der Eiszeit. Bern. Hauptverlag.
Woodward, J., T. Murray, und A. McCaig. 2002. Formation and reorientation of structure in the surge type glacier Kongsvegen, Svalbard. Journal of Quaternary Science, 17(3), 201–209.
Zängl, W., und S. Hamberger. 2004. Gletscher im Treibhaus. Eine fotographische Zeitreise in die alpine Eiswelt. Steinfurt: Tecklenborg.

Gerhart Wagner*

Die Reise des Hugiblocks auf der Mittelmoräne des Unteraargletschers

Mit Bemerkungen zur Entstehung der Eiszeittheorie

Vorbemerkung

Die gründliche Erforschung der Berner Alpen und insbesondere des Unteraargletschers in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist ganz wesentlich den beiden Forschern Franz Joseph Hugi in Solothurn und Louis Agassiz in Neuenburg zu verdanken. **Franz Joseph Hugi (1796–1855)** stammte aus Grenchen. Er studierte zuerst Theologie, dann Naturwissenschaften. Als Lehrer in Solothurn entfaltete er eine reiche naturwissenschaftliche Tätigkeit: 1823 gründete er die Naturforschende Gesellschaft, 1825 das Naturhistorische Museum, 1836 den Botanischen Garten von Solothurn. 1833 wurde er Professor an der höheren Lehranstalt in Solothurn, verlor diese Stelle aber 1837 wegen seines Übertritts zum reformierten Glauben.

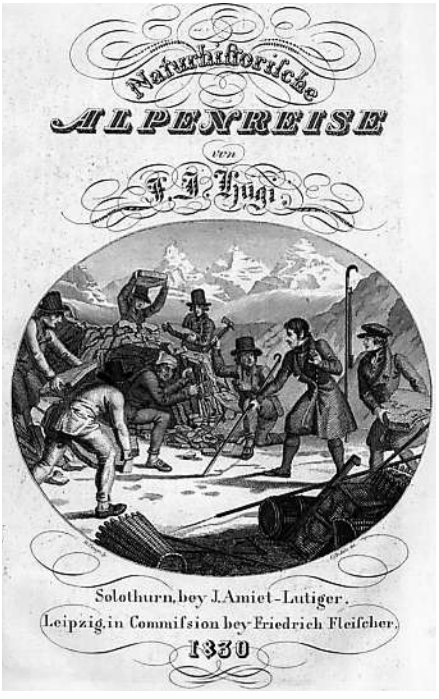


Abbildung 1: Titelseite «Naturhistorische Alpenreise» von Franz Josef Hugi (1830). Auf dem Stich zeigt Hugi seinen Mitstreitern, wie er sich den Aufbau der Hütte auf der Mittelmoräne des Unteraargletschers vorstellt.

Hugi war ein erstaunlich kühner Bergsteiger, der alle seine alpinistischen Unternehmungen in den damals noch fast unbekannten Fels- und Eisgebieten mit vielseitigen wissenschaftlichen Beobachtungen und Messungen verband. Seine erste, für uns wichtigste Publikation von 1830 trägt den Titel «Naturhistorische Alpenreise» *(Abb. 1)*.

Louis Agassiz (1807–1873) stammte aus Môtier FR am Murtensee *(Abb. 2)*. Er war zuerst Mediziner, dann Zoologe und beschäftigte sich als solcher mit fossilen Fischen bei Georges Cuvier (1769–1832) in Paris. 1832 wurde er Professor für Naturgeschichte in Neuenburg, welches trotz seiner Mitgliedschaft in der

*Dr. Gerhart Wagner, Stettlen

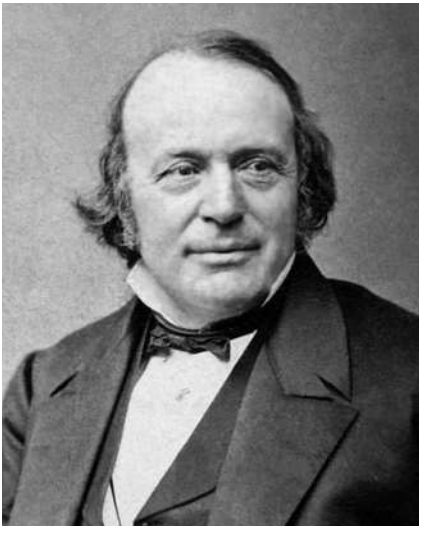


Abbildung 2: Portrait von Louiz Agassiz. (unbekannter Fotograf, wikimedia commons, public domain)

Eidgenossenschaft noch ein preussisches Fürstentum geblieben war. 1836 begann er, angeregt durch die Eiszeittheorie von Ignaz Venetz und Jean de Charpentier, mit der Erforschung der Gletscher. Von 1840 bis 1845 verbrachte er in jedem Sommer mehrere Wochen auf dem Unteraargletscher. 1846 schiffte er sich in Liverpool nach Amerika ein, von wo er nicht mehr zurückkehrte: Er wurde Professor für Zoologie und Geologie an der Harvard University in Cambridge.

Mit einer anderen zu seinen Lebzeiten auftauchenden epochalen Erkenntnis, mit Darwins Evolutionstheorie, konnte er sich nicht anfreunden. Er blieb zeitlebens ein Anhänger von Cuviers Theorie mehrmaliger weltweiter Zerstörungen («Sintfluten»), gefolgt von Neuschöpfungen. Als Schüler von Cuvier hatte er an dieser Sicht der Dinge direkten Anteil, und die Vorstellung einer einstigen allgemeinen Vereisung liess sich in dieses Bild einordnen. Ein Thema für sich ist der krasse Rassismus von Agassiz, um dessentwillen er in Misskredit gekommen ist und der 2007 sogar zu dem (erfolglos gebliebenen) Vorstoss im Grossrat des Kantons Bern geführt hat, dem Agassizhorn einen andern Namen zu geben.

1. Geographische Übersicht: Die Unteraar-Teilgletscher

Der Unteraargletscher *(Abb. 3 und 4)* ist der heute noch rund 5 km lange und 1 km breite Eisstrom, der beim sogenannten Abschwung auf 2400 m ü. M. durch die Vereinigung von Finsteraar- und Lauteraargletscher entsteht. Er endet heute ca. 1 km hinter dem Grimselsee auf 1950 m Höhe. Seine Oberfläche hat vom Abschwung an ein mittleres Gefälle von 9 %. Seine beiden Teilgletscher haben vor ihrem Zusammenfluss sehr verschiedenen Charakter:

Der Lauteraargletscher ist der schwächere und einheitlichere Zufluss. Er kommt beim Abschwung von links und hat vom Lauteraarsattel (3125 m ü. M.) bis dort eine Länge von 5 km. Er erhält auf dieser Strecke nur kleine Zuflüsse von rechts, keine von links.

Der Finsteraargletscher kommt beim Abschwung von rechts und setzt sich seinerseits schon aus drei grossen Teilgletschern zusammen: Von links ist ihm der mächtige Zufluss des Strahlegggletschers, von rechts das vom Oberaarhorn stammende Eis (ohne Namen auf der Karte 1 : 25 000) zugeflossen. Sein zentraler Teil,

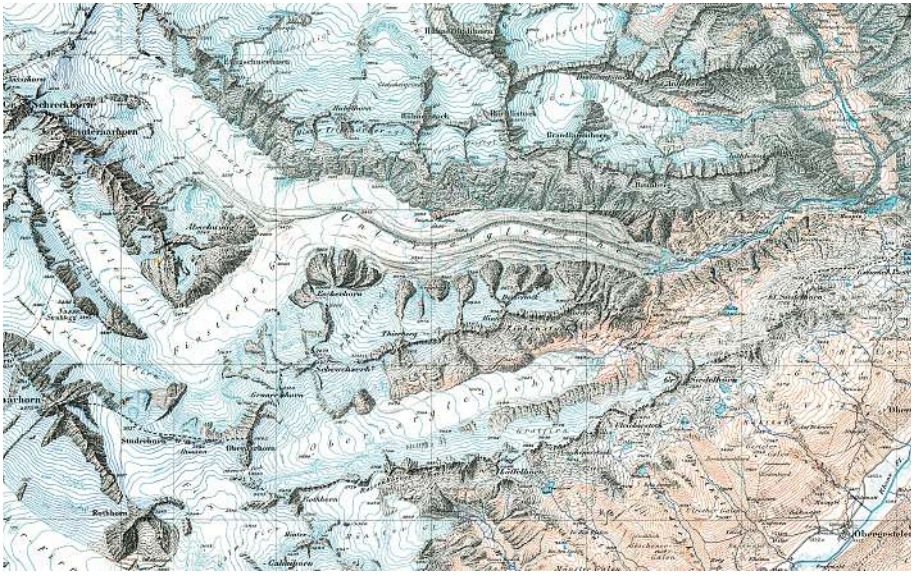


Abbildung 3: Erstausgabe der Siegfriedkarte 1 : 50 000 von 1874. Der Unteraargletscher zeigt noch fast das Maximalstadium der Kleinen Eiszeit: Das Zungenende liegt bei der Ausmündung des Oberaarbachs. Vgl. Abbildung 4. (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA 15063])

Abbildung 4: Gleicher Kartenausschnitt wie in Abb. 3 in der Landeskarte 1: 50 000 von 2009. (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA 15063])

der vom Nordostfuss des Finsteraarhorns abfliessende eigentliche Finsteraargletscher, hat das grösste und höchstgelegene Einzugsgebiet. Er liefert denn auch fast allein das bis zum Zungenende des Unteraargletschers durchhaltende Eis.

Alle diese Teilgletscher und ihre Firne sind von hohen und mancherorts schroffen Gebirgsketten umgeben, so dass ihre Ränder durch Steinschlag, Bergstürze und Lawinen reichlich Oberflächenschutt erhalten. Dies führt zur Entstehung von Seitenmoränen und bei den Zusammenflüssen der Teilgletscher zu Mittelmoränen.

Das gesamte Einzugsgebiet der Aaregletscher liegt innerhalb des kristallinen Aarmassivs, grösstenteils im Zentralen Aaregranit (Schweizerische Geologische Kommission 1972). Die zwei Seitenmoränen, aus denen beim Abschwung die grosse Mittelmoräne auf dem Unteraargletscher entsteht, haben jedoch, ihrem verschiedenen Ursprung entsprechend, gesteinsmässig einen ungleichen Charakter. Der rechtsseitige, aus der linken Seitenmoräne des Finsteraargletscher hervorgehende Anteil besteht aus hellem Aaregranit. Der linksseitige, aus der rechten Seitenmoräne des Lauteraargletschers hervorgehende Anteil besteht aus dunkleren Gneisen und Schiefern. Dieser Unterschied zwischen der rechten und der linken Hälfte der

Abbildung 5: Der Zusammenfluss von Finsteraargletscher (im Bild links) und Lauteraargletscher beim Abschwung unter Bildung der grossen Mittelmoräne, der «Gufferlinie», im Jahr 2004. Diese hebt sich mehr und mehr aus der Eisfläche heraus. Deutlich zu erkennen ist auf ihrem ganzen Verlauf der Unterschied zwischen den vom Finsteraargletscher herbeigeführten hellen Graniten und den vom Lauteraargletscher gebrachten dunkleren Schiefern und Gneisen von Schreckhorn bis Hugihorn. Auf dem Finsteraargletscher haben sich drei weiter oben entstandene Mittelmoränen schon vereinigt, bleiben aber durch verschiedene Gesteinsfarben unterscheidbar. Zusammen bedecken sie den Finsteraargletscher schon auf dem grössten Teil seiner Breite. St – Studerhorn, Fh – Finsteraarhorn, Hs – Hugisattel, Ag – Agassizhorn, Hh – Hugihorn, Lh – Lauteraarhorn, Sch – Schreckhorn. (Foto Jürg Alean)

Mittelmoräne bleibt auf ihrer ganzen Länge deutlich erkennbar *(Abb. 5 und 17)*. Das Schmelzwasser des Unteraargletschers wird seit 1932 von den Kraftwerken Oberhasli (KWO) in dem 95 Millionen Kubikmeter fassenden Grimselsee vor der Gletscherzunge gespeichert und zur Erzeugung von elektrischer Energie verwendet. Der Oberaargletscher ist vom System des Unteraargletschers vollständig getrennt. Seit 1953 wird auch sein Wasser zurückgehalten und im Oberaarsee gespeichert.

2. Die Unterkunft von Franz Joseph Hugi beim Abschwung im Jahr 1829

In den Jahren zwischen 1820 und 1830 war es Franz Joseph Hugi, welcher durch kühne Expeditionen besonders in den Berner Alpen das Wissen über Hochgebirge und Gletscher ganz wesentlich bereicherte. Da er sich auf keinerlei Gebirgsunterkünfte stützen konnte, wie wir sie heute kennen, nächtigte er mit seinen Begleitern unter freiem Himmel oder in behelfsmässig errichteten Steinhütten. Von besonderem Interesse ist sein Unternehmen vom Sommer 1829 im Gebiet des Unteraargletschers, der sich damals noch in einer Wachstumsphase befand. In dem oben erwähnten Bericht «Naturhistorische Alpenreise» *(Abb. 1)*, den er 1830 der Naturforschenden Gesellschaft in Solothurn vorlegte, berichtet er auf den Seiten 229/230 über seine Studien am Unteraargletscher folgendes:

«Der Gletscher hatte seit letztem Jahr 40 bis 50 Fuss sich thalwärts geschoben, und seit 18 Jahren über eine Viertelstunde; und auch zugleich nach den Seiten sich ausgedehnt, worüber später. Eine kleine Arve, die letztes Jahr auf einem begrünten Granite stand, ist nun vom Gletscher erreicht und zerstört.

Wir stiegen nun so rasch über Gletscher empor, dass ich mit einigen schon 12 Uhr den Abschwung, wo der Gletscher in zwei Firne sich zu theilen beginnt, erreichte. Hier im Mittelpunkt des Eismeeres im Angesicht der ringsherum starrenden, unzähligen Hörner und Gräte wollte ich nun Quartier machen. Heftig aber fieng es zu schneien und zu guxen an. Das schreckte mich durchaus nicht ab; denn ich hatte nur Solothurner und Hasler bei mir, und ich wusste, was ich mit meinen Leuten auszuführen und zu ertragen im Stande war. Mit anderen vielleicht hätte ich umgekehrt.

Bei allem Stürmen und Schneien zog Ingenieur Walker und Peter Gschwind über den Firn gegen das Finsteraarhorn, pflanzten Signale auf, und fiengen an, eine Standlinie zu messen, während alles übrige Volk mit Bauen sich beschäftigen musste. Die Höhle im Aaregrate, einem Backofen gleich, wollte mir nicht als Herberge entsprechen. Am Mittelberge des Eismeeres konnte ich keine Stelle finden, die bequem und sicher war; daher wählte ich dieses Mal das helle Eis der Gufferlinie. Zwischen zwei Granitblöcken wurde das Eis ausgehauen, östlich und westlich eine tüchtige Mauer aufgeführt, vom grössern auf den kleinern Granit Balken gelegt, und so das Ganze mit regelmässigem Schieferdache nach allen Regeln der Kunst zugedeckt. Da die grössere Arbeit fertig war, schickte ich 4 Mann nach dem

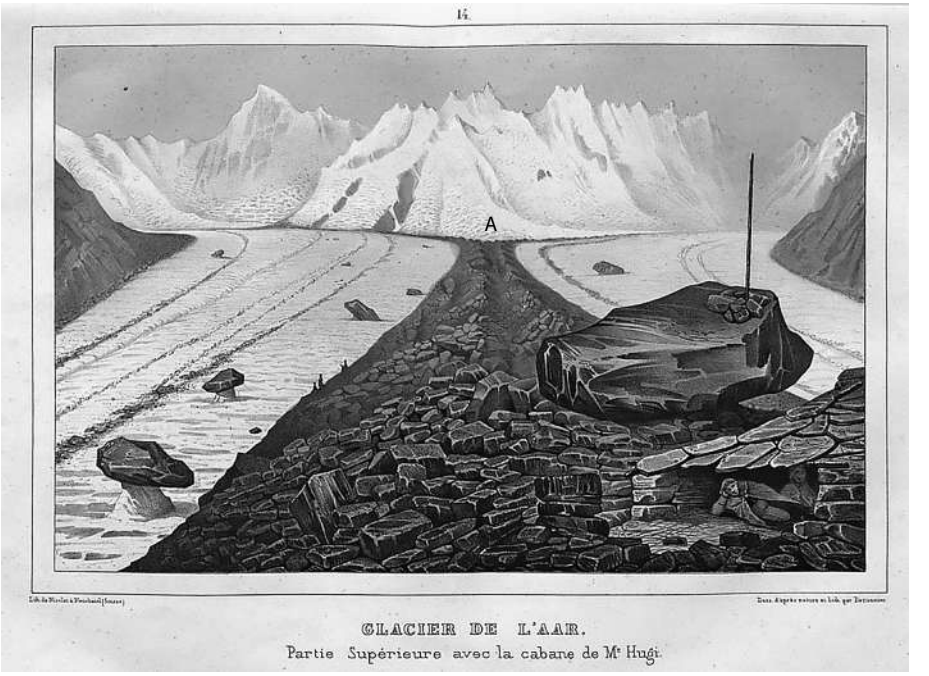


Abbildung 6: Die Steinhütte auf der Mittelmoräne, die Hugi 1829 beim Abschwung (A) auf der dort entstehenden Mittelmoräne gebaut hatte, wie sie Agassiz bei seiner ersten Begehung im Sommer 1839 antraf. (J. Bettannier, «Glacier inférieur de l'Aar», in Louis Agassiz, «Études sur les glaciers», 1840)

Fusse des tiefer gelegenen Miselenhornes, um Gras zum Lager und Wachholder zum Feuer aufzusuchen. Das Eis wurde ganz mit Glimmerschiefer bedeckt, und das Gras darüber gestreut. Dann entliess ich mit einbrechender Nacht alle Hasler mit dem Befehle, morgen mit Heu zum Lager und anderen Bedürfnissen wieder zu kommen. Wir hatten wirklich für 4 Mann eine sehr bequeme Wohnung. Auch die kleinsten Öffnungen wurden, so viel möglich, verstopft, rechts dem Lager das Fass aufgepflanzt und der Keller eingerichtet, zu den Füssen aber die Küche geordnet. Das Feuer brannte so im Focus einer Nische des Granites, dass die Wärme trefflich sich durch die ganze Hütte verbreitete; der gewaltige Rauch des Wacholderfeuers aber drang so am Gibel der Hütte durch die Oeffnung, dass er uns nicht im geringsten belästigte. Eine regelmässige Thüre aus Ruthen und Harztuch vollendete das Ganze.» (Abb. 1 und 6)

3. Die Entstehung der Eiszeittheorie 1829–1840

Von einer Eiszeit wusste Hugi 1829 noch nichts. Um den Ursprung dieser damals als unwahrscheinlich angesehenen Theorie aufzuspüren, müssen wir uns ins Wal-

Abbildung 7: Ignaz Venetz (Ölgemälde, Bildarchiv Erdwissenschaften, Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern (NMBE)).

Abbildung 8: Jean de Charpentier (Ölgemälde, Bildarchiv Erdwissenschaften, Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern (NMBE)).

lis versetzen und uns mit zwei dortigen Zeitgenossen von Hugi bekannt machen: mit dem Walliser Ignaz Venetz und mit dem aus Sachsen stammenden Waadtländer Jean de Charpentier[1].

Ignaz Venetz (1788–1859) stammte aus Visperterminen *(Abb. 7)*. Als junger Ingenieur war er für Strassen- und Brückenbau in Napoleons Diensten gewesen. Seit 1815 war er Kantonsingenieur des Kantons Wallis, nach 1837 des Kantons Waadt. Im Wallis war er mit mehreren gefährlichen Gletscher- und Überschwemmungsproblemen konfrontiert, denen er mit neuartigen Verbauungsmethoden begegnete und damit Katastrophen verhinderte.

Jean de Charpentier (1786–1855) stammte aus Freiberg in Sachsen *(Abb. 8)*. Er war Malakologe (Molluskenforscher) und Bergbauingenieur. 1813 wurde er Direktor der Salinen von Bex. Er fasste die Thermalquelle von Lavey und wirkte entscheidend bei der Verhinderung von Überschwemmungen mit. Seine Molluskensammlung (37 000 Exemplare) wird im Musée zoologique von Lausanne aufbewahrt.

[1] Die Detailangaben über Venetz, de Charpentier und Agassiz stammen grösstenteils aus den im Literaturverzeichnis angegebenen, ausführlichen Biographien von Heinz Balmer (1969, 1970, 1974), der am 10. Januar 2016, während der Niederschrift dieser Texte, in Konolfingen gestorben ist.

Im Juni 1818 verursachte der Ausbruch eines durch das Eis des Giétro-Gletschers gestauten Sees im Val de Bagnes und bis nach Martigny eine Katastrophe, bei der 41 Menschen und zahlreiche Tiere ums Leben kamen. Der Kantonsingenieur Venetz studierte in der Folge das Verhalten der Gletscher aufs Genauste. Er verfolgte den Blocktransport durch die Gletscher und erkannte an vielen Orten Blöcke und Moränen ausserhalb des damaligen Eisstandes. Immer tiefer in den Tälern fand er Gletscherspuren. Er sah sich zuletzt zu dem Schlusse gezwungen, dass die Gletscher einst sehr viel grösser gewesen sein müssen und bis ins Alpenvorland gereicht haben. Er gab diese Auffassung erstmals 1829 an der Jahresversammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft bekannt, die in jenem Jahr in Anwesenheit der bedeutendsten Schweizer Forscher sowie des deutschen Geologen Leopold von Buch aus Berlin auf dem Grossen St. Bernhard tagte. Das Sitzungsprotokoll vom 22. Juli 1829 meldet:

«*I. Venetz liest eine Denkschrift über die Ausdehnung, die wie er glaubt, die Gletscher früher gehabt haben, und über ihren Rückzug in ihre heutigen Grenzen. Er erklärt die Mengen alpiner Gesteine, die an verschiedenen Stellen in den Alpen und im Jura zerstreut sind, ebenso wie in Nordeuropa, durch die Existenz ungeheurer Gletscher, die seither verschwunden sind, wobei diese Blöcke den Moränen angehörten. Er stützt diese Hypothese durch Aufzählung mehrerer Tatsachen, die er in der Umgebung der Gletscher der Walliser Alpen beobachtet hat.*» (zitiert nach Balmer 1970, S. 152.)

Mit seiner schon 1821 formulierten, aber erst 1833 publizierten Arbeit «Mémoire sur les variations de la température dans les Alpes suisses» war Venetz in der Schweiz der Erste, der die erratischen Blöcke im Mittelland und im Jura auf Gletschertransport zurückführte und dies vor einem wissenschaftlichen Gremium darlegte.[2] Aber er wurde nicht ernst genommen. Jean de Charpentier schämte sich für seinen Freund und gedachte diesen zu widerlegen. Er unternahm jetzt eine eigene gründliche Studie, kam jedoch wider Erwarten zu demselben Resultat wie Venetz. Wie dieser 1829, präsentierte er seine Theorie 1834 an der Jahresversammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, welche diesmal in Luzern stattfand. Aber auch jetzt noch, 1834, fiel die Eiszeit-Idee bei den in Luzern anwesenden Gelehrten nicht auf fruchtbaren Boden, auch nicht bei Bernhard Studer, dem Professor für Geologie an der im gleichen Jahr eröffneten Universität in Bern (vgl. Gerber und Schmalz 1948).

In seiner Publikation «Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône» von 1841 *(Abb. 9)* erzählt Charpentier, wie er schon 1815 erstmals mit dem Gedanken einer Eiszeit in Berührung gekommen sei, nicht durch Venetz,

[2] Der Schotte John Playfair (1748–1819) hatte schon 1802 vom Gletschertransport der Irrblöcke geschrieben und 1816 nach einer Schweizerreise erklärt, die Blöcke des Jura seien durch einen das Mittelland erfüllenden Gletscher hergebracht worden. Aber er verfolgte den Gedanken nicht näher und blieb ungehört (nach Gerber & Schmalz 1948). Venetz kann somit als der eigentliche Vordenker der Eiszeittheorie betrachtet werden.

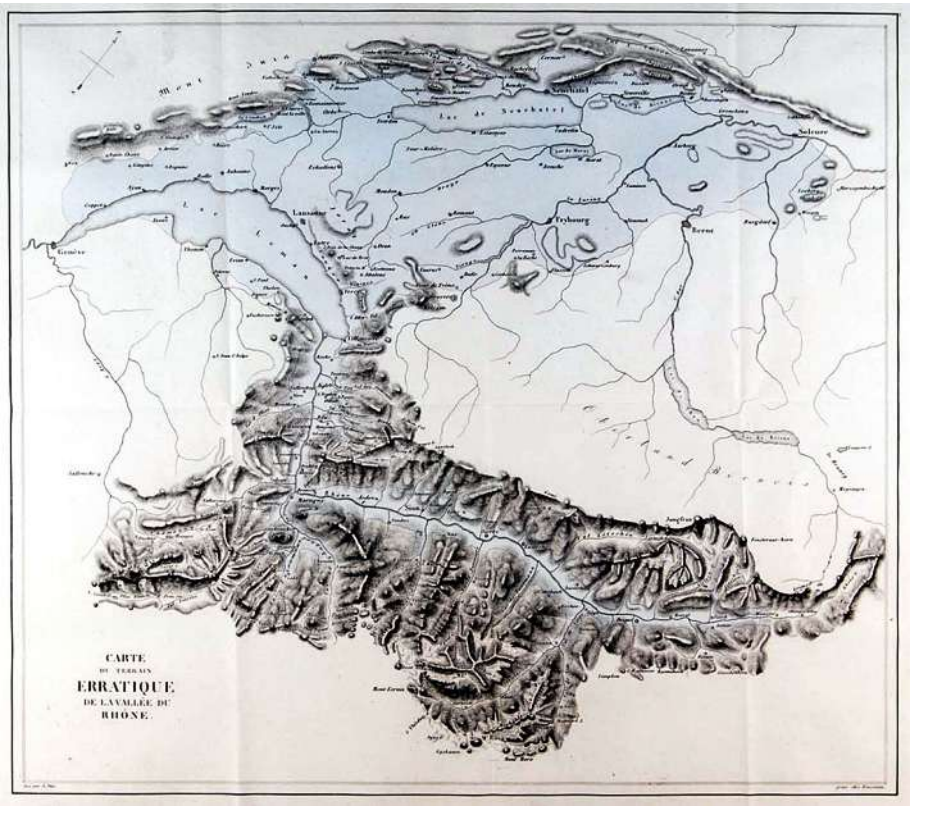


Abbildung 9: Karte aus DE CHARPENTIER 1841. Es ist erstaunlich, wie gut de Charpentier die Ausdehnung des Walliser Gletschers im Mittelland schon damals bekannt war.

sondern durch **Jean Pierre Perraudin**, einen Bergbauern und Gemsjäger von Lourtier im Val de Bagnes. (Lourtier war das Dorf, das durch den Ausbruch des Giétro-Gletschers von 1818 am meisten geschädigt wurde.) Perraudin hätte Charpentier gegenüber behauptet, die Gletscher müssten sich einst bis Martigny erstreckt haben, was die dortigen Blöcke bewiesen. Sie seien zu gross, als dass sie vom Wasser hätten transportiert werden können. Charpentier hätte diese Ansicht eines Bauern nicht ernst genommen. Als aber 1829, 14 Jahre später, Venetz gar die Idee einstiger Gletscher bis an den Jura vorbrachte, und dies in einem wissenschaftlichem Kreis, sei es ihm nötig erschienen, diese Vorstellung («réellement folle et extravagante») zu widerlegen. Aber durch seine eigene Studie kam er dazu, sie zu bestätigen (Zitiert nach GERBER & SCHMALZ 1948).

Wer den grossen Gedanken von Venetz und de Charpentier aufnimmt, ist der damals 27 jährige Doktor der Zoologie und der Medizin in Neuenburg, Louis Agassiz. Er ist fasziniert von der revolutionären Hypothese und erkennt deren

Bedeutung. Er beschliesst, ihr gründlich nachzugehen. Zunächst setzt er sich mit Jean de Charpentier in Verbindung, weilt 1836 fünf Monate bei diesem in Bex, lässt sich von ihm führen und erkundet die erratischen Blöcke an den Jurahängen. Er überzeugt sich von der Stichhaltigkeit der Idee und übertrifft mit seinen Vorstellungen bald einmal diejenigen von Venetz und Charpentier. 1837, drei Jahre nach Charpentiers Vortrag in Luzern, ist er Präsident der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Als solcher hält er an der Generalversammlung vom 24. Juli in Neuenburg den einleitenden Vortrag. Man erwartet ein Referat über sein Spezialgebiet, die fossilen Fische. Agassiz gibt aber zu diesem Thema nur einen kurzen Überblick und beginnt dann vor den staunenden Vertretern aller Sparten unverhofft eine ausführliche Erklärung über Gletscher und erratische Blöcke. Dabei setzt er den Begriff einer époque glaciaire, einer Eiszeit, in die Welt. Im Saal wird protestiert. Aber Agassiz ist seiner Sache sicher. «*Cette manière de voir*», sagt er, «*ne sera pas partagée, je le crains, par un grand nombre de nos géologues qui ont pour ce sujet des opinions arrêtées ; mais il en sera de cette question comme de toutes celles qui viennent heurter des idées reçues depuis long-temps.*» (zitiert nach Gos 1928, S. 13f). Die Sitzung endet tumultuös. Der aus Berlin angereiste Leopold von Buch (1774–1853), der damals wohl bedeutendste Geologe Europas, verlässt den Saal unter Protest. Er hält die Eiszeittheorie bis zu seinem Tode für eine «sonderbare Verwirrung des menschlichen Geistes».

Agassiz lässt sich nicht beirren. Er beschliesst, Grundlagenforschung über Gletscher zu unternehmen. Den Sommer 1838 benutzt er für Rekognoszierungen im Berner Oberland und im Gebiet von Chamonix. Im Sommer 1839 besucht er, zusammen mit Edouard P. Desor und Bernhard Studer, die Gletscher im Gebiet von Zermatt, den Grossen Aletschgletscher, den Fiescher- und den Rhonegletscher und kommt von Süden zurück über die Grimsel. Er besucht zum ersten Mal den Unteraargletscher und steigt auf dessen Mittelmoräne. Er wundert sich über ihre grosse Höhe. Nach drei Stunden Marsch auf der «Gufferlinie» – so nannten die Älpler die Mittelmoräne[3] – stösst er zu seiner Verwunderung auf eine Steinhütte *(Abb. 6)*. Es ist die Unterkunft, welche Franz Joseph Hugi 1829 beim Zusammenfluss von Finsteraar- und Lauteraargletscher, beim Abschwung, gebaut hat, von dem sie inzwischen weit entfernt ist (vgl. S. 121).

Schon 1840 publiziert Agassiz seine bisherigen Feststellungen in einer ersten glaziologischen Publikation mit dem Titel «Etudes sur les glaciers». Er vertritt darin die irrige Vorstellung, «dass die Alpen erst nach der Eiszeit aufgestiegen seien und dass die Blöcke auf der geneigten Polareiskruste zum Jura gerutscht seien.» Diese Auffassung wird von Charpentier 1841 entschieden abgelehnt. Aber die Erkenntnis, dass die Gletscher eigentliche Flüsse aus festem Wasser sind, setzte sich offenbar erst langsam durch.

[3] Das Wort Moräne war wohl noch nicht eingebürgert. Es war 1779 von Horace Bénédict de Saussure französisch als *moraine* aus dem savoyardischen Dialekt *(morena)* übernommen worden.

Für seine weiteren Forschungen wählt Agassiz den Unteraargletscher. 1840 verweilt er erstmals zusammen mit fünf Mitarbeitern für mehrere Wochen auf der Mittelmoräne. Da er Hugis Hütte diesmal in Trümmer aufgelöst findet, baut er mit seinen Begleitern eine neue, möglichst komfortable Gletscherwohnung bei einem grossen Glimmerschieferblock oberhalb der Hütte von Hugi. Sie wird auf den Namen «Hôtel des Neuchâtelois» getauft *(Abb. 10 und 11)*. Von dort aus werden der Gletscher und dessen weite Umgebung erkundet. Auch kann jetzt festgestellt werden, dass sich die Hugihütte in den 11 Jahren seit 1829 um 800 m vom Abschwung entfernt hat. Das zeugt von einer Fliessgeschwindigkeit des Gletschers von gut 70 m pro Jahr. Die späteren Messungen zwischen 1842 und 1846 ergeben 74 m pro Jahr.

Dem ersten Gletschersommer folgen 1841 bis 1845 fünf weitere in der weiten Umgebung des Gletschers, mit Messungen und alpinistischen Erkundungen aller Art, darunter mehrere Erstbesteigungen. In diesen Sommern erhält Agassiz in seinem «Hôtel» mehrfach Besuche von bedeutenden Zeitgenossen, so von Arnold Escher von der Linth, Daniel Dollfus-Ausset, Bernhard Studer und anderen.

Durch alle diese Unternehmungen, sowie durch die Drucklegung seiner umfangreichen farbigen Tafelwerke über Fische, ist Agassiz 1846 schwer verschuldet. Sein väterlicher Freund Alexander von Humboldt (1769–1859), den er in Paris bei Cuvier kennen gelernt hat, verhilft ihm zu einer Unterstützung durch König Wilhelm IV von Preussen, der 1841 die Akademie von Neuenburg gegründet hat und

Abbildung 10: «Hotel des Neuchatelois, sur la Mer de glace du Lauter Aar et du Finster Aar, Côté Méridional». (Hercule Nicolet, Litographe, aus DESOR 1844)

immer noch den Titel eines Fürsten von Neuenburg trägt. Dieser ermöglicht ihm eine Forschungs- und Vortragsreise nach USA. Es wird zu einem Abschied für immer: Agassiz wird Professor für Zoologie und Geologie an der Harvard-Universität in Cambridge USA. Zusätzlich zu seinem zoologischen Wissen exportiert er die Eiszeittheorie und findet dafür auch in Nordamerika untrügliche Beweise. 1847 erscheint in Paris und in Leipzig seine Publikation « Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels » *(Abb. 11)*.

Unter dem überwältigenden Gewicht aller Indizien wird die revolutionäre Theorie nach und nach weltweit anerkannt. In Bern gibt Bernhard Studer, nachdem er das Forschungsfeld lange den Neuenburgern, Solothurnern, Wallisern und Waadtländern überlassen hat, seine Zweifel auf und setzt sich in der Folge wirksam für die Erhaltung der im schweizerischen Mittelland noch vorhandenen erratischen Blöcke ein.

Auf dem Unteraargletscher lag also mit der Hugihütte und dem «Hôtel des Neuchâtelois» gleichsam die Wiege der Gletscherforschung. Er darf als einer der bekanntesten und besterforschten Gletscher und seine «Gufferlinie» als die wohl weltweit berühmteste Mittelmoräne bezeichnet werden.

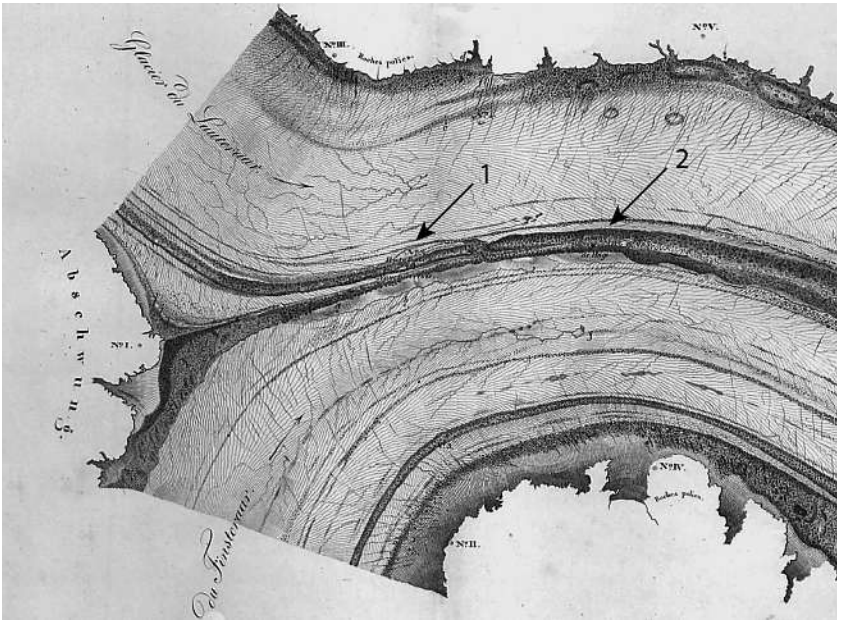


Abbildung 11: Ausschnitt aus einer Karte des Unteraargletschers vom Jahr 1842, dargestellt von Johannes Wild nach den Angaben von Louis Agassiz. Sie zeigt das «Hôtel des Neuchâtelois» (Pfeil 1) und den Hugiblock (Pfeil 2) auf der Mittelmoräne. Der Abstand zwischen den beiden beträgt ca. 600 m. (Aus AGASSIZ 1847. Bibliothèque publique et universitaire Neuchâtel [base Viatimages])

4. Die weitere Reise des Hugiblocks und seine heutige Lage

Menschen kommen und gehen, Felsblöcke können über Jahrtausende erhalten bleiben. Der Granitblock, unter dessen Schutz Hugi im Jahr 1829 beim Abschwung seine Hütte errichtet hatte (vgl. S. 121), war der grösste weit und breit. Er bestand aus massivem Granit und hielt den mechanischen Beanspruchungen auf der bewegten Mittelmoräne über die Jahrzehnte stand. Fotografisch festgehalten, zugleich mit dem Block des «Hôtel des Neuchâtelois», ist er erstmals auf einer Aufnahme von Dollfuss-Ausset im Jahr 1850 *(Abb. 12)*. Ein Jahrhundert nach Hugi, im Jahr 1930, wurde er von den Kraftwerken Oberhasli auf der Mittelmoräne noch ca. 500 m vom Zungenende entfernt wieder identifiziert und in der Folge Jahr für Jahr in seiner jeweiligen Lage genau vermessen (Kraftwerke Oberhasli AG 1968). *Abb. 13* zeigt ein 1945 von A. Flotron aufgenommenes Bild. Die jährliche Verschiebung betrug nach 1930 noch knapp 30 m pro Jahr und sank bis zuletzt auf weniger als 10 m pro Jahr. 1967 stürzte der Block am Zungenende vom Eis und blieb im Gletschervorfeld liegen. Die gesamte Fliessstrecke auf dem letzten Abschnitt der Mittelmoräne von 1930 bis 1966 betrug 537 m, was einer mittleren jährlichen Verschiebung von 15 m entspricht. Von 1829 bis 1930 hatte er gute 5 km zurückgelegt, also im Mittel rund 50 m pro Jahr.

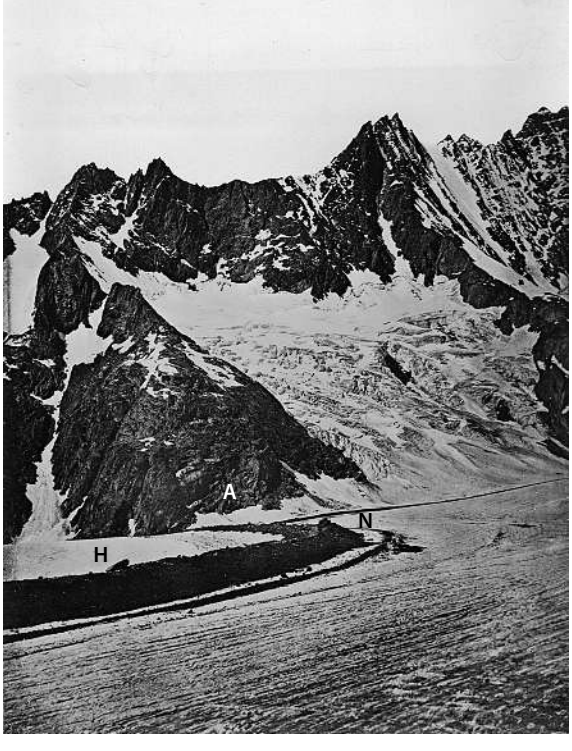


Abbildung 12: Die Mittelmoräne des Unteraargletschers, gesehen vom Pavillon Dollfuss (bei der heutigen Lauteraarhütte SAC) am 20 August 1850. Man erkennt den Hugiblock (H) sowie den Block vom Hôtel des Neuchâtelois (N). Der Abstand des Hugiblocks vom Abschwung (A) zeigt die Strecke, die er in den 21 Jahren seit 1829 zurückgelegt hatte. (Aufnahme: Daniel Dollfuss-Ausset. ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv)

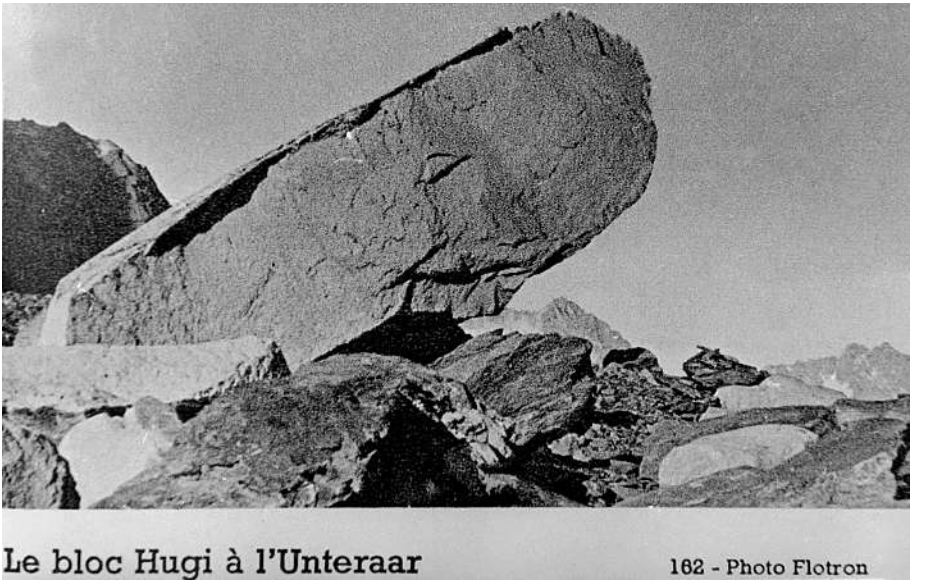


Abbildung 13: Der Hugiblock auf der Mittelmoräne des Unteraargletschers am 19. September 1945. (Foto: A. Flotron, aus Paul-Louis Mercanton in DIE ALPEN XII 1946, reproduziert von Leo Wehrli. ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv)

Abbildung 14: Der Hugiblock in seiner heutigen Lage im Gletschervorfeld mit Blick talauswärts. Er trägt (oben in der Mitte) die noch lesbare, vermutlich von Flotron 1945 angebrachte weisse Aufschrift HUGIBLOCK. (Foto: Nick Röllin 2015)

Nachdem der Gletscher den Block an seinem Zungenende 1967 abgesetzt hatte, schmolz das Eis immer weiter zurück. Der Block liegt jetzt im eisfreien Gletschervorfeld rund 500 m vom heutigen Eisrand entfernt, auf 1920 m Höhe, etwa in der Mitte des Talbodens *(Abb. 14–18*, bei den Koordinaten 662 560/ 157 480).[4] Nach der Schätzung von Nick Röllin ist er etwa 6 m lang, 5 m breit und 3 m hoch. Mit diesen beachtlichen Massen ist er der grösste im weiten Umfeld. Er ist auf der heutigen Landeskarte 1 : 25 000 vermerkt *(Abb. 18)*, und zwar mit einer doppelten Blocksignatur. In der Tat liegt im Gelände neben dem grössten ein etwas kleinerer zweiter Block *(Abb. 16)*, der wie der grosse aus Granit besteht. Das passt genau zu der auf Seite 121 zitierten Originalbeschreibung von Hugi 1829: Dort

[4] Die Entdeckung des Hugiblocks in seiner heutigen Lage verdanke ich Nick Roellin von der KünstlerInnengruppe l'art pour l'aar. Diese arbeitet seit über zwanzig Jahren im Grimselgebiet und setzt sich künstlerisch mit verschiedensten Aspekten dieser alpinen Landschaft auseinander. 1999 fand die Ausstellung «Gletscherblick» des SAC dort statt. Die Gruppe l'art pour l'aar hat auch eine fiktive Installation «Hotel des Neuchâtelois» kreiert, dessen Raumkoordinate heute mindestens 100 m über dem Eis angenommen werden muss (siehe www.lartpourlaar.ch).

Abbildung 15: Der Hugiblock in seiner heutigen Lage. Der 1,9 m grosse Mann ist Nick Röllin. (Foto: Nick Röllin 2015)

Abbildung 16: Der Hugiblock und sein Begleiter in seiner heutigen Lage mit Blick gegen den Gletscher. (Foto: Nick Röllin 2015)

ist von zwei Granitblöcken die Rede, einem grösseren und einem kleineren, zwischen denen die Steinhütte gebaut wurde. Man müsste also korrekterweise wohl von einem Blockpaar oder von zwei Hugiblöcken sprechen.

Beide Blöcke entstammen der linken Seitenmoräne des Finsteraargletschers, welche die hellere, aus Aaregranit bestehende rechtsseitige Hälfte der am Abschwung entstehenden grossen Mittelmoräne liefert *(vgl. Abb. 5)*. Demgegenüber bestand der Block beim «Hôtel des Neuchâtelois» aus Glimmerschiefer. Er entstammte der rechten Seitenmoräne des Lauteraargletschers, welche zur dunkleren, aus Schiefer und Gneisen bestehenden linken Hälfte der grossen Mittelmoräne wurde. Das geschichtete Gestein hielt den mechanischen Kräften der Fliessbewegung auf die Dauer nicht stand: Der Block zerfiel auf seiner Reise in mehrere Stücke. 1923 fand Paul-Louis Mercanton fast 5 km unterhalb der Stelle des einstigen «Hôtel des Neuchâtelois» ein Bruchstück mit den eingeritzten Initialen LA von Louis Agassiz. Wo die Teilstücke heute liegen, ist unbekannt. Das Bruchstück mit den Initialen LA wird im Alpinen Museum in Bern aufbewahrt.

Abbildung 17: Flugaufnahme des Unteraargletschers im August 2004. Seine Länge vom Abschwung (A) bis zum offenen Zungenende (E) beträgt noch knapp 5 km, über 2 km weniger als zu Hugis Zeiten. Die Endzunge des Gletschers ist vollständig von den vereinten Mittelmoränen bedeckt. An den Eisabbrüchen (E) ist jedoch zu sehen, dass der Schuttbelag nur dünn ist. Das sich vom See her begrünende Gletschervorfeld misst schon gut 1 km. Der Hugiblock (H) liegt ca. 500 m vor dem Eisrand. (Foto: Jürg Alean)

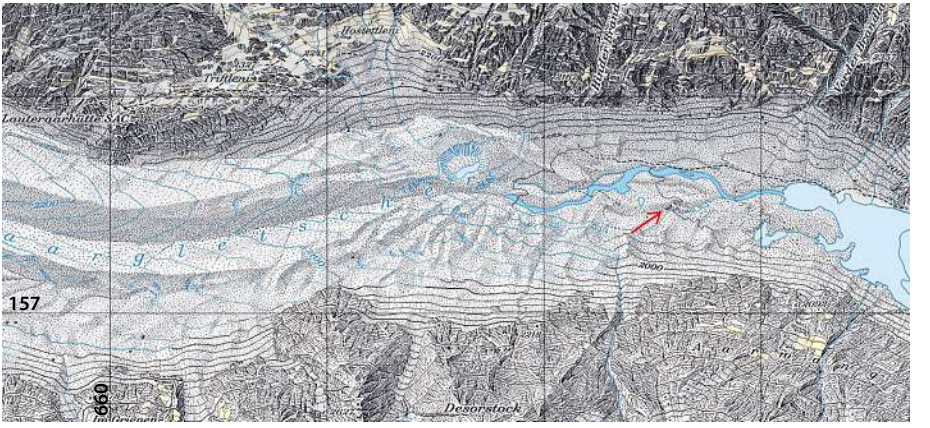


Abbildung 18: Die Landeskarte 1 : 25 000 von 2009 zeigt mit einer doppelten Signatur zwei besonders grosse Blöcke im heutigen Gletschervorfeld: den Hugiblock und seinen etwas kleineren Begleiter. (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA 15 063])

Verdankung

Dem Redaktor der «Mitteilungen», Herrn Dr. Thomas Burri, spreche ich besten Dank aus für seine überaus hilfreiche Mitarbeit bei der Fertigstellung dieses Artikels. Ihm verdanke ich die Idee und die Beschaffung der Abbildungen 1, 2, 7, 8, 9 und 10.

Literatur

Agassiz, Louis 1840: Etudes sur les glaciers, Neuchâtel. Reprinted for Dawsons of Pall Mall, Neuchâtel 1966. Deutsche Ausgabe «Untersuchungen über die Gletscher». Solothurn 1841.

Agassiz, Louis 1847: Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels. Paris: V. Masson; Leipzig: L. Voss.

Balmer, Heinz 1969: Jean de Charpentier, 1786–1855. Gesnerus 26 Heft 3/4, Sauerländer Aarau.

Balmer, Heinz 1970: Ignaz Venetz, 1788–1859. Gesnerus 27 Heft 3/4, Sauerländer Aarau.

Balmer, Heinz 1974: Louis Agassiz, 1807–1873. Gesnerus 31 Heft 1/2, Sauerländer Aarau.

Charpentier, Jean DE 1841: Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône. Lausanne.

Desor, Eduard 1844: Excursions et séjours dans les glaciers et les hautes régions des Alpes, de M. Agassis et de ses compagnons de voyage, Imprimerie de Henri Wolfrath, Neuchatel: Kissling j.-J.; Paris: Maison L.

Grber, Eduard & Schmalz Karl Ludwig 1948: Findlinge. Berner Heimatbücher Nr. 34, Paul Haupt Bern.

Gos Charles 1928: L'hôtel des Neuchâtelois. Une épisode de la conquête des Alpes. Librairie Payot.

Hugi, Franz Joseph 1830: Naturhistorische Alpenreise. Amiet-Lutiger, Solothurn.

Kraftwerke Oberhasli AG 1968: Unteraargletscher, Bewegung des Hugiblocks 1 : 1–000, KWO No. 9293.

Schweizerische Geologische Kommission 1972: Geologische Karte der Schweiz 1 : 500 000.

Venetz, Ignaz 1833: Mémoire sur les variations de la température dans les Alpes suisses, rédigé en 1821, publié en 1833, Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.

Ueli Gruner[1], Cornelia Brönnimann[1]

Felsstürze und Klimawandel – Auswertung historischer Daten aus dem Kanton Bern

Einleitung

Bilder von spektakulären Felsstürzen schaffen es in der Schweiz bis in die Hauptausgabe der Tagesschau und bis auf die Frontseiten der Zeitungen. Solche Bilder prägen das Bewusstsein der Öffentlichkeit, und meist ist auch gleich der Schuldige gefunden: Die Klimaerwärmung soll es sein, welche dafür verantwortlich ist. Und je wärmer es wird, desto mehr Felsstürze soll es geben.

Nur: Stimmt diese Schuldzuweisung? Was wissen wir heute aus wissenschaftlicher Sicht über die Einflüsse von Temperatur, Niederschlag, Wind sowie über den Auftauprozess von Permafrost auf das Verhalten des Gebirges und somit auf Sturzprozesse? Was zeigen Statistiken über Sturzprozesse im Kanton Bern aus? Was zeigen uns historische Daten von Sturzereignissen, auch in Bezug auf das frühere Klima? Und nicht zuletzt: Welche Rolle spielen die Medien?

Witterung und Auslösemechanismen

Faktor Temperatur

Betrachten wir zuerst den Einfluss der Temperatur auf die Entfestigung des Gebirges[2] und somit auf die Auslösung von Felsstürzen. Dank präzisen, permanenten Bewegungsmessungen in offenen Trennflächen von Felspartien mit sogenannten Telejointmeter[3] sind diese Mechanismen heute sehr gut bekannt: Der Vergleich solcher Kluftmessungen mit Temperaturaufzeichnungen zeigt, dass sich bei instabilen Felspartien von kleiner bis mittlerer Grösse die Klüfte und Risse bei kalten Temperaturen öffnen und bei wärmeren Temperaturen wieder schliessen (Gruner 2008). Grund dafür ist, dass sich das Gesteinsmaterial bei Kälte zusammenzieht (Kontraktion) und sich die Kluft damit öffnet. Bei Wärme dehnt sich das Gestein aus und die Kluft schliesst sich. Gute Beispiele dafür finden sich bei der rund 1 000 m³ umfassenden Felsplatte «Balmi» im Brüniggebiet, direkt über der Nationalstrasse N8 *(Abb. 1+2)*, oder beim etwa 100 000 m³ grossen Felspaket «Gstryfets

[1] Dr. Ueli Gruner, Dr. Cornelia Brönnimann, Geologiebüro Kellerhals + Haefeli AG, Bern

[2] Unter dem Begriff «Gebirge» werden kleine Felsköpfe oder Felsplatten von einigen wenigen m³ bis zu sehr grossen Felspartien von weit über 100 000 m³ verstanden.

[3] Ein Telejointmeter ist ein Gerät, das permanent Distanzmessungen in einer Kluft macht, d.h. Aufzeichnungen über die Öffnung bzw. Schliessung einer Kluft.

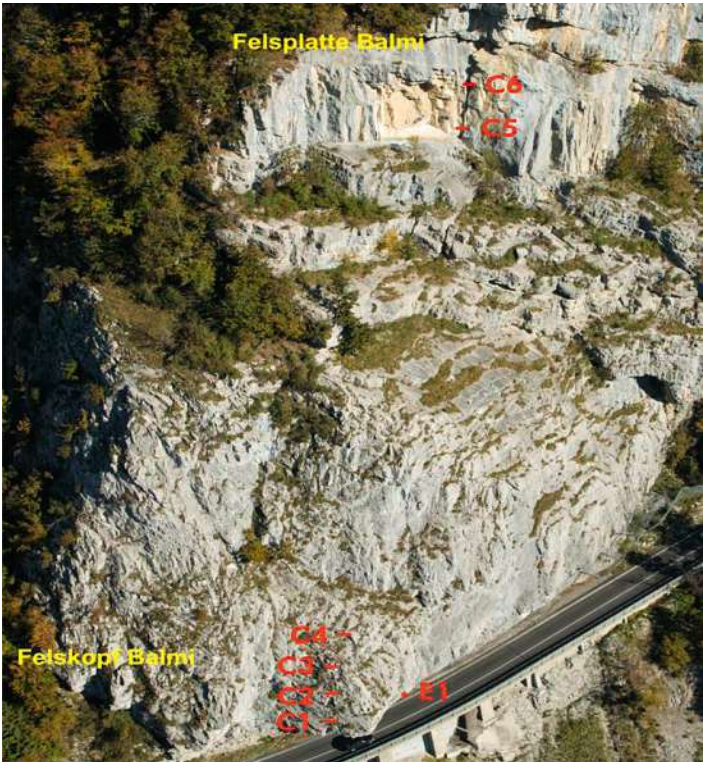


Abbildung 1: Felsplatte «Balmi» oberhalb der Nationalstrasse N8 (Brüniggebiet) mit Lage der beiden Telejointmeter C5 und C6.

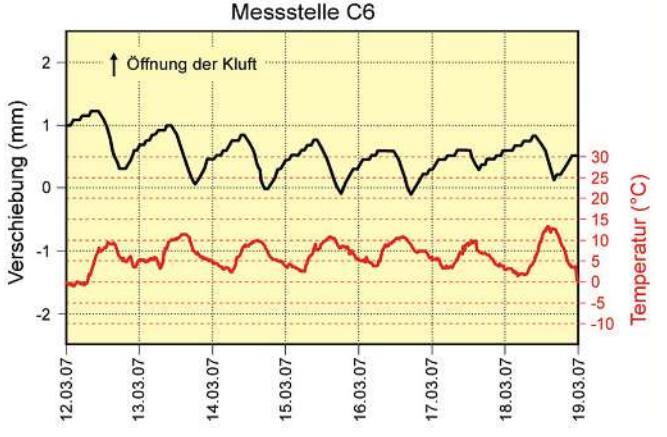


Abbildung 2: Aufzeichnungen des Telejointmeter C6 an der Felsplatte «Balmi» im Brüniggebiet: Die täglichen Temperaturschwankungen bewirken Felsbewegungen bis zu 1 mm.

Birg» oberhalb der BLS-Bergstrecke Frutigen – Kandersteg *(Abb. 3+4)*. Je nach Lage und Ausbildung des Gesteins können in Klüften Tagesschwankungen von bis zu 1 mm und Bewegungen zwischen Winter und Sommer von mehreren Millimeter auftreten. Für hartes, sprödes Gestein sind das bereits beträchtliche Beträge.

Verschiedene Messungen haben dabei gezeigt, dass solche Kluftöffnungen bei zunehmend tiefen Temperaturen z.T. sogar exponentiell steigen (Krähenbühl 2004). Dies bedeutet, dass der Bewegungsschub einer instabilen Felspartie vor allem in kalten Zeiten stattfindet. Oder anders ausgedrückt: Je kälter der Winter ist, desto mehr findet die Entfestigung statt und desto grösser ist die Gefahr eines Absturzes, wenn im Frühjahr das Eis schmilzt und Schmelzwasser in die Kluft dringt. Nach milden Wintern, wie dies in den letzten Jahren der Fall war, ist die Anzahl von Sturzereignissen in der Regel bedeutend geringer als z.B. nach einem strengen Winter wie 2009/2010. Das wird jeder Strasseninspektor einer Bergregion bestätigen.

Felsmechanisch kann das Phänomen dieser temperaturbedingten Gebirgsentfestigung wie folgt erklärt werden: Die täglichen und auch jährlichen Temperaturschwankungen führen zu dauernden Belastungs- und Entlastungszyklen in einer Kluft und somit zu einer allmählichen Schwächung des Gebirges. Dies bewirkt, dass der Ansatzpunkt einer Kluft allmählich weiter gegen unten verläuft, womit weitere Gesteinsbrücken zerstört werden und die Kohäsion abgebaut wird. Das Gebirge entfestigt sich bzw. einzelne Felsteile lösen sich vom stabilen Teil ab. Bei grossen instabilen Felspartien von deutlich über 100 000 m^3 gehen die Bewegungen im Winter allerdings häufig zurück, weil bei solchen Felspaketen der Wassereintrag für eine Bewegung ausschlaggebend ist (vgl. unten). Diese Felsmassen machen, wie es bereits der bekannte Geologe Albert Heim in seinem Standardwerk «Bergsturz und Menschenleben» (1932) formulierte, einen «Winterschlaf».

Faktor Wasser

Wasser in Form von Regen oder schmelzendem Schnee spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Gebirgsentfestigung, indem in den Klüften ein Wasserdruck aufgebaut werden kann. Auch hier ist jedoch eine differenzierte Betrachtung angebracht: Kleine oder mittelgrosse Felspartien reagieren meist kaum oder sogar überhaupt nicht auf einen Wassereintrag, wie automatische Aufzeichnungen von Felsbewegungen zeigen. In *Abbildung 5* wird dies erneut am Beispiel der instabilen Felsplatte «Balmi» im Brüniggebiet und in *Abbildung 6* am Beispiel des «Gstryfets Birg» im Kandertal illustriert. Selbst bei extremen Niederschlagsereignissen wie im August 2005 oder im Sommer 2007 registrierten die Sensoren keine relevanten Bewegungen. (Die vor allem in der *Abb. 5* [Messstelle C6, Brünig] aufgezeichneten Postniederschlags-Bewegungen sind auf einen deutlichen Temperaturrückgang zurückzuführen.) Konsultiert man die Ereignisdokumentation

Abbildung 3: Labiles Felspaket «Gstryfets Birg» (ca. 100 000 m³) oberhalb der Eisenbahnlinie der BLS (Lötschberg-Nordrampe) mit Lage des Telejointmeter N.

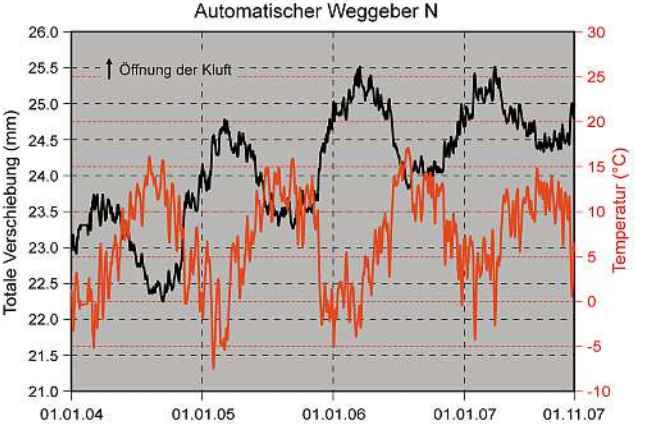


Abbildung 4: Aufzeichnungen des Telejointmeter N am labilen Felspaket «Gstryfets Birg» (Lötschberg-Nordrampe): Die jahreszeitlich bedingte Deformation beträgt rund 2 mm.

des Bundes (BAFU) vom Katastrophen-August des Jahres 2005, so sieht man, dass nach diesem schweizweit aufgetretenen, extremen Niederschlagsereignis in der ganzen Schweiz zwar über 5000 Rutschungen[4] registriert wurden, jedoch nur gerade ein Dutzend Sturzprozesse[5] (Gruner 2012).

Etwas anders verhält es sich bei grossen, instabilen Felsmassen von deutlich über 100 000 m³: Hier ist – ebenfalls dank permanenten Aufzeichnungen mit Sensoren – bekannt, dass der Wassereintrag ein entscheidender Motor der Bewegung und möglicherweise auch der Auslöser eines Absturzes sein kann. Ein illustratives Beispiel dafür war die rund 250 000 m³ umfassende, instabile Felsmasse «Chapf» bei Innertkirchen im Haslital, welche anfangs dieses Jahrtausends die Grimselstrasse gefährdete. Diese grosse Felsmasse reagierte bei Schneeschmelze und Niederschlägen jeweils stark mit einer Talwärtsbewegung. Auf einen 2001 durchgeführten Wässerungsversuch in den offenen Spalten der Felsmasse, mit dem Zweck einer künstlichen Sturzauslösung, reagierte der instabile Fels mit Bewegungen von bis zu 8 cm pro Tag (Brasser & Gruner 2002). (Da die zugeführte Wassermenge aus Gebirgsbächen nach zwei Wochen stark zurückging, nahmen auch die Bewegungen rasch wieder ab. Deshalb wurde die Felsmasse später sprengtechnisch abgetragen.) Ein Blick auf die bekannten historischen Bergstürze mit einer Kubatur von über 1 Mio. m³ zeigt zudem, dass rund die Hälfte der insgesamt 60 zuverlässig dokumentierten Grossereignisse auf extreme Niederschläge bzw. Nassperioden zurückgeführt werden konnte (Gruner 2006). Am besten bekannt ist sicher der Bergsturz von Goldau aus dem Jahr 1 806, als rund 36 Mio. m³ Gestein nach einer wochenlangen Regenphase abglitt und 457 Menschen unter sich begrub.

Faktor Frost-Tau-Zyklen

Ein wichtiger Faktor bei der Schwächung des Gebirgszusammenhaltes sind die Frost-Tau-Zyklen. Das Wechselspiel zwischen Kälte (Gesteinskontraktion), Eisdruck, Eishaftung und letztlich auch Wasserdruck bei der Schneeschmelze fördert den Verwitterungsprozess und bewirkt eine Ermüdung von Gesteinsbrücken und -verzahnungen. Es erstaunt deshalb nicht, dass solche andauernde Wechsel vor allem nach der Kälte im Frühjahr zu vermehrten Sturzereignissen führen. Diese

[4] Unter dem Begriff Rutschung wird eine hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegung von Hangteilen aus Fest- und/oder Lockergestein verstanden.

[5] Als Sturzprozess wird das Ablösen von Felspartien bezeichnet, welche mehrheitlich frei fallend oder springend in die Tiefe stürzen. Bis zu einem Durchmesser von 0.5 m spricht man von Steinschlag, bis zu einem Volumen von 100 m³ von Blockschlag. Ein Felssturz hat ein Volumen zwischen 100 m³ und 1 Mio. m³. Erst bei einem Volumen von über 1 Mio. m³ spricht man von einem Bergsturz.

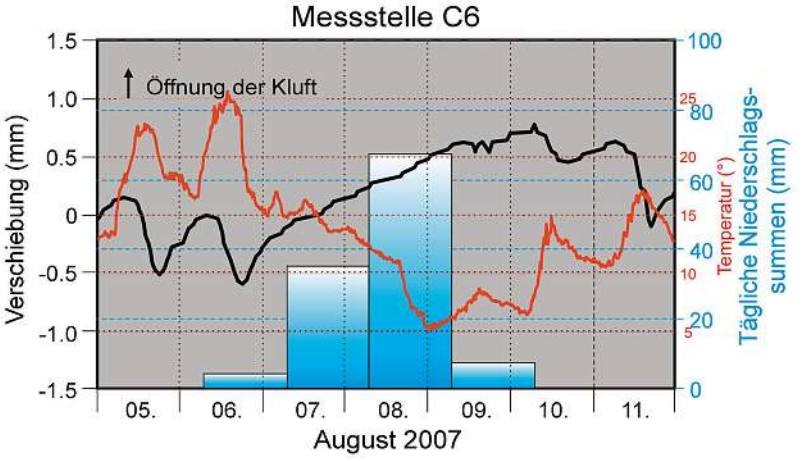


Abbildung 5: Aufzeichnungen des Telejointmeter C6 an der Felsplatte «Balmi» (Brüniggebiet): Der Starkregen von anfangs August 2007 (67 mm) hatte keinen Einfluss auf die Felsbewegungen.

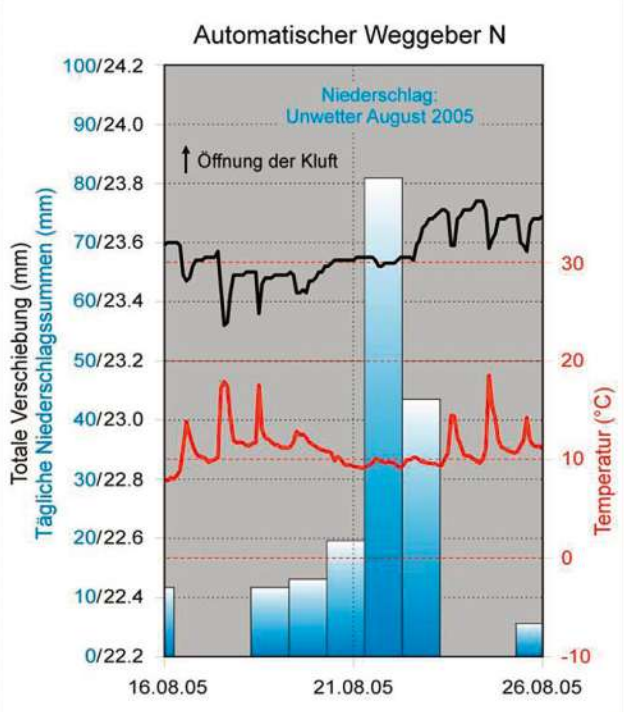


Abbildung 6: Aufzeichnungen des Telejointmeter N am labilen Felspaket «Gstryfets Birg» (Lötschberg-Nordrampe): Die extremen Niederschläge im Rahmen des Unwetters vom August 2005 wirken sich nicht auf die Deformation aus.

sind jedoch vorwiegend von geringer Grösse (Stein- und Blockschlagschlag). Die Häufigkeit und die Dauer der Frost-Tau-Zyklen spielen somit eine wichtige Rolle bezüglich des Auftretens eher klein-volumiger Sturzprozesse.

Faktor Wind

Ein nicht zu unterschätzender Auslöser für eine Sturzereignis ist der Wind: Bei Sturmböen kann der Winddruck im Wurzelbereich von grossen Bäumen zu einer Felsauflockerung und letztlich zu einem Felssturz führen. Vorarbeiten für einen Sturz machen die Wurzeln häufig selbst, in dem sie durch ihr Wachstum erste Mikrorisse verursachen, was später bei fortlaufendem Wurzeldruck zu einer weiteren Rissöffnung und letztlich zu relevanten Felsinstabilitäten führen kann. Solche windbedingte Sturzereignisse geschehen vorwiegend in den Sommermonaten und betreffen meist eher kleinere Felsmassen.

Auftauender Permafrost

Eine wichtige Grösse bei Sturzprozessen, insbesondere bei Felsstürzen, ist auch der auftauende Permafrost. Dieser Faktor ist in den letzten Jahren vermehrt in den Brennpunkt gelangt – man könnte ihn als eigentlichen Sündenbock bezeichnen. Vor 50 Jahren als Begriff noch unbekannt, wird seit einigen Jahren bald jedes Naturereignis in den Alpen kausal mit Permafrost in Zusammenhang gebracht. Der Begriff wird teilweise fahrlässig verwendet, so dass sogar der «Wetterfrosch» von Radio SRF1 die Felsstürze von 2012 bei Gurtnellen (oberhalb der SBB-Linie) – notabene auf einer Höhe von nur rund 800 m ü. M. gelegen! – auf das Auftauen von Permafrost infolge Klimawandel zurückführte. Unbestritten ist, dass in warmen Sommermonaten auftauender Permafrost lokale Ereignisse auslöst, dies v.a. in nordseitigen Höhenlagen ab 2500 bis 3000 m ü. M. Gut feststellbar war dies z.B. in den heissen Sommern 2003, 2006 oder auch 2015. Das Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) führt Statistiken, welche auf eine Vielzahl von meist kleineren Sturzaktivitäten in diesen Monaten im Hochgebirge hinweisen. Dass damit auch Routen im Hochgebirge betroffen sind, liegt auf der Hand. Allerdings hat nicht jedes Ereignis auf dieser Höhe mit auftauendem Permafrost zu tun. Je nach geologischen Eigenschaften sind auch im Hochgebirge über 2500 m ü. M. ganz «normale» Witterungsfaktoren wie Temperatur und Frost-Tau-Wechsel für solche Felsstürze verantwortlich. Dies kann im Frühjahr der Fall sein oder auch nachweislich im Hochsommer, nach einem markanten Kälteeinbruch mit Schnee bis in tiefe Lagen. Zudem – das ist für die Bevölkerung entscheidend – stellen Felsstürze aus den hochgelegenen Permafrostgebieten kaum eine Gefährdung für Verkehrswege oder Siedlungen dar, es sei denn, die Sturzmassen werden infolge sekundärer Prozesse in Form von Murgängen mobilisiert und gelangen auf diese Weise bis in den Siedlungsbereich. Ein gutes Beispiel diesbezüg-

lich ist der Spreitgraben bei Guttannen (Haslital): Nach einem grösseren Felssturz aus dem Permafrostgebiet am Ritzlihorn haben sich aus dem Ablagerungsraum dieses Sturzereignisses immer wieder grosse Murgänge ereignet, welche bis über die Kantonsstrasse hinaus ins Tal gelangten (Tobler et al. 2012).

Auch wenn der Begriff Permafrost noch relativ jung ist, so ist doch das Auftauen des Gebirges in grosser Höhe kein neues Phänomen: Seit dem Ende der Kleinen Eiszeit vor rund 150 Jahren ist diese Auftaugrenze infolge der Erwärmung um rund 200 m angestiegen. Das Phänomen von Sturzprozessen aus dem auftauenden Gebirgsbereich hat somit bereits vor der massiveren Klimaerwärmung der letzten Jahrzehnte bestanden. Zudem zeigt die Statistik aus den rund 15 000 aufgezeichneten Naturgefahrenereignissen des Kantons Bern, dass – anders als dies von der Öffentlichkeit wahrgenommen werden dürfte – davon weniger als 100 Ereignisse auf den auftauenden Permafrost zurückzuführen sind (Heinrich Buri, ehemaliger Leiter der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern, in einem Interview mit der Berner Zeitung vom 31. Januar 2014).

Sturzereignisse im Kanton Bern

Allgemeines

Um die Dynamik von witterungs- bzw. auch klimabedingten Felssturzereignissen besser einordnen zu können, wurden möglichst viele Sturzereignisse bezüglich Kubatur und bezüglich saisonaler Verteilung bzw. Häufung ausgewertet. Dazu diente der bei der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern in einer Datenbank dokumentierte Ereigniskataster, welcher insgesamt 1571 Sturzereignisse enthält (Zeitraum: ab 16. Jahrhundert bis Ende 2015). Der wesentlichste Teil dieser dokumentierten Ereignisse fand im Siedlungsraum bzw. in Gebieten mit wichtigen Infrastrukturanlagen statt.

Aus den entsprechenden Dokumentationen konnten allerdings lange nicht alle Daten verwendet werden. So fehlten z.B. nicht selten Angaben über die Kubaturen im Ablagerungsbereich oder diese waren unklar («viele Blöcke»). Bei anderen Ereignissen – dies war vor allem bei früheren Stürzen der Fall – fanden sich keine Angaben über den genauen Zeitpunkt (Monat/Jahreszeit) des Sturzes. Im Weiteren wurden Einträge z.B. mit Datum 1. Januar oder 1. April gutachterlich auf ihre Plausibilität hin überprüft. (Der 1. Januar wurde meist eingegeben, wenn man nur das Sturzjahr kannte; doch nur in seltenen Fällen fand das Ereignis genau an diesem Datum statt. Der 1. April wurde in den meisten Fällen als Frühjahrssturz eingegeben, wenn der genaue Monat nicht bekannt war.)

Eine ähnliche Auswertung, allerdings ausgehend von Sturzereignissen in der ganzen Schweiz, wurde bereits im Jahr 2012 gemacht (Gruner 2012).

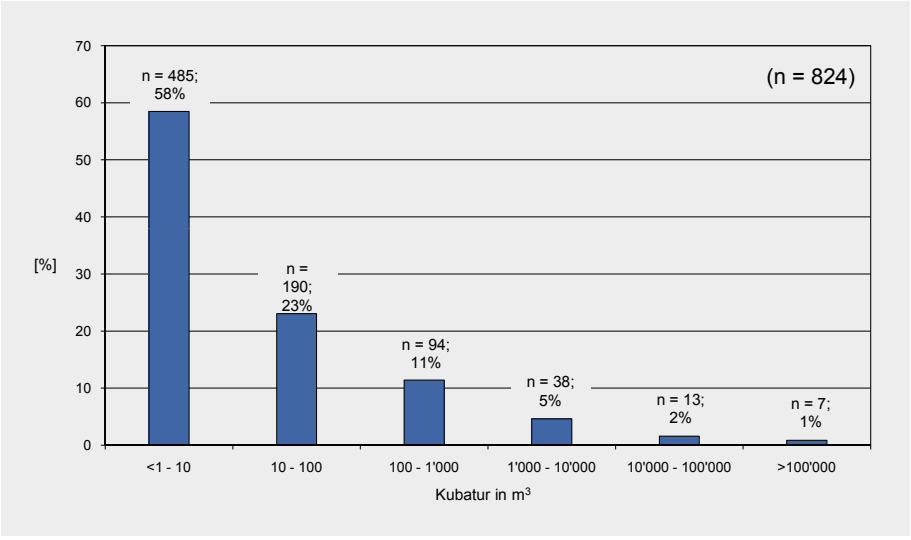


Abbildung 7: Statistik der Sturzereignisse im Kanton Bern bezüglich Kubatur *(16. Jahrhundert bis Ende 2015).*

Abbildung 8: Am 28. April 2016 stürzten um 9.00 Uhr, nach Schneeschmelze und einer kalten Nacht, rund 50 m³ Fels direkt auf die Sustenpassstrasse unterhalb von Gadmen. Der grösste Block hatte ein Gewicht von etwa 30 Tonnen.

Kubatur

Von den 824 auswertbaren Sturzereignissen im Kanton Bern (mit bekannten Angaben über Kubaturen) hatten rund 58 % ein Volumen von <1 bis 10 m³ und rund 23 % eine Kubatur zwischen 10 und 100 m³ *(Abb. 7)*. Mit anderen Worten: Ca. $^4/_5$ aller ausreichend dokumentierten Felsausbrüche waren Kleinereignisse unter 100 m³ (Stein- und Blockschlag; Beispiel eines solchen Ereignisses in *Abb. 8*). Sturzereignisse mit über 100 m³ wurden insgesamt rund 150 ausreichend dokumentiert (ca. 20 %); davon hatten rund $^2/_3$ (knapp 100 Ereignisse) eine Kubatur zwischen 100 und 1 000 m³ (als Felsstürze bezeichnet). Summiert man die Kubaturen der einzelnen Klassen (gemäss *Abb. 7*) grob auf, dann wird ersichtlich, dass die sehr kleinen häufigen Ereignisse volumenmässig einen fast verschwindend kleinen Anteil ausmachen im Vergleich mit den grösseren Kubaturenklassen (> 10 000 m³ bzw. > 100 000 m³). Wie das Foto eines Sturzereignisses von Kandergrund zeigt (*Abb. 9*), können zudem grosse Einzelblöcke von 150 m³ einen hauptsächlichen Volumenanteil eines solchen Ereignisses ausmachen.

Saisonale Verteilung der Stürze

Die Dokumentation der Ereignisse im Kanton Bern ergab, dass von den 1281 auswertbaren Sturzereignissen mit Angaben über die Jahreszeit rund 60 % aller Ereignisse im Winter (Dezember, Januar, Februar) und im Frühling (März, April, Mai), also in den vorwiegend kalten Jahreszeiten stattfanden *(Abb. 10 und 11)*. Der Herbst war die weitaus ereignisärmste Saison mit lediglich 13 % der Ereignisse. Dies deckt sich im Wesentlichen auch mit der schweizweiten Statistik (Gruner 2012). Schaut man sich die bezüglich Saison und Ablagerungsvolumen auswertbaren Stürze an (total 806; *Abb. 12*), ist gut erkennbar, dass im Winter in erster Linie sehr kleine Ereignisse stattfinden und dass Felsstürze (ab 100 m³) im Frühling am häufigsten sind.

Die monatliche Auswertung von 1224 auswertbaren Sturzereignissen zeigte, dass Stürze im Kanton Bern schwergewichtig in den Monaten Februar und März stattfanden *(Abb. 13)*. Die Monate mit der weitaus geringsten Sturzaktivität sind der September und der Oktober. Im Hochsommer lässt sich eine etwas erhöhte Anzahl von Sturzereignissen erkennen.

Der Grund für Hauptaktivitäten der Stürze in den Frühlingsmonaten liegt bei den eingangs erwähnten Witterungsfaktoren, d.h. bei der Kälte und bei den Frost-Tau-Wechseln mit ihren destabilisierenden Wirkungen. Statistische Untersuchungen in Norwegen und v.a. in Österreich (Sass & Oberlechner 2012) kommen zu ganz ähnlichen Schlüssen. Auch die umfangreichen Forschungen von Baumverletzungen durch Sturzkörper in den Alpen zeigen, dass sich solche Steinschläge in den höher gelegenen Gebieten in erster Linie während der Zeiten mit geringem Wachstum, also im Winter/Frühling ereignen und nicht im Sommer (vgl. Schneuwly & Stoffel 2008). Warme Zeiten, sei es im Winter oder auch im Sommer, führen somit

Abbildung 9: Im Dezember 2007 stürzten nach Schneeschmelze und anschliessender Kälte zwei Grossblöcke von rund 150 m³ und 100 m³ in den Talboden von Kandergrund.

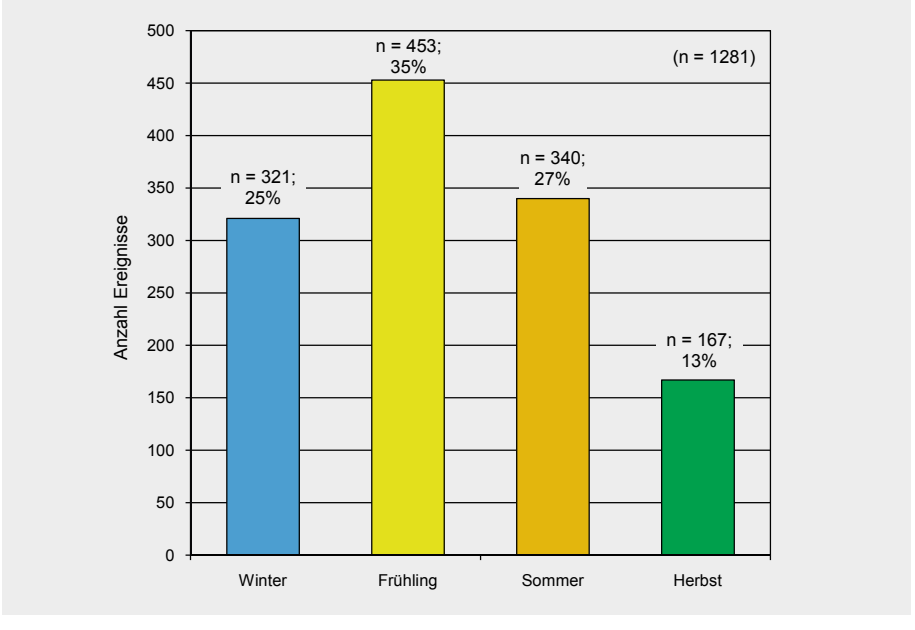


Abbildung 10: Statistik der Sturzprozesse im Kanton Bern bezüglich saisonaler Verteilung.

Abbildung 11: Starke Temperaturwechsel zwischen –10°C und +5°C lösten im Januar 2009 in einer Felswand bei Innertkirchen einen Abbruch von rund 300 m³ aus, wobei ein Block eine Baracke stark beschädigte.

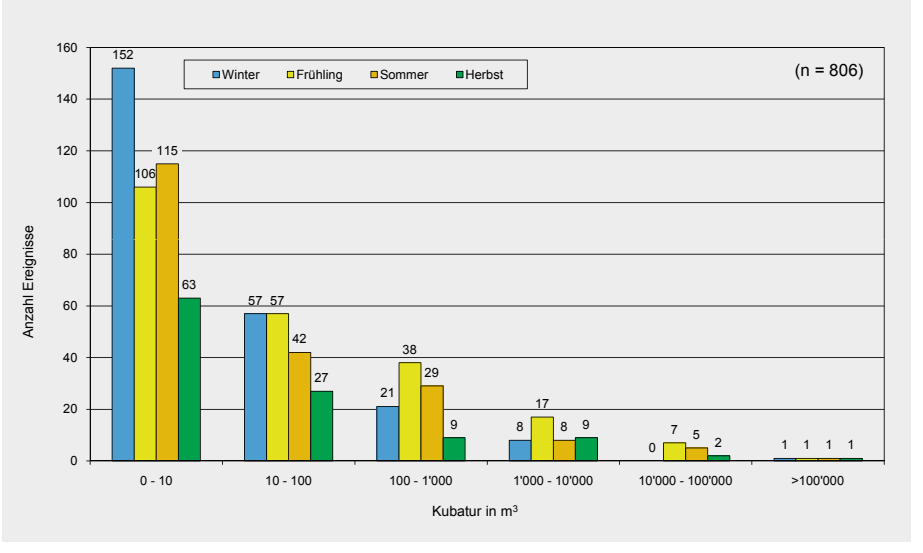


Abbildung 12: Saisonale Verteilung der Sturzprozesse im Kanton Bern in Bezug auf die Ablagerungskubaturen.

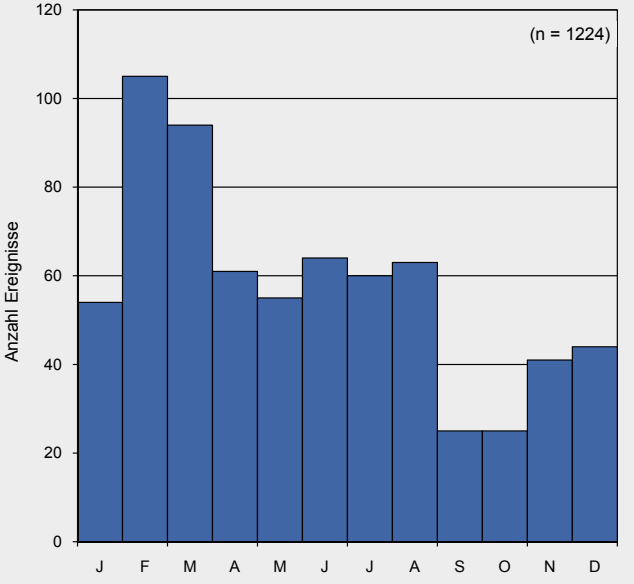


Abbildung 13: Monatliche Verteilung der Sturzprozesse im Kanton Bern.

tendenziell zu einer Beruhigung der Fels- und Gebirgsbewegungen, mit Ausnahme der Gebiete mit auftauendem Permafrost. Die etwas erhöhte Anzahl von Sturzereignissen im Hochsommer weist auf eine Kumulation von verschiedenen Auslösemechanismen wie Wind, auftauender Permafrost und Kälteeinbrüche in den Alpen hin.

Eine im Jahr 2004 durchgeführte Auswertung von historischen Sturzereignissen in der Schweiz zeigt, dass sich der Zeitpunkt der Stürze in der relativ kalten Periode zwischen 1950 und 1980 mit strengen Wintern vermehrt in die kältere Jahreszeit verlagerten (Gruner 2004). Allerdings – dies ist hier hervorzuheben – erlauben die zur Verfügung stehenden Daten keine Aussage über eine Abnahme oder Zunahme der Stürze in der jüngeren Vergangenheit. Der Einfluss durch die Klimaerwärmung lässt sich somit nicht quantifizieren.

Interessant ist im Weiteren die Auswertung der historisch dokumentierten Bergstürze von mehr als 1 Mio. m^3: Solche Grossereignisse fanden überwiegend in den Sommer- und Herbstmonaten statt, also in einem Zeitraum, in welchem der Niederschlag in den Alpen normalerweise als Regen fällt. Wie oben gezeigt, führt der Faktor Wasser bei grossen Volumen infolge des hohen Bergwasserdruckes zu Bewegungsschüben, was vermehrt Instabilitäten auslöst. Schaut man noch weiter

zurück auf datierte, prähistorische Bergstürze, fällt auf, dass in den bekannten Warmperioden der letzten 10 000 Jahre solche Grossstürze seltener vorkamen als in feuchtkalten Perioden (Gruner 2006).

Fazit

Die Klimaerwärmung führt, anders als dies gemeinhin angenommen wird, tendenziell eher zu einer Beruhigung der Felsbewegungen und somit zu einer geringeren Zahl von Sturzprozessen. Dies gilt insbesondere auch für warme Winter, bzw. den darauf folgenden Frühling. Massgebend für die Häufigkeit der Stürze ist jedoch, nebst dem Ausmass der Winterkälte, auch die Häufigkeit von Frost-Tau-Wechseln im Frühjahr, bzw. im Sommer im Hochgebirge. Ein warmer Sommer bedeutet, dass sich die Felsbewegungen tendenziell beruhigen und die Verwitterungsprozesse in den rückhaltenden Trennflächen unbedeutender sind. Allerdings verstärkt eine lang anhaltende Sommerwärme den Auftauprozess des Permafrostes, was vermehrt Stürze im Hochgebirge auslöst. Diese können für den Bergsteiger heikel werden, für Siedlungen und Infrastrukturanlagen stellen sie jedoch nur selten eine Gefahr dar (allenfalls in Form von Sekundärprozessen als Murgänge). Da Niederschläge keinen relevanten Einfluss auf die Häufigkeit von Felsstürzen haben, wirkt sich eine klimabedingte Änderung des Niederschlags nicht auf das Auftreten von kleinvolumigen Sturzereignissen aus. Klimaveränderung ist ein langsamer Vorgang, genau wie auch der Destabilisierungsprozess im Fels. Somit wird sich die Anzahl der Stürze auch in Zukunft nur wenig ändern und sich vornehmlich nach den Witterungsverhältnissen in den einzelnen Jahreszeiten richten.

Zu guter Letzt: Die Rolle der Medien

Wie kommt es zur verbreiteten «Wahrnehmung» in der Bevölkerung, dass es immer mehr Felsstürze gibt? Ein wesentlicher Grund dafür liegt sicher auch bei der Berichterstattung in den Medien. Wenn Geologen z.B. vor 30 Jahren einen kleinen Felssturz beurteilten, fand das Ereignis in kaum einem Medium ein grosses Echo. Heute dagegen geben Online-Portale oder Privatfernsehen ein Entgelt für exklusive Fotos oder Tipps über einen Sturzblock auf einer Strasse oder einen Felssturz. Und der sofort herbeigerufene Geologe erscheint nicht selten erst nach den Fernsehreportern vor Ort. Zudem hat in den letzten Jahren allgemein eine Sensibilisierung der Bevölkerung für Naturgefahren stattgefunden. Nicht zuletzt auch, weil unsere Gesellschaft zunehmend eine Null-Risiko-Toleranz einnimmt. Dies kann dann durchaus zu einem Emporschaukeln der beiden Phänomene – der Berichterstattung in den Medien und der Angst vor Risiken – führen.

Danksagung

Die Autoren danken Christian Pfammatter der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern für das zur Verfügungstellen der Daten.

Literaturverzeichnis

Brasser, J.P.; Gruner, U., 2002: Behebung der Felssturzgefahr bei Innertkirchen durch zwei Grosssprengungen. Felsbau 20/5, 195–202.

Gruner, U., 2004: Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft. Bull. angew. Geologie, 9/2, 23–37.

Gruner, U., 2006: Bergstürze und Klima in den Alpen – gibt es Zusammenhänge? Bull. angew. Geologie, 11/2, 25–34.

Gruner, U., 2008: Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. Proceed. Conf. Interprävent 2008, 2, 147–158.

Gruner, U., 2012: Sturzereignisse in der Schweiz – eine statistische Auswertung. Swiss Bull. angew. Geol. 17/2, 63–71.

Heim, A., 1932: Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahresschrift der Natf. Ges. Zürich, 20.

Krähenbühl, R., 2004: Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz. Bull. angew. Geologie, 9/1, 19–35.

Sass, O.; Oberlechner, M., 2012: Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? Nat. Hazards Earth. Syst. Sci., 12, 3209–3216.

Schneuwly, D. M.; Stoffel, M., 2008: Treering based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci., 8, 201–211.

Tobler, D.; Kull, I.; Hählen, N., 2012: Gefahrenmanagement der Murgänge im Spreitgraben, Guttannen. Swiss Bull. angew. Geol. 17/2, 53–61.

Buchvorstellung

Klima und Mensch – eine 12 000-jährige Geschichte

Heinz Wanner

Die Naturforschende Gesellschaft in Bern NGB unterstützt gelegentlich mit ihrem bescheidenen Vermögen Publikationen zu naturwissenschaftlichen Themen aus der Region Bern oder Publikationen von Berner Forschern. Ein Projekt, welches von der NGB Unterstützung erfuhr, ist das Buch «Klima und Mensch – Eine 12 000-jährige Geschichte», vom bekannten Berner Klimaforscher Heinz Wanner.

Das neue Buch von Heinz Wanner setzt sich mit den letzten 12 000 Jahren Klima und Menschheitsgeschichte auseinander. Glücklicherweise bleibt er dem Titel nicht ganz treu, sondern wagt durchaus auch einen Blick über die Grenzen des Holozäns hinaus. Doch was unterscheidet dieses neue Buch von anderen, der inzwischen zahlreichen Bücher zum Thema Klima? Es ist v.a. die selbst auferlegte Fokussierung auf die letzten 12 000 Jahre und – für mich besonders spannend – der starke Bezug zur Menschheitsgeschichte

Ein wichtiger Teil des Buches beschreibt und erläutert die Grundlagen des Klimas und der Klimaforschung: Wie definieren sich Wetter und Klima, wie kann man die Klimaentwicklung der fernen Vergangenheit rekonstruieren, welche Methoden existieren zu diesem Zweck, wo liegen die Grenzen, wohin geht die Zukunft? Diesem Teil sind drei von fünf Kapiteln des Buches gewidmet. Die Kapitel sind gut geschrieben und vorbehaltslos kann man dieses Buch als idealen Studienbegleiter empfehlen. Während die Fotos durchgehend erstklassig sind, hätte ich mir bei der einen oder anderen Grafik oder Schwarzweisskarte einen etwas aufwendigeren Stil gewünscht, doch vieles wurde vom Autoren bewusst schlicht gehalten.

Doch um nochmals auf die Frage zurück zu kommen, was denn das Buch von anderen unterscheidet. Die Antwort liegt für mich im Kapitel 5 verborgen – dem Kapitel, bei dem es um mögliche Wechselwirkungen zwischen Klima und Kulturen geht. Dieser Teil macht Lust auf mehr und es bleibt zu hoffen, dass in einer allfälligen englischen Ausgabe, oder in einer zweiten deutschen Auflage, dieser Teil noch ausgebaut wird. Natürlich sind die Grundlagen der vorherigen Kapiteln der Schlüssel zum Verständnis, aber dieser starke und direkte Bezug zur Kulturgeschichte der Menschen unterscheidet das Buch wesentlich von anderen Konkurrenzprodukten und macht die Lektüre zu einem Gewinn.

Das Buch richtet sich niveaumässig hauptsächlich an Naturwissenschaftler und an ein naturwissenschaftlich interessiertes Publikum.

Heinz Wanner, Klima und Mensch – eine 12 000-jährige Geschichte
Haupt Verlag, 272 Seiten, gebunden
ISBN 978-3-258-07879-3

Aus den Vereinsannalen der NGB – Beiträge aus den Mitteilungen 1879

Herrlich zu lesen im Zeitalter des Handy …

Vorzeigung eines Telephons mit Rufapparat

T. Rothen

Vorgetragen in der allgemeinen Sitzung den 12. Juli 1879.

Seit der ersten Vorführung des Telephons hat dasselbe vielfache Wandlungen erfahren, durch die theils besser artikulirte Töne, theils eine Verstärkung derselben erzielt wurde. Namentlich aber ist es gelungen, das Telephon zum Aufruf brauchbar zu machen. Früher war man genöthigt, ein besonderes Läutwerk mit Batterie anzubringen und mit Hülfe eines Umschalters bald Läutwerk, bald Telephon in die Leitung einzuschalten. Durch die neuesten Erfindungen auf dem Gebiet der Téléphonie sind diese lästigen Zuthaten vollständig überflüssig geworden …

… Eine Schraube mit excentrischer Scheibe, die sich zwischen den beiden Schenkeln des Hufeisenmagnets drehen lässt, gestattet eine mikrometrische Annäherung der Spulen an die vibrirende Platte und umgekehrt, wodurch die Telephone jeder Entfernung und verschiedenen Sprech- und Hörverhältnissen angepasst werden können. Am vorzüglichsten gelungen ist jedoch der Rufapparat, der bei grosser Einfachheit die gestellte Aufgabe in durchaus genügender Weise löst. In der Oeffnung des Schallbechers sitzt ein Hartgummirohr von etwa 8 cm Länge, in dessen Innerem sich eine Metallzunge befindet, ähnlich den Zungen in Feuerhörnern. Ausserdem enthält das Rohr eine kleine Messingkugel, welche mit ihrem Gewicht auf der schwingenden Platte ruht. Wird in das Rohr geblasen, so versetzt einmal der Schall die Platte in heftige Bewegungen, in Folge welcher das Kügelchen zu tanzen beginnt und damit zugleich den Oscillationen einen noch heftigeren Charakter verleiht. Die hiedurch hervorgerufenen Induktionsströme sind so stark, dass sie die Platte der andern Station in laut hörbare Schwingungen versetzen, die um ihres eigenthümlichen Toncharakters willen selbst in einem grösseren Saale bei ziemlichem Geräusch nicht leicht überhört werden können. Das auf der Platte der Ankunftsstation aufliegende Kügelchen trägt ebenfalls dazu bei, den reproduzirten Schall noch weiter zu verstärken. Wird dann die Röhre abgenommen, so kann sofort die gewöhnliche Korrespondenz beginnen.

Mit den genannten Neuerungen ist das Telephon in das Stadium eines wirklich praktischen Instruments eingetreten und es steht seiner ausgebreiteten Verwendung kein Hinderniss mehr entgegen.

Wenn die Vorstellungskraft nicht ausreicht

Asterios, die Physiognomie des Mondes:

Versuch einer neuen Deutung im Anschluss an die Arbeiten von Mädler, Nasmyth und Carpenter, Nördlingen, 1879

Prof. Dr. Perty

So betitelt sich die Schrift eines Pseudonymen Verfassers, welcher, angeregt durch die Beobachtungen der letzten Decennien, eine seiner Meinung nach neue Erklärung der Bildung des Erdenmondes nicht nur, sondern auch der Weltkörper überhaupt geben will. Der Anblick des Mondes schon mit freiem Auge lässt die ausserordentlichen Unterschiede zunächst heller und dunkler Stellen wahrnehmen, die bedeutenden Niveauunterschiede ahnen und das Fernrohr schliesst einen überraschenden Reichthum in der Oberflächengestaltung auf.

… Trotz der Untersuchung mit immer bessern Teleskopen gehen aber die Erklärungen der unzähligen Ringgebirge, Krater, Rillen, Strahlensysteme etc. des Mondes rücksichtlich ihrer Entstehung weit auseinander; wir sehen wohl deren gegenwärtige Beschaffenheit, sind aber zu keiner zweifellosen Gewissheit über ihr Werden gelangt. Asterios formulirt seine angeblich neue Hypothese S. 10 also: «Jene Wallebenen, jene Ringgebirge, jene cylindrischen Schlünde und Abgründe, jene kleinen Krateröffnungen und Gruben, sie sind sammt ihren Nebenerscheinungen entstanden durch den Fall kosmischer Körper. Sphärische Weltkörper von viel kleineren Dimensionen als der Mond waren es, die mit ihm zusammenstiessen und seiner Oberfläche diese Gestalt gaben.» Kleinere, sehr harte Meteore schlugen an noch weichen Stellen des anfänglich feurigflüssigen Mondes tiefe Löcher; das sind die unzähligen Gruben ohne sichtbaren Umfassungsrand.

… Wer kann aber glauben, dass z. B. das mare crisium von 5850 Quadratmeilen Fläche, das mare imbrium von 16 000 Quadratmeilen mit ihren riesigen Randgebirgen durch Einschlagen kosmischer Körper hätten entstehen können, ohne dass letztere den Mond aus seiner Bahn geworfen oder wohl gar zerschellt hätten? Der Verfasser hat ferner übersehen, dass viele Ringgebirge in Reihen liegen, also wohl auf Spalten wie irdische Vulkane. Dass die Erde nicht eine ähnliche «blatternnarbige zerschossene Physiognomie» darbietet, wie der Mond, sucht Asterios dadurch zu erklären, dass sie wegen ihrer viel bedeutenderen Grösse länger glühend und flüssig blieb, als der Mond, einstürzende Weltkörper daher ganz in ihr Inneres verschlungen wurden, wozu auch die etwa sechsmal stärkere Schwerkraft der Erde wirkte. Doch möchten, glaubt er, auf der Erde auch noch einige Spuren auf sie gefallener Weltkörper aufzufinden sein, wie vielleicht im tyrrhenischen Meer ein grosser Meteorit eingeschlagen hat, wo dann der Vulkan von Stromboli aufgebrochen sei, während der Halbkreis von Gebirgen Siciliens und Calabriens durch Seitendruck entstanden wäre …

Das Mare Cirisium und das Mare Imbrium werden heute übrigens einhellig als Einschlagskrater aufgefasst.

Rassismus – zum Glück nicht wertend

Ueber die anthropologische Untersuchung der Schulkinder,

mit besonderer Berücksichtigung der schweizerischen Erhebung

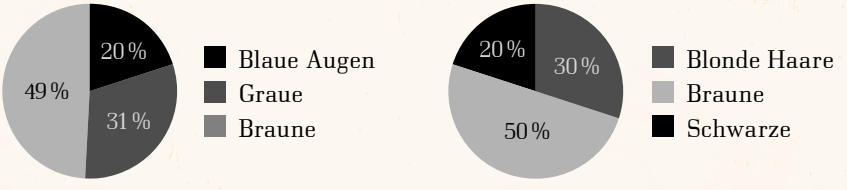
G. Beck

Es beruhen bekanntlich die Unterschiede der menschlichen Rassen auf gewissen Eigenthümlichkeiten des Schädelbaues, in zweiter Linie aber auch auf der Farbenverschiedenheit der Augen, der Haare und der Haut. Auf den Schädel hat man bisher bei allen wissenschaftlichen Untersuchungen und vor Allem bei der Aufstellung von Rassen und Typen so ausschliesslich Rücksicht genommen, dass die Begründung eines abweichenden Verfahrens wohl nicht überflüssig ist. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die aus Beobachtungen und Messungen einzelner weniger Schädel aufgestellten fünf Menschenrassen, die heute noch in allen Schulbüchern figuriren, wegen der sich stets mehrenden Ausnahmen die Mannigfaltigkeit in der menschlichen Spezies nicht mehr gehörig zum Ausdruck bringen und dass eine viel weitgreifendere Spaltung eintreten müsse … In der Schweiz nahm sich die naturforschende Gesellschaft der Sache an und setzte in ihrer Jahresversammlung zu Bex, 1877, eine anthropologische Kommission unter dem Vorsitze des Herrn Prof. Hoffmann von Basel nieder … So gross auch die Schwierigkeiten in einem Lande waren, wo ein einheitliches, mächtiges Ministerium fehlt und wo Alles der Freiwilligkeit überlassen bleiben müsste, so war doch das Resultat der Bemühungen ein äusserst erfreuliches …

Wenn ich es nun unternehme, Ihnen einige Mittheilungen über die bis jetzt zu konstatirenden Resultate der schweizerischen Aufnahme zu machen, bin ich genöthigt, zum bessern Verständniss auf die Hauptergebnisse der deutschen, speziell der bairischen Untersuchung zurückzugreifen. In Deutschland finden sich drei reine Typen vor, zwei helle und ein dunkler:

I. Typus — blaue Augen, blonde Haare, helle Haut.
IL Typus — graue Augen, blonde Haare, helle Haut.
III. Typus — braune Augen, braune Haare, dunkle Haut.

Die Israeliten, welche bei der Erhebung noch besonders berücksichtigt wurden, weisen auf:



Somit besitzen die Israeliten in Baiern vorwiegend helle Augen (51 %) und dunkle Haare (70 %) … Die Vorliebe der Israeliten für technische Lehranstalten hat sogar den Einfluss gehabt, dass sich die Realschulen entschieden dunkelfarbiger erweisen als die humanistischen Institute.

Wenden wir uns nun zur Betrachtung der Resultate, welche die Untersuchung in der Schweiz bis jetzt ergeben hat … Wie in Deutschland, so finden sich auch hier die schon erwähnten drei reinen Typen neben einer grössern Zahl von Mischformen vor … Der blonde Typus zeigt von allen die schwächste Vertretung und nimmt, wie in Deutschland, von Norden nach Süden stetig an Zahl ab.

Für den blonden Typus glauben wir die Berechtigung dieser Voraussetzung aus der Geschichte begründen zu können. Im zweiten und dritten Jahrhundert n. Chr. drängten die vom Norden gekommenen, von allen Schriftstellern als blond bezeichneten Alemannen, stets kecker nach Süden, bis ihnen endlich durch die vielfach überwundenen Römer die Gegend zwischen Neckar, Lahn, Aare und Reuss überlassen wurde.

Was nun den östlichen braunen Strom anbetrifft, so erinnern wir an folgende historische Thatsachen:

Das jetzige Graubünden war schon vor der Besitznahme des übrigen Landes durch die keltischen Helvetier von den Rhätiem bewohnt, einem Volke, das nach den Aussagen von Livius und Plinius und nach den Forschungen von Niebuhr und Mommsen in einem bestimmten Abstammungsverhältniss zu den alten Etruskern gestanden hat … Es deckt sich somit das Verbreitungsgebiet dieses Volkes annähernd mit unserm östlichen brünetten Strom und ist desshalb die Vermuthung, dass wir in diesen Gegenden die Reste des alten rhätischen Volkes vor uns haben, nicht ganz von der Hand zu weisen. Es hätte sich demnach dieser Stamm in nördlicher Richtung über den Bodensee hinaus bis gegen die Donau verbreitet, wo er mit einem andern dunklen Strome, der längs der Donau heraufkam, zusammentraf.

… Noch viel schwieriger ist wohl die Frage nach der Abstammung des in der Schweiz so zahlreich auftretenden grauen Typus zu entscheiden. Für Deutschland lässt sich hierin allerdings der slavische Einfluss nachweisen; für unser Land aber ist diese Erklärung wohl kaum gültig, und müssen wir auch hierbei, bis Spezialstudien vorliegen, die Antwort schuldig bleiben. Folgende Möglichkeiten sind aber in's Auge zu fassen:

Entweder haben die Alemannen, in deren Verbreitungsgebiet die grauen Augen am meisten vertreten sind, schon starke Prozente dieses Typus aufgewiesen, oder aber sie haben im Lande eine grauäugige Bevölkerung (Helvetier?) angetroffen, welche sich bis heute erhalten hat, oder endlich, es ist die grosse Zahl der grauen Augen als eine Art von Albinismus in Folge der Vermischung des blauen und braunen Typus zu betrachten. …

Wahrscheinlich wären solche Erhebungen heute, im Zeitalter der Globalisierung und maximaler Mobilität, sehr viel schwieriger durchzuführen. Und auch wenn sich die Studie der wissenschaftlichen Korrektheit bemüht und an keiner Stelle wertend ist, wissen wir leider nur allzugut, wohin die Diskussion um reine blauäugig-blonde Rassen schliesslich geführt hat.

Bernische Botanische Gesellschaft Jahresbericht 2015

1. Vorstand

Im Vorstand amtierten während des Jahres 2015:

Präsident:	Steffen Boch
Kassiererin:	Regine Bläknker
Sekretärin:	Rita Gerber
Exkursionen:	Adrian Möhl
Redaktor:	Andreas Gygax
Webmasterin:	Muriel Bendel
Beisitzer:	Brigitta Ammann
	Stefan Eggenberg
	Beat Fischer
	Christine Föhr
	Urs Känzig
	Daniel Moser
	Beatrice Senn-Irlet
	Andreas Stampfli
Mitgliederbetreuung:	Rita Gerber
Rechnungsrevisoren:	Max Göldi
	Urs Kalbermatten

2. Vorträge

5. Januar 2015
Herbert Sauerbier, Lauchringen, Deutschland
Alpenpflanzen – Endemiten von den Ligurischen Alpen bis zum Wiener Schneeberg

In den Alpen kommen etwa 4000 Pflanzenarten vor. Mit etwas über 400 Arten liegt der Anteil an Endemiten bei etwa 10 %. Im Vortrag wurden die schönsten und seltensten Arten und Unterarten präsentiert. Außerdem wurde auf die Verbreitung und die Gefährdung der einzelnen Arten eingegangen.

19. Januar 2015
Sabine Tschäppeler, Stadtgrün Bern
Von der Sonora-Wüste in Arizona bis in die Redwood-Wälder Nordkaliforniens

Der äusserste Westen der USA ist von Extremen geprägt und diese beeinflussen die Muster der Vegetation: Andauernd hohe Luftfeuchtigkeit an den Küsten, extreme Trockenheit im Landesinnern, von Meereshöhe bis zu den 4000er- Gipfeln der Sierra Nevada, aber auch permanente seismische Aktivitäten. Eine Reise von Arizona bis Kalifornien spürte diesem Muster nach. Gezeigt wurden Kontraste, Strukturen und Blütenpracht der typischen Vegetationseinheiten, von den baumähnlichen Saguaro-Kakteen in der Sonora-Wüste an der Grenze zu Mexiko, durch die Colorado- und Mojave-Wüste, nordwärts durch das Owens Valley bis zu den Küsten-Redwoods in Nordkalifornien.

2. Februar 2015
Adrian Möhl, Info Flora, Bern
Banksien und Kängurupfoten – Flora und Vegetation von Westaustralien

Westaustralien ist eines der fünf mediterranen Gebiete der Erde und weist eine äusserst reiche Flora und abwechslungsreiche Vegetation auf. Besonders die Familie der Proteaceen (Silberbaumgewächse) ist hier besonders vielfältig vertreten. Dieser botanische Rundgang zwischen Perth und Esperance war eine Ergänzung zu den letztjährigen Vorträgen zur Flora und Vegetation Ostaustraliens.

26. Januar 2015
Jacqueline van Leeuwen & Pim van der Knaap, Institut für Pflanzenwissenschaften, Uni Bern
Blumen Mittelamerikas

Die Tropen sind ein dankbares Reiseziel für Hobby-Botaniker, die sich für einheimische und invasive Pflanzen in der Natur sowie in Gärten interessieren. Es wurde eine bunte Auswahl von Blütenpflanzen und Farnen sowie dem einen oder anderen Moos, Vogel oder weiteren Tieren von verschiedenen Reisen von Costa Rica, Florida und den Karibischen Inseln gezeigt.

16. Februar 2015
Christophe Bornand, Info Flora, Bern
Wo wächst was im Waadtland?

Seit 10 Jahren sammeln die waadtländischen FloristikerInnen ihre Funde in einer gemeinsamen Datenbank, die zurzeit 62 000 Fundmeldungen enthält. Da die Verbreitung der meisten Arten aber dennoch ungenügend bekannt ist, lancierte die botanische Gesellschaft Waadt im Jahr 2013 ein Projekt namens «Atlas de la flore vaudoise». Der Vortrag vermittelte einen Überblick über die floristischen

Schätze des Kantons Waadt und zeigte die Herausforderungen eines Inventars von 2000 Arten auf 3212 km² auf. Eine Inspirationsquelle für ein zukünftiges Inventar im Kanton Bern?

23. Februar 2015
Stefan Eggenberg, Info Flora, Bern & Beat Fischer, BOGA, Bern
Botanisieren bei den Griechischen Göttern – Die Pflanzenwelt Kretas

Kreta war bereits bei den Griechischen Göttern ein beliebter Fleck. Sei es der Geburtsort von Zeus, das Labyrinth des Minotauros oder der berühmte Flug von Daidalos und Ikaros, auf dieser grössten griechischen Insel fühlten sich die Götter wohl. Auch der Pflanzenwelt behagt das mediterrane Klima und die bis knapp 2500 m hohen Gebirgsketten. Im Laufe der Zeit entwickelte sich eine enorme Artenvielfalt mit rund 1735 einheimischen Arten, wovon 10 % als endemisch gelten. Aufgrund zweier Reisen im März und Mai 2014 vermittelten die Vortragenden einen Eindruck in diese göttliche Flora und zeigten die bezaubernde Felsen-Tulpe *(Tulipa saxatilis)*, die mitten im Orchideen-Hotspot des Omalos-Plateaus gedeiht, die Griechische Lotwurz *(Onosma graecum)* am Berg Jouchtas, der auch schlafender Zeus genannt wird, den Kretischen Ebenholzstrauch *(Ebenus cretica)*, ein Endemit mit rosaroten Blüten oder die Kretische Dattelpalme *(Phoenix theophrasti)*, die nur an wenigen Standorten auf Kreta und an der Südwestküste der Türkei vorkommt.

2. März 2015
Hauptversammlung mit Bücherbörse

26. Oktober 2015
Jalil Noroozi, Department of Botany, Natural History Museum Vienna
The alpine flora and vegetation of the Iranian mountains

Iran ist ein typisches Gebirgsland im Südwesten von Asien. Die alpinen Lebensräume Irans sind über die wichtigsten Gebirgsmassive zerstreut und befinden sich meist über 3000 m ü. M. Die alpine Flora ist irano-turanischen Ursprungs, vermischt sich aber mit Elementen aus Anatolien, dem Hindu Kusch und dem Kaukasus, mit jeweils 23 %, 20 % bzw. 19 % gemeinsamen Arten. Aus diesen Lebensräumen sind ca. 700 alpine Gefässpflanzen bekannt und mehr als 50 % davon sind endemisch oder subendemisch für den Iran. Durch mannigfaltiges Relief und Klima haben sich verschiedenste Vegetationstypen entwickelt. Die subalpine Zone der Iranischen Gebirge wird durch Doldenblütler-Vegetationstypen geprägt, während die weiträumigen alpinen Gebiete aus Dornpolster-Rasen aufgebaut sind, neben denen sich Schneetälchen in Mulden und Rinnen etablieren. Die hochalpinen und nivalen Schuttfluren zeigen eine sehr lückige, artenarme Vegetation. Hier sind die Artenzusammensetzung und das Vegetationsmosaik stark abhängig von der Dauer der Schneebedeckung.

2. November 2015
Jürg Stöcklin, Botanisches Institut, Universität Basel
Pflanzenvielfalt und botanische Delikatessen Nordwestchinas

Nordwestchina, insbesondere die im Norden an Tibet angrenzende Gebirgslandschaft der «Drei Parallel fliessenden Ströme» (Saluen, Mekong, Yangtse) ist berühmt für seine mystischen Landschaften (Shangri-La) und seine enorme Biodiversität. Im 19. und anfangs des 20. Jahrhunderts sammelten «Pflanzenjäger» aus Europa und Amerika u.a. hier einen massgeblichen Teil unserer Zierpflanzen. In diesem Gebiet kommen über 6000 Arten vor (auf 0,2 % der Landfläche Chinas). Gattungen wie *Rhododendron, Primula, Pedicularis* oder *Meconopsis* haben hier ihr Diversitätszentrum. Der Vortrag war ein Reisebericht über blühende *Rhododendron*-Wälder, die erstaunliche Sikkim-Rhabarber mit ihrem stolzen Blütenstand und über viele andere alpine Pflanzen vom «Dach der Welt».

16. November 2015
Carsten Hobohm, Abteilung Ökologie, Universität Flensburg
Madagaskar – Vegetationszonen, Endemismus und Lösungsansätze zur Erhaltung der Biodiversität

Madagaskar ist eine in vielerlei Hinsicht einmalige Insel im Indischen Ozean. Während mehrwöchiger Forschungsreisen hat der Referent versucht, die verschiedenen Vegetationseinheiten mit ihren Endemiten, die anthropogenen Einflüsse in der Natur und mögliche Lösungen von Naturschutzproblemen zu studieren und zu verstehen. Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen des Endemismus und zur Verbreitung von Endemiten wurden ausgewählte Vegetationszonen, insbesondere der Trockenbusch und Regenwald im Süden Madagaskars, einige Tier- und Pflanzenarten (u.a. Lemuren, Reptilien, Orchideen, Palmen), sowie aktuelle Lösungsansätze zur Erhaltung der Biodiversität auf der Insel vorgestellt. Dabei stellte er auch die Frage, ob die globale Erwärmung und invasive Arten tatsächlich eine massive Bedrohung für die Diversität darstellen.

14. Dezember 2015
Heinz Schneider, Botanisches Institut der Universität Basel
Bergwälder in Ecuador – ein Schutzprojekt des Botanischen Gartens Basel

Die ecuadorianischen Berg- und Nebelwälder an der Grenze zu Kolumbien gehören zu den arten- und endemitenreichsten Lebensräumen der Welt. In einer Höhenlage von 1500 bis 2000 m erreicht die Vielfalt der Epiphyten ihr Maximum. Jeder Baum ist dort ein kleiner Botanischer Garten. In diesen relativ dünn besiedelten Gebieten sind immer noch grosse Primärwälder vorhanden, die nun aber zunehmend gerodet werden, um zwei Jahre lang Fruchtkulturen zu betreiben. Danach ist der Boden zerstört. Der Wald gehört den lokalen Bauern und kann

relativ günstig erworben werden. Der Botanische Garten Basel engagiert sich seit 2013 für den Auf- und Ausbau eines dringend benötigten Waldreservates (Dracula Forest Reserve).

3. Exkursionen:

24. April 2015
Floreninventar Bern – Das Patenquadrat zu Bümpliz Süd
Leitung: Andreas Gygax und Adrian Möhl

10. Mai 2015
Die Frühaufsteherin – zu Pulmonaria helvetica nach Cheyres
Leitung: Markus Bolliger

4. Juli 2015
Die Schöne – zu Onosma helvetica nach Ollon (VD)
Leitung: Saskia Godat und Adrian Möhl

11. Juli 2015
Die Umstrittene – zu Arenaria bernensis auf die Bürglen
Leitung: Michael Jutzi

22. August 2015
Die Seltene – zu Artemisia nivalis ans Unterrothorn
Leitung: Arnold Steiner

5. September 2015
Zimtrose und Zebraspinne
Leitung: Beatrice Lüscher und Adrian Möhl

4. Mitgliederstand

377 Mitglieder per 31. Dezember 2015

5. Sitzungsberichte

Die Sitzungsberichte 2014 sind erschienen und wurden den Mitgliedern zusammen mit dem Winterprogramm zugestellt.

6. Exkursionsberichte

24. April 2015
Floreninventar Bern – Die BBG wird Gotte! Das Patenquadrat zu Bümpliz Süd
Leitung: Andreas Gygax und Adrian Möhl

Eigentlich ist es eines der spannendsten Quadrate in Bern: da gibt es Bahnhofanlagen, Quartiere, leere Hinterhöfe, einen Friedhof, einen Teich und auch ein Stück Wald. Bisher wurde das Quadrat am Bahnhof Bümpliz Süd höchst stiefmütterlich behandelt. Das sollte sich ändern!

Die BBG wurde neu Gotte von diesem Quadrat und unter Anleitung von Andreas und Adrian startete am 24. April die Kartiersaison im BBG Patenquadrat. Diese Exkursion richtete sich sowohl an Cracks (man durfte sich auch eine eigene Strasse «schnappen» und versuchen, die anderen an dem Abend zu überbieten) als auch an alle diejenigen, die zu Beginn der Saison die Artenkenntnisse etwas auffrischen wollten. Oder eben an alle die, welche gern einmal bei einer Kartierung des Floreninventars Bern dabei sein wollten.

An diesem Nachmittag wurden immerhin 250 verschiedene Arten notiert, so dass aktuell im Quadrat – nach zusätzlichen Begehungen im Sommer – knapp 450 wildwachsende Pflanzenarten bekannt sind.

10. Mai 2015
Die Frühaufsteherin – zu Pulmonaria helvetica nach Cheyres
Leitung: Markus Bolliger (dem Beschreiber der Art!)

Im Rahmen des Endemiten-Exkursionsprogramm hat die erste Exkursion das Ziel Cheyres am Lac de Neuchâtel. Dies ist nicht der ursprüngliche Fundort der erst 1975 beschriebenen Art aber einer der wenigen, an denen sie vorkommt. Unter Leitung des Beschreibers der Art, der sie am 6.5.1975 in einer Schlucht des Bachs Carrouge bei Moudon entdeckt hat, machen wir uns auf den Weg vom Bahnhof Cheyres Richtung Wald.

Bevor wir im Wald ankommen, stellt uns Markus Bolliger die Art *Pulmonaria helvetica* (Schweizer Lungenkraut) vor, die er im Rahmen seiner Dissertation neu beschrieben hat:

Ausdauernde Pflanze mit aufrechtem Wuchs, Blätter leicht getupft, hellgrün, Stängelblätter schmal-lanzettlich, in Lauf des Sommers bildet die Pflanze sterile Rosetten mit typischen Sommerblättern, die schraubig angeordnet sind; die Herbstblätter besitzen die ausgeprägtesten Kurzborsten auf der Blattoberseite; Pflanze borstig aber weich behaart; Blätter blassgrün gefleckt oder ungefleckt, Winter- und Sommerblätter mit unterschiedlicher Form, Blüten hellrosa, später blau, heterostyl, in armblütigen Doppelwickeln; Fruchtstände hängend; Samen werden durch Ameisen verbreitet; die Chromosomenzahl ist 2n = 24. Die Art ist auf wenige Wuchsorte zwischen Genfer- und Neuenburgersee beschränkt. Sie

Abbildung 1: Schweizer Lungenkraut *(Pulmonaria helvetica)*

muss nach der letzten Eiszeit durch komplizierte Hybridisierungsvorgänge und nachfolgende Stabilisierung der Chromosomenzahl entstanden sein. Die stattliche, bis 60 cm hohe Staude ist sowohl morphologisch (Borstenmuster der Blätter) als auch karyologisch (Chromosomenzahl) als eigenständige Art gut charakterisiert.

Auf idyllischem Weg folgen wir dem Bachlauf hinauf in den Wald und entdecken zahlreiche Individuen der gesuchten *Pulmonaria*-Art. Der erst kürzlich ausgelichtete Buchenmischwald bietet auch viele andere Arten, die zurzeit sehr viel Licht erhalten und entsprechend üppig gedeihen.

Nachdem wir dem Weg bis ans Ende gefolgt sind, kehren wir um und folgen dem Wanderweg hinauf Richtung Champs d'Amont und entdecken weitere Standorte mit *Pulmonaria helvetica*. Oben am Waldrand angelangt, folgen wir dem Strässchen Richtung Haut Carro bis zu einem aufgelassenen Steinbruch mit kleinen Weihern bei Pra Bosset, wo wir einerseits Mittagspause machen, andererseits die Pflanzen vor Ort bestimmen. Die unterschiedlichen Lebensräume von trockenen Felspartien bis zu den Weihern bringen eine erstaunliche Fülle von Arten hervor.

Auf dem Rückweg durch den Wald nach Cheyres sehen wir einen recht intensiv genutzten Laubmischwald, der trotzdem eine erstaunliche Fülle von krautigen Pflanzen im Unterwuchs enthält. Gut erkennbar ist, wie die Waldnutzung positiv gesteuert werden kann. Einzelne Altbäume, vor allem Buchen, werden stehen gelassen, was vom BAFU mit Beiträgen gefördert wird, um die Artenvielfalt zu erhalten. Diese Überständer bieten im Mittelwald vor allem vielen Tieren und Pilzen Lebensraum und Nahrung. Gut zu sehen sind aber auch die Spuren der Waldnutzung, die vor allem die schweren Maschinen hinterlassen. Die dabei vor allem in den Waldwegen entstehenden temporären Kleintümpel sind aber nicht nur negativ, bieten sie doch einzelnen Amphibien, wie z.B. Gelbbauchunken für eine gewisse Zeit einen Ersatzlebensraum.

Am Schluss dann noch einige Exemplare von *Orchis militaris* (Helm-Knabenkraut) am Waldrand, ein weiterer Hinweis, dass sich das Gebiet durch ein warmes Klima auszeichnet.

Literatur

Bolliger, Markus (1982): Pulmonaria in Westeuropa. Vaduz, Cramer (Phanerogamarum monographiae; Tom. 8)

Arten am Weg:

Pulmonaria helvetica
Lamium galeobdolon subsp. montanum
Lonicera xylosteum
Carex pendula
Tamus communis
Geranium robertianum s.str.
Convallaria majalis
Polygonatum multiflorum
Fagus sylvatica
Cardamine amara
Stellaria media
Helleborus foetidus
Cirsium vulgare
Cirsium palustre
Clematis vitalba
Atropa bella-donna
Ajuga genevensis
Arum maculatum
Stachys sylvatica
Euphorbia cyparissias
Hypericum perforatum s.str.
Acer campestre
Eupatorium cannabinum
Dactylis glomerata
Euphorbia dulcis
Myosotis arvensis
Scrophularia nodosa
Listera ovata
Galium odoratum
Hedera helix
Solanum cf. nigrum
Ajuga reptans
Hippocrepis emerus
Alliaria petiolata
Ranunculus repens
Aegopodium podagraria
Equisetum hyemale
Angelica sylvestris
Tilia platyphyllos
Bromus hordeaceus
Anthoxanthum odoratum
Prunus avium
Dryopteris filix-mas
Paris quadrifolia
Bellis perennis
Veronica chamaedrys
Origanum vulgare
Allium ursinum
Actaea spicata
Stachys alpina
Carex digitata
Lathyrus vernus s.str.
Melittis melissophyllum
Phyteuma spicatum
Ligustrum vulgare
Vicia sepium
Castanea sativa
Neottia nidus-avis
Campanula persicifolia
Hieracium murorum
Luzula sylvatica
Pinus sylvestris
Cardamine flexuosa
Veronica officinalis
Prunella vulgaris
Ranunculus trichophyllus s.str.
Geranium robertianum subsp. purpureum
Saxifraga tridactylites
Erophila verna
Veronica serpyllifolia s.str.
Arenaria serpyllifolia
Geranium pyrenaicum
Silene nutans s.str.
Medicago lupulina
Sanguisorba minor s.str.
Rhinanthus alectorolophus
Helictotrichon versicolor
Bromus erectus s.str.
Hippocrepis comosa
Festuca ovina aggr.
Knautia arvensis
Scabiosa columbaria s.l.
Tragopogon pratensis s.str.
Sorbus torminalis
Sorbus aria
Sorbus mougeotii
Cornus sanguinea
Digitalis lutea

Carex alba
Aruncus dioicus
Orchis militaris
Geranium pusillum
Geranium dissectum
Euonymus europaeus
Cerastium glomeratum
Ranunculus bulbosus
Valerianella locusta
Cardamine hirsuta
Veronica persica
Veronica arvensis
Cymbalaria muralis

Bericht: Barbara Studer

4. Juli 2015
Die Schöne – zu Onosma helvetica nach Ollon (VD)
Leitung: Saskia Godat und Adrian Möhl

Der Sommer 2015 war in vielerlei Hinsicht ausserordentlich. Die BBG hat er zu ausserordentlich seltenen und auf kleinen Raum beschränkte Arten gebracht. Unter dem die Titel «die Schöne» sollte dabei auch einem der vier echten Schweizer Endemiten, der *Onosma helvetica* (Schweizer Lotwurz) einen Besuch abgestattet werden. Ausserordentlich heiss war er auch, dieser Sommer 2015. Und vielleicht der heisseste Tag überhaupt war der 4. Juli. So heiss, dass viele der Exkursionsteilnehmenden frühzeitig «kalte Füsse» gekriegt haben und sich vorsorglich von der Exkursion abgemeldet haben. So war dann das Grüppchen wegen der Sommerhitze auf die Hälfte geschmolzen und nur 7 Teilnehmende fanden sich zur Exkursion in Aigle ein. Auch den Exkursionsleitenden war es für einen Aufstieg in den Bois de la Gleva an diesem Tag etwas zu heiss, und so wurden die ersten Höhenmeter kurzentschlossen mit der Bahn bewältigt.

Abbildung 2: Sicht aus dem Bois de la Gleva.

Eigentlich hätte das Wetter für den «chemin de Provence» gar nicht besser sein können, denn die Hitze liess an diesem Tag so richtig das mediterrane Gefühl aufkommen. Schon nach ein paar Metern gab es im Schatten von *Acer opalus* (Schneeballblättriger Ahorn) und *Pinus sylvestris* (Waldföhre) eine Einführung von Lokalkennerin Saskia Godat zum Gebiet des Bois de la Gleva. Ein sanfter Wind strich durch den Wald während unten im Tal die Hitze zitterte. In den Föhren sangen die Zikaden um die Wette und spätestens jetzt kam ein Feriengefühl auf und die Teilnehmenden fühlten sich nach Südfrankreich versetzt.

Abbildung 3: Blütenstand der Schweizer Lotwurz *(Onosma helvetica)*

Und auch die Botanik liess einen die Hitze etwas vergessen: am Wegrand blühten prächtige Exemplare von Müllers Stendelwurz *(Epipactis muelleri)* und immer wieder liessen sich Pflanzen entdecken, die wir sonst nur aus den Walliser Felsensteppen kennen. Wenn *Ononis pusilla* (Zierliche Hauhechel) im Wallis noch recht häufig ist, so ist er für das Chablais schon eher besonders. Und an den stinkigen Blättern des Faserschirms *(Trinia glauca)* haben sich sicher alle erfreut. Highlight des Tages war natürlich die «Schöne» – *Onosma helvetica*. Die Teilnehmenden konnten viel über die komplizierte Herkunft und Biogeografie der Lotwurz-Arten der Schweiz erfahren. So nimmt man an, dass die Schweizer Lotwurz von hybridogener Herkunft ist, das eine Elternteil mittlerweile aber in der Schweiz ausgestorben ist. Trotz des Hitzesommers war die Schweizer Lotwurz noch in voller Blüte und alle haben gestaunt wie sie an den offenen Stellen im Wald gedeiht, wo der Schotter so heiss war, dass man sich zum Fotografieren nicht mehr hinknien konnte. Im Wald hingegen war es angenehm. Es duftete herrlich nach Harz und ein leichter Wind sorgte für willkommene Abkühlung.

Beim Abstieg durch die Weinberge von Ollon gab es wiederum einige spannende Arten zu entdecken und die vielen Brunnen mit eisig kaltem Wasser luden zu allerhand Spritzereien ein. Natürlich gab solch eine Wanderung auch einen gehörigen Durst und dieser konnte in einem Bistro in Ollon gestillt werden, bevor sich die gute gelaunte Gruppe im gekühlten Zug wieder zurück Richtung Bern machte.

Bericht: Adrian Möhl

11. Juli 2015
Die Umstrittene – zu Arenaria bernensis auf die Bürglen
Leitung: Michael Jutzi

Die dritte Exkursion im Rahmen des Exkursionsprogramms 4 × Endemiten der Schweiz führt zur taxonomisch nicht überall akzeptierten Art *Arenaria bernensis* (Berner Sandkraut) auf die Bürglen. Die Art hat nur ein sehr kleines Verbreitungsgebiet und kommt einzig im Gebiet Gantrisch-Stockhornkette bis ins Freiburgische vor. Die Fundorte im Freiburgischen sind zahlreicher als diejenigen im Kanton Bern.

Trotzdem heisst sie *Arenaria bernensis* und bevorzugt, im Gegensatz zur sehr nah verwandten *Arenaria multicaulis* (Vielstängeliges Sandkraut) eher feuchtere, schattigere Standorte.

Unter der Leitung von Michael Jutzi (Info Flora) machen wir uns auf die Wanderung, die uns von der Unteren Gantrischhütte via Gantrischseeli zum Morgetepass und von dort auf die Bürgle führt.

In der Nähe des Gantrischseeli sehen wir eine der Spezialitäten der Region, *Cochlearia pyrenaica* (Pyrenäen-Löffelkraut). An mehreren Stellen entlang den Bächen finden sich Exemplare, die gerade in Blüte sind. Speziell ist das Verbreitungsgebiet von *Cochlearia pyrenaica*, deren nächste Standorte sich im Eriz und bei Kandersteg befinden.

Abbildung 4: Pyrenäen-Löffelkraut *(Cochlearia pyrenaica)*

Interessant sind im Gantrischseeli selbst, das zum Zeitpunkt der Exkursion einen sehr niedrigen Wasserstand hat, die Blüten von *Ranunculus trichophyllus* s.str. (Haarblättriger Wasserhahnenfuss).

Im Aufstieg Richtung Morgetepass dann die typische Kalkflora der Voralpen. Dazu gehört auch *Arenaria multicaulis*, die nah verwandte Art zu *Arenaria bernensis* aus dem Aggregat von *Arenaria ciliata* (Wimper-Sandkraut). *Arenaria multicaulis* ist in den Nordalpen weit verbreitet und kommt auch punktuell im Jura vor. Als Standort bevorzugt sie sonnige, trockene Rasen auf kalkhaltigen Böden. Im Unterschied zu *Arenaria bernensis* ist ihr Blütenstand immer mehrblütig mit 2–7 Blüten pro Zweig. Die Kronblätter sind 1–1,5 mal so lang wie die Kelchblätter.

Nach der stark vom Kalk geprägten Flora im Aufstieg folgen auf der Südwestseite des Morgetepasses Borstgrasrasen mit *Campanula barbata* (Bärtige Glockenblume), die einen oberflächlich versäuerten Boden anzeigen. Trotzdem enthalten sie eine blumenreiche Flora mit *Nigritella nigra* (Schwarzes Männertreu) und vielen anderen typischen Arten.

Auf dem Gipfel der Bürglen angekommen, machen wir uns auf die Suche nach *Arenaria bernensis* und finden sie auf der Nordseite, einige Meter unterhalb des Gipfels, an ihrem bevorzugten Standort zwischen Moospolstern. Die Art wurde von Claude Favarger ursprünglich als Unterart zu *Arenaria multicaulis* beschrieben. 2013 haben dann Forscher der Universität Freiburg das Chloroplasten-Genom verglichen und ist auch auf abweichende Chromosomenzahlen gestossen. *Arenaria bernensis* ist dodecaploid mit 240 Chromosomen, *Arenaria multicaulis* hat 40 Chromosomen und *Arenaria ciliata* aus derselben Artengruppe hat 40–160 Chromosomen. Trotz der Untersuchung konnte der genetische Zusammenhang nicht restlos geklärt werden, da die Genetik des Zellkerns nicht untersucht wurde. Zurzeit wird *Arenaria bernensis* in den meisten Floren als Synonym zu *Arenaria multicaulis* geführt. Die Gesamtpopulation umfasst nur ca. 4000–6000 Pflanzen. Im Unterschied zu *Arenaria multicaulis* hat *Arenaria bernensis* grössere Blüten, nur 1–2 pro Stängel und oft mehr als 5 Petalen.

Abbildung 5: Berner Sandkraut *(Arenaria bernensis)*

An weiteren spannenden Arten im Gantrischgebiet sehen wir *Tephroseris capitata* (Orangerotes

Abbildung 6: Prachtnelke *(Dianthus superbus)*

Greiskraut, ganz am Ende der Blüte) oder *Oxytropis halleri* s.str. (Gewöhnlicher Haller-Spitzkiel, nur noch mit Früchten).

Ob Endemit oder nicht, der Ausflug auf die Bürglen lohnt sich auf jeden Fall, gibt es doch im Gebiet noch diverse andere Arten zu sehen. Nach dem Abstieg auf demselben Weg und einer Stärkung in der Gantrischhütte machen wir uns zufrieden wieder auf den Heimweg.

Beobachtete Pflanzenarten:

Cochlearia pyrenaica
Saxifraga rotundifolia
Aposeris foetida
Aconitum napellus aggr.
Campanula cochleariifolia
Hieracium murorum
Milium effusum
Rumex alpestris
Polygonum bistorta
Geranium sylvaticum
Phyteuma spicatum
Crepis paludosa
Geum rivale
Veronica urticifolia
Deschampsia cespitosa
Dactylis glomerata
Epilobium alpestre
Knautia dipsacifolia s.str.
Heracleum sphondylium s.l.
Valeriana officinalis

Chaerophyllum hirsutum
Adenostyles alliariae
Chenopodium bonus-henricus
Lamium maculatum
Cynosurus cristatus
Ranunculus trichophyllus s.str.
Pedicularis foliosa
Carlina acaulis s.str.
Briza media
Carduus defloratus s.str.
Polygonum viviparum
Linum catharticum
Dactylorhiza fuchsii
Androsace lactea
Gypsophila repens
Gentiana lutea
Silene vulgaris s.str.
Salix reticulata
Poa alpina
Arenaria multicaulis
Rumex scutatus
Gymnadenia conopsea
Tofieldia calyculata
Cirsium spinosissimum
Rhododendron hirsutum
Valeriana montana
Crepis aurea
Rumex alpinus
Carum carvi
Phleum alpinum
Peucedanum ostruthium
Hieracium pilosella
Campanula scheuchzeri
Pedicularis verticillata
Salix retusa
Phyteuma orbiculare
Hieracium piliferum s.l.
Daphne mezereum
Achillea atrata
Doronicum grandiflorum
Linaria alpina s.str.
Adenostyles glabra
Hedysarum hedysaroides
Caltha palustris
Astragalus frigidus
Dryas octopetala
Bartsia alpina
Ranunculus alpestris
Saxifraga aizoides
Aster bellidiastrum
Arabis alpina s.str.
Hypericum maculatum s.l.
Pulsatilla alpina s.str.
Solidago virgaurea s.str.
Pimpinella major
Allium schoenoprasum
Gentiana bavarica
Plantago alpina
Gentiana purpurea
Ligusticum mutellina
Traunsteinera globosa
Trifolium badium
Soldanella alpina
Saxifraga oppositifolia s.str.
Asplenium viride
Onobrychis montana
Coeloglossum viride
Nigritella nigra aggr.
Viola lutea
Dianthus superbus
Seseli libanotis
Geum montanum
Tephroseris capitata
Bupleurum ranunculoides s.str.
Aster alpinus
Anemone narcissiflora
Oxytropis jacquinii
Hieracium lactucella
Centaurea montana
Oxytropis halleri s.str.
Campanula thyrsoides
Senecio doronicum
Pedicularis oederi
Astragalus australis
Pseudorchis albida
Minuartia verna
Silene acaulis
Anthyllis vulneraria subsp. carpatica
Cerastium alpinum
Trollius europaeus
Antennaria dioica
Leontodon helveticus
Nardus stricta
Primula auricula
Sempervivum tectorum s.l.
Saxifraga paniculata
Campanula thyrsoides
Lotus alpinus
Aconitum napellus aggr.
Crepis pyrenaica

Literatur

Bétrisey, S. & G. Kozlowski (2013): Arenaria bernensis: vers la fin d'une longue controverse. Info Flora, Ausgabe 2013, S. 34–37.

Berthouzoz, M., Maendly, S., Bétrisey, S., Mangili, S., Prunier, P., Lexer, C., & Kozlowski, G. (2013): Some like it cold: distribution, ecology and phylogeny of Arenaria bernensis FAVARGER (Caryophyllaceae) from the western Prealps in Switzerland. Alpine botany, 123(2), 65–75.

Bericht: Barbara Studer

22. August 2015
Die Seltene – zu Artemisia nivalis ans Unterrothorn
Leitung: Arnold Steiner

Die vierte Exkursion im Rahmen des Exkursionsprogramms 4 × Endemiten der Schweiz führt zu einem Punktendemiten, ist doch die Art nur noch vom Unterrothorn östlich von Zermatt bekannt.

Mit einem Spezialisten und Kenner der Zermatter Flora, Arnold Steiner, machen wir uns entlang des vor einigen Jahren angelegten Panoramawegs von der Bahnstation Blauherd auf in Richtung Unterrothorn.

Von 1993–1996 hat sich Arnold Steiner mit Vegetationsaufnahmen in Zermatt beschäftigt. Aus diesen Vorarbeiten ist später seine Dissertation entstanden. Angeregt wurde die exakte Kartierung des botanisch so spannenden Gebietes durch Jean-Claude Praz. Insgesamt vier Studenten haben bei den Kartierungsarbeiten ihre Diplomarbeit erstellt. Das Gebiet Sunegga-Blauherd wurde damals von Silvia Reist und Stefan Krähenmann bearbeitet.

Abbildung 7: Blick vom Blauherd zum Matterhorn

Arnold Steiner hat später als Mitarbeiter eines Planungsbüros für die Gemeinde Zermatt die Einrichtung der Schutzgebiete vorgenommen. In dieser Zeit ist auch die Dissertation, die eine Beschreibung der Naturgebiete um Zermatt war entstanden. Zermatt hat 293 km^2 Gemeindegebiet, bearbeitet wurden in erster Linie die Gebiete mit Vegetation, insbesondere diejenigen mit seltenen Arten. Dazu wurden ca. 250 Einheitsflächen ausgeschieden und darin die Hauptvegetationstypen notiert sowie alle anderen vorkommenden Vegetationstypen.

Zermatt ist ein Ort mit zahlreichen seltenen und speziellen Pflanzenarten und -gesellschaften. Einzelne Arten sind in viel grösserer Höhe zu finden als an anderen Orten.

Zermatt liegt in einem grossen Talkessel, der fast rund herum von über 4000 m hohen Gipfeln umgeben ist. Einzig am Talausgang nordwärts geht es bergab. All die umgebenden Gipfel waren in den Eiszeiten Nunatakker, die nicht vergletschert waren und so den Pflanzen als Zufluchtorte gedient haben.
Sunegga-Findeln ist das trockenste Gebiet in dieser Höhenlage, wo sich eine sehr spezielle Flora entwickelt hat.

Geologisch ist Zermatt geprägt von sehr stark durchmischten Gesteinstypen, treffen doch kalkige Sedimente und Silikatgesteine aufeinander, was eine vielfältige Flora fördert. Typische Zermatter Raritäten sind neben der Schnee-Edelraute *(Artemisia nivalis)* der Schweizer Spitzkiel *(Oxytropis helvetica)*, Hallers Greiskraut *(Senecio halleri)*, Niedrige Rapunzel *(Phyteuma humile)* oder die Gefranste Segge *(Carex fimbriata)* um nur ein paar wenige aufzuzählen.

Abbildung 8: Steinklee mit Moschus-Schafgarbe *(Trifolium saxatile und Achillea moschata)*

Zum Zeitpunkt der Exkursion ist die Vegetation sehr weit fortgeschritten, da der Sommer sehr warm und trocken war. So sehen wir viele Arten bereits verblüht respektive mit Früchten.

Im Aufstieg gehen wir durch Krummseggenrasen *(Caricion curvulae)* und Buntschwingelrasen *(Festucion variae)*, beides Vegetationstypen, die trockene Bedingungen bei saurem Boden benötigen. Interessant darin zu sehen ist *Hieracium velutinum* (Graues Habichtskraut), eine Kleinart von *Hieracium pilosella* (Kleines Habichtskraut) mit ganz dicht silbrig behaarten Blättern, die im Gebiet Zermatt häufig ist.

Weiter oben am Hang, der mehr von Bündner Schiefer geprägt ist, wandern wir dann durch Blaugrashalden, wo wir noch spät blühende Edelweisse entdecken. Auf über 2700 m ü. M. treffen wir noch junge Lärchen an, was eventuell dafür spricht, dass sich die Baumgrenze nach oben verschiebt. Kurz vor der Bergstation der Gondelbahn dann die Zone mit Alpiner Kalkschieferflur *(Drabion hoppeanae)*, in der sich auch die Schnee-Edelraute *(Artemisia nivalis)* befindet. Auffallend bei ihr sind die normalerweise ganz kahlen Pflanzen mit dem häufig rot gefärbten Stängel. Wir entdecken allerdings auch einige leicht behaarte Exemplare, die vom restlichen Habitus her aber eher der Schnee-Edelraute *(Artemisia nivalis)* zuzurechnen sind als einer anderen Artemisia-Art. Interessant ist, dass diese Art die Eiszeit vermutlich im Gebiet von Zermatt überdauert hat, sich aber seither nicht in weitere Gebiete verbreiten konnte und deshalb sehr selten geblieben ist.

Abbildung 9: Schnee-Edelraute *(Artemisia nivalis)*

Arten am Weg von Blauherd bis Unterrothorn:

Androsace vitaliana
Leontopodium alpinum
Carduus defloratus s.str.
Euphorbia cyparissias
Senecio incanus s.str.
Helianthemum nummularium s.l.
Senecio doronicum
Sempervivum montanum
Botrychium lunaria
Festuca varia aggr.
Galium pumilum
Sempervivum arachnoideum
Festuca violacea aggr.
Carex rosae
Campanula scheuchzeri
Antennaria dioica
Helictotrichon versicolor
Festuca ovina aggr.
Sedum alpestre
Cerastium arvense subsp. strictum
Gentiana verna
Thymus polytrichus
Carlina acaulis s.str.
Dryas octopetala
Hieracium velutinum
Oxytropis helvetica
Silene exscapa
Sesleria varia
Artemisia glacialis
Salix serpillifolia
Oxytropis campestris s.str.
Astragalus sempervirens
Gypsophila repens
Juniperus communis subsp. nana
Herniaria alpina
Anthyllis vulneraria subsp. valesiaca
Achillea nana
Campanula cochleariifolia
Helianthemum alpestre
Festuca curvula s.l.
Trisetum distichophyllum
Gentiana campestris s.str.
Euphrasia alpina
Geum montanum
Astragalus penduliflorus
Saxifraga aizoides
Saxifraga oppositifolia s.str.
Solidago virgaurea subsp. minuta
Selaginella selaginoides
Larix decidua
Minuartia verna
Aster alpinus
Elyna myosuroides
Campanula cenisia
Asplenium viride
Juncus jacquinii
Veronica bellidioides
Saxifraga exarata subsp. moschata
Linaria alpina s.str.
Oxytropis halleri subsp. velutina
Bartsia alpina
Salix retusa
Arabis alpina s.str.
Achillea erba-rotta subsp. moschata
Saxifraga bryoides
Homogyne alpina
Anthoxanthum alpinum
Agrostis rupestris
Festuca halleri aggr.
Luzula lutea
Saxifraga aspera
Geum reptans
Juncus trifidus
Gentiana nivalis
Ligusticum mutellinoides
Cardamine alpina
Myosotis alpestris
Euphrasia minima
Arenaria ciliata
Sedum annuum
Anemone baldensis
Gentiana tenella
Phyteuma globulariifolium
Veronica fruticans
Gentiana schleicheri
Artemisia umbelliformis
Gnaphalium supinum
Sibbaldia procumbens
Cerastium uniflorum
Oxyria digyna
Arenaria biflora
Veronica alpina
Carex parviflora
Artemisia genipi
Poa alpina
Salix reticulata
Pritzelago alpina subsp. brevicaulis
Trisetum spicatum
Artemisia nivalis
Saxifraga muscoides

Für den Rückweg bis Blauherd benützen wir die Gondelbahn, um noch Zeit zu haben für die Strecke Blauherd-Sunegga, die noch weitere Pflanzenspezialitäten bietet. Hier wird allerdings noch deutlicher, wie weit fortgeschritten die Vegetation ist, entdecken wir doch kaum noch blühende Pflanzen. Trotzdem lohnt sich der Abstieg zu Fuss, denn wir entdecken weitere Raritäten wie den Stein-Klee *(Trifolium saxatile)* und ganz in der Nähe in einer kleinen Quellflur die Arktische Binse *(Juncus arcticus)*.

Zufrieden gehen wir zurück zur Bahnstation Sunegga, um die Heimreise anzutreten, haben wir doch an einem einzigen Tag eine grosse Palette sehr seltener und spezieller Arten entdecken können.

Pflanzenarten am Weg von Blauherd bis Sunegga:

Astragalus sempervirens
Euphrasia alpina
Gentiana campestris s.str.
Hieracium velutinum
Pulsatilla halleri
Plantago serpentina
Festuca violacea
Plantago alpina
Gentiana utriculosa
Anthyllis vulneraria subsp. valesiaca
Trifolium montanum
Parnassia palustris
Campanula barbata
Gentiana ramosa
Loiseleuria procumbens
Calluna vulgaris
Bupleurum ranunculoides s.str.
Empetrum nigrum subsp. hermaphroditum
Juncus arcticus
Juncus alpinoarticulatus
Blysmus compressus
Carex paniculata
Primula farinosa
Trifolium saxatile
Daphne mezereum
Teucrium montanum
Koeleria macrantha
Thlaspi sylvium
Laserpitium halleri
Rumex acetosella s.str.

Literatur

Steiner, A. (1999): Die Vegetation der Gemeinde Zermatt. Diss. Univ. Bern
Käsermann, C., F. Meyer, A. Steiner (2003): Die Pflanzenwelt von Zermatt. Visp

Bericht: Barbara Studer

5. September 2015
Zimtrose und Zebraspinne
Leitung: Beatrice Lüscher und Adi Möhl

In der guten Tradition der beiden Leitenden und zum Floreninventar der Stadt Bern gibt's neue Einblicke in die scheinbar altbekannte Elfenau. Treffpunkt ist die Stadtgärtnerei, wo wir nebst bäumigen Bäumen den Winzling *Herniaria glabra* (Kahles Bruchkraut) bewundern. In den Wiesen blüht noch *Salvia pratensis* (Wie-

Abbildung 10: Exkursionsgruppe in der Elfenau

sensalbei) und Beatrice erläutert, dass Hummeln die einzigen Hautflügler sind, die mit Muskelvibration ihre Körpertemperatur erhöhen können. Mein Aha-Erlebnis: Ah, deshalb sind es Hummeln und nicht Bienen, die früh morgens und spät abends auf dem Balkon die *Ipomoaea* (Prunkwinden) besuchen. Apropos Muskeln: Die Muskeln der grossen Vorderbeine der Krabbenspinnen sind zur Kontraktion gut – die Entspannung erfolgt aber durch Körperdruck von hinten. Apropos Spinnen: die produzieren offenbar vier verschiedene Fadentypen: Sicherheitsfaden (extrem stark und dehnbar), Faden zum Einspinnen der Coccons (unangenehm zum Fressen, also Schutz), sowie zwei Fadentypen für Netze (klebrig und nicht klebrig).

Am «Krebsbach» finden sich *Schoenoplectus lacustris, Typha latifolia, Mentha aquatica, Potamogeton pusillus, Sparganium erectum* und *S. natans* (Gewöhnliche Teichbinse, Breitblättriger Rohrkolben, Wasserminze, Gewöhnliche Zwerg-Laichkraut, Ästiger Igelkolben und Zwerg-Igelkolben). Die Larven der Gross-Libellen fressen sogar Kaulquappen, die Larven der Klein-Libellen hingegen Daphnien und Copepoden (Ruderfusskrebse). Zur grossen Unterordnung der Wanzen gehören zwei phänomenale Wasserinsekten – die Wasserläufer und die Rückenschwimmer.

Die Zimtrose *(Rosa majalis)* blühte im Mai und offerierte den Bienen keinen Nektar, bloss Pollen; jetzt zeigt sie ihre kugeligen Hagebutten mit den ganzrandigen Kelchblättern. Zimtbraun ist die Rinde der Ästchen. Da die Art Ausläufer treibt, kann sie sich im schön gepflegten Garten recht unbeliebt machen. In der Schweiz ist sie selten – wir sind am südwestlichen Rand eine grossen Areals, das Skandinavien, Osteuropa und Teile Sibiriens umfasst.

Die Zebraspinne (auch Wespenspinne genannt) ist am Hinterleib gebändert (in Schwarz, Weiss und Gelb), und ihr Netz weist ein weisses Zickzack-Band auf.

Der Auenwald (und seine «Giesse») sind von einer starken jahreszeitlichen Hydrodynamik geprägt, die auch einen starken Nährstoffeintrag mit sich bringt; er unterscheidet sich vom Bruchwald, z.B. am Rand eines Moores, der nur kleine Wasserstandsschwankungen kennt und nährstoffärmer ist. Wir begegnen auch *Medicago sativa* (Luzerne, eingebracht seit der Jungsteinzeit mit dem Getreide aus dem Nahen Osten, also ein eingebürgerter Archäophyt), *Polygonum mite, Calamagrostis epigejos, Rubus caesius* (Milder Knöterich, Land-Reitgras, Kratzbeere). Ob die *Iris sibirica* (Sibirische Schwertlilie) hier eingepflanzt wurde?

Die Amphibien sind die am stärksten gefährdete Tiergruppe der Schweiz. Die Auenlebensräume entlang der Aare zwischen Thun und Bern sind für mehrere gefährdete und stark gefährdete Arten sehr wertvoll, so ist der Fadenmolch typisch und gut vertreten. In der Elfenau kommt sogar der Kammolch vor, eine stark gefährdete Art, die im Kanton Bern nur noch 10–20 Fundorte besitzt.

Eine glückliche vergnügte Zuschauer- und Zuhörerinnen-Gruppe bedankt sich bei Beatrice und Adi und hofft auf eine Fortsetzung im 2016.

Bericht: Brigitta Ammann, Beatrice Lüscher und Adrian Möhl