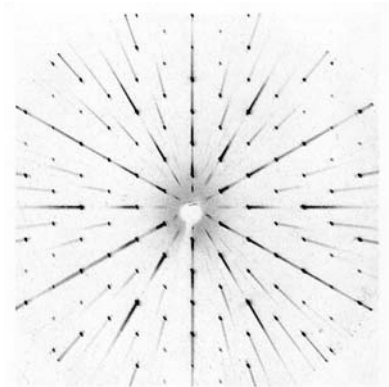


## Anorganische Chemie 3 (3.1) Teil 1 - Symmetrie

## Was ist Symmetrie?

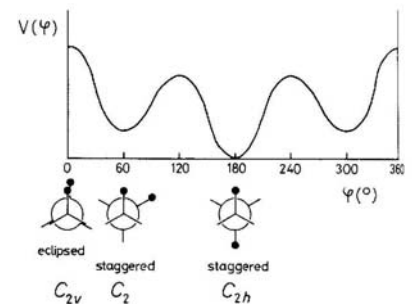
Symmetrie (griechisch = Ebenmaß, Gleichmaß) bedeutet die gesetzmäßige Wiederholung eines Motivs und damit die Übereinstimmung von Teilen eines Ganzen (Abb. 1).



Präzessionsaufnahme von  $\text{LiAlSiO}_4$   
( $a^*b^*$ -Ebene, Symmetrie  $6mm$ )



Eiskristall  
(Symmetrie  $\sim 6mm$ )



Rotation von  $\text{CH}_2\text{C}-\text{CH}_2\text{Cl}$   
(Symmetrie  $C_2$ ,  $C_{2v}$  oder  $C_{2h}$ )

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

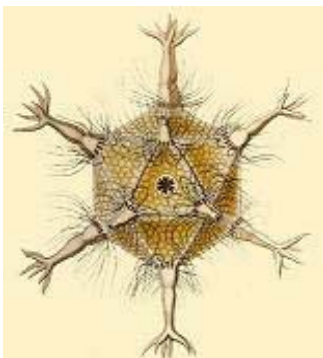
Matrix für Vektorrotation



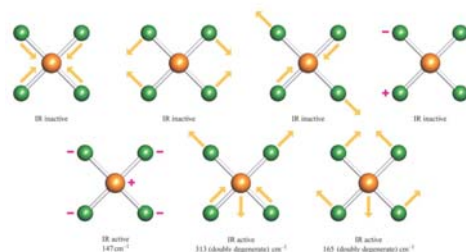
J.S. Bach, Die Kunst der Fuge



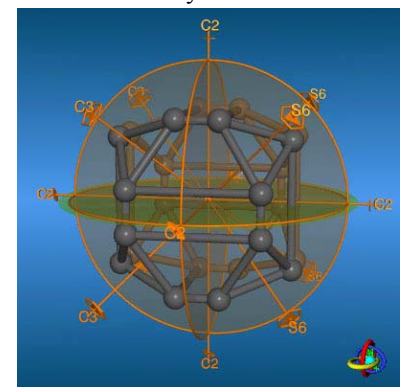
Antisymmetrie



Radiolarienschale (*Circogonia icodaedra*) mit Icosaedersymmetrie



Normalschwingungen von  $\text{XeF}_4$   
(Symmetriegruppe  $D_{4h}$ )



3D-Objekte  
([csi.chemie.tu-darmstadt.de/ak/immell/](http://csi.chemie.tu-darmstadt.de/ak/immell/))

## Abb.1 Beispiele symmetrischer Objekte

Unter Symmetrie kann man aber auch Harmonie von Proportionen, Stabilität, Ordnung und Schönheit verstehen.

Eine Figur (Körper, Gegenstand, Funktion, Eigenschaft) hat außer der identischen Abbildung weitere **Kongruenzabbildungen**, die die Figur auf sich abbilden. Diese Kongruenzabbildungen nennt man Symmetrien der Figur.

Symmetrie ist das Vorhandensein von Regelmäßigkeiten bestimmter räumlicher oder sonstiger Strukturen, derart, daß nach Ausführung bestimmter Operationen diese Strukturen wieder in sich übergehen.

Diese Operationen nennt man **Symmetrieoperationen**. Die Gesamtheit der Symmetrieoperationen eines Objekts etc. bildet eine **Symmetriegruppe**.

Zeichnet sich bei der Symmetrieoperation eine Ebene, eine Gerade oder ein Punkt dadurch aus, daß sie bei der Operation am Orte verbleiben, dann nennt man diese Ebene, Gerade oder Punkt das zugehörige **Symmetrieelement**. Die entsprechende Symmetriegruppe wird **Punktgruppe** genannt.

### **Auftreten und Bedeutung von Symmetrien**

Zahlreiche Gegenstände und Probleme in den Naturwissenschaften und der Technik sowie der Mathematik, Physik, Medizin, Philosophie, Literatur, Kunst und Musik weisen gewisse Symmetrien auf. Ihre Berücksichtigung bzw. mathematische Behandlung kann zu Vereinfachungen führen.

Mathematische Grundlage des Symmetriekonzepts ist die **Gruppentheorie**. Das Symmetriekonzept hilft Aufbau und Struktur sowie Gemeinsamkeiten und Unterscheide von Räumen, Objekten, Eigenschaften, Bewegungen, Funktionen, oder Operatoren zu erkennen und zu beschreiben.

Symmetrische Räume, Objekte etc. können in Teile geteilt werden, die untereinander gleich und in bestimmter Weise zueinander angeordnet sind. Damit ermöglicht die Symmetrie eine Einteilung eines Objektes etc. in ein Motiv und in Gesetzmäßigkeiten, wie dieses Motiv wiederholt wird.

In der Chemie ist die Symmetrie wichtiges Hilfsmittel zur Klärung und Beschreibung des geometrischen Aufbaus der Moleküle und Kristalle, der elektronischen und der Spin-Struktur chemischer Verbindungen und von Atom-, Molekül- und Festkörperschwingungen, wie sie in der IR- und Raman-Spektroskopie behandelt und untersucht werden.

Die Symmetrie von Atomen, Ionen und Molekülen und ihrer räumlichen Anordnung bestimmt wesentliche Eigenschaften fester Stoffe wie z.B. die Polarität, die Chiralität und die nichtlinearen mechanischen, dielektrischen und optischen (ferroischen) Eigenschaften.

## Definition und Notation

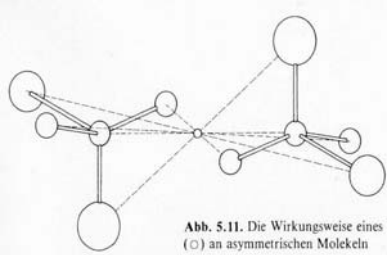
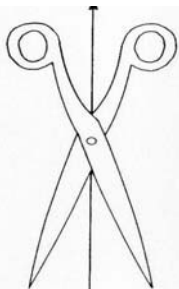
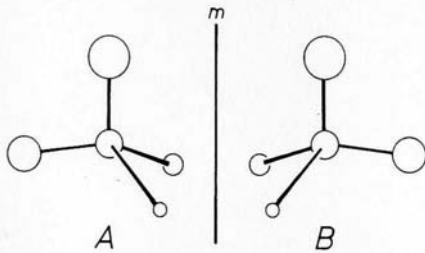
Ein Objekt ist symmetrisch, wenn es hinsichtlich einer **Transformation invariant** ist, d.h., vor und nach der Transformation nicht unterscheidbar also deckungsgleich ist. Zur **Transformation** gehören **Symmetrieeoperationen** bzw. **Symmetrieelemente**. Die Gesamtheit der relevanten Symmetrieeoperationen eines Objekts etc. bildet eine **Symmetriegruppe**.

Die zu einer Symmetrieeoperation oder Symmetriegruppe gehörende Anzahl der identischen Wiederholungen wird **Ordnung** der Symmetrieeoperation oder Symmetriegruppe genannt.

Symmetrieelemente, -operationen und -gruppen werden nach der Symbolik bzw. Notation von Arthur Moritz Schoenflies (1853-1928) oder von Carl Hermann (1898-1961) und Charles-Victor Mauguin (1878-1958) gekennzeichnet. Für **Moleküle** wird die **Notation nach Schoenflies** verwendet, für **Kristalle** die internationale **Notation nach Hermann-Mauguin**.

### Welche Symmetrieeoperationen bzw. Symmetrieelemente gibt es?

Es gibt Spiegelungen an einem Punkt, einer Achse oder einer Ebene (Abb.2). Die Spiegelung an einem Punkt wird auch Inversion genannt, die Spiegelung an einer Achse ist identisch mit einer Drehung  $n$  um eine Drehachse  $x$ ,  $y$  oder  $z$  um den Winkel  $2\pi/n$  ( $360^\circ/n$ ), wobei  $n$  die Ordnung der Drehung ist.

 <p>Abb. 5.11. Die Wirkungsweise eines I (○) an asymmetrischen Molekeln</p>		
<p>Spiegelung an einem Punkt Inversionszentrum in 0, 0, 0 <math>x, y, z \rightarrow -x, -y, -z</math></p> <p>Symmetrieelement*: <math>i</math> (<math>\bar{1}</math>) Symmetrieeoperation*: <math>C_i</math> (<math>\bar{1}</math>)</p>	<p>Spiegelung an einer Achse 2-zählige Drehachse parallel x-Achse: <math>x, y, z \rightarrow x, -y, -z</math> y-Achse: <math>x, y, z \rightarrow -x, y, -z</math> z-Achse: <math>x, y, z \rightarrow -x, -y, z</math></p> <p>Symmetrieelement*: <math>C_n</math> (<math>n</math>) Symmetrieeoperation*: <math>C_n</math> (<math>n</math>)</p>	<p>Spiegelung an einer Ebene Spiegelebene senkrecht x-Achse: <math>x, y, z \rightarrow -x, y, z</math> y-Achse: <math>x, y, z \rightarrow x, -y, z</math> z-Achse: <math>x, y, z \rightarrow x, y, -z</math></p> <p>Symmetrieelement*: <math>\sigma</math> (<math>m</math>) Symmetrieeoperation*: <math>C_s</math> (<math>m</math>)</p>

\* Notation nach Schoenflies für Moleküle. In Klammern die internationale Notation nach Hermann-Mauguin für Kristalle.

Abb. 2 Beispiele mit Punkt-, Achs-, und Ebenensymmetrie

Achsspiegelungen bzw. Drehungen  $n$  um eine Drehachse  $x$ ,  $y$  oder  $z$  um den Winkel  $2\pi/n$  ( $360^\circ/n$ ) sind die eigentlichen Symmetrieelemente (englisch „proper“). Sie sind von  $n$ -ter Ordnung und werden wie die entsprechenden Symmetrieelemente und –gruppen nach **Schoenflies** bzw. **Hermann-Mauguin** (in Klammern) mit  $C_n$  ( $n$ ) bezeichnet. Die Identitäts- bzw. Einheitsoperation  $C_1$  ( $1$ ) mit dem Drehwinkel  $2\pi/1$  wird nach **Schoenflies** auch **E** genannt.

Spiegelungen an Punkt oder Ebene also Inversion oder „Spiegelung“ gehören zu den uneigentlichen Symmetrieelementen (englisch „improper“). Sie sind von 2-ter Ordnung und werden wie die entsprechenden Symmetrieelemente mit  $C_i$  ( $\bar{1}$ ) bzw.  $C_s$  ( $m$ ) bezeichnet, die zugehörigen Symmetrieelemente mit  $\sigma$  ( $m$ ) bzw.  $\sigma_v$  oder  $\sigma_h$  (s.u.).

Durch Koppelung dieser Symmetrieelemente bzw. –operationen entstehen weitere Symmetrieelemente bzw. –operationen (s. Abb. 3 und 4).

### Koppelung von Symmetrieelementen bzw. Symmetrieelementen

Die **Koppelung** von Drehungen  $C_n$  ( $n$ ) mit Spiegelung  $\sigma$  ( $m$ ) oder Inversion  $i$  ( $\bar{1}$ ) führt zu **Drehspiegelachsen**  $S_n$  (nur bei Schoenflies) oder zu **Drehinversionsachsen**  $\bar{n}$  (nach Hermann-Mauguin). Diese neuen Symmetrieelemente bzw. –operationen sind Drehungen 2. Art (englisch „improper rotation“).

- **Drehspiegelung**  $S_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) (s. Abb. 3)  
 $n \cdot$  (Drehung um  $2\pi/n$  ( $360^\circ/n$ ) und Spiegelung an  $\sigma$  ( $\sigma_h$  in  $000$ )  $\perp$  zu  $C_n$ )

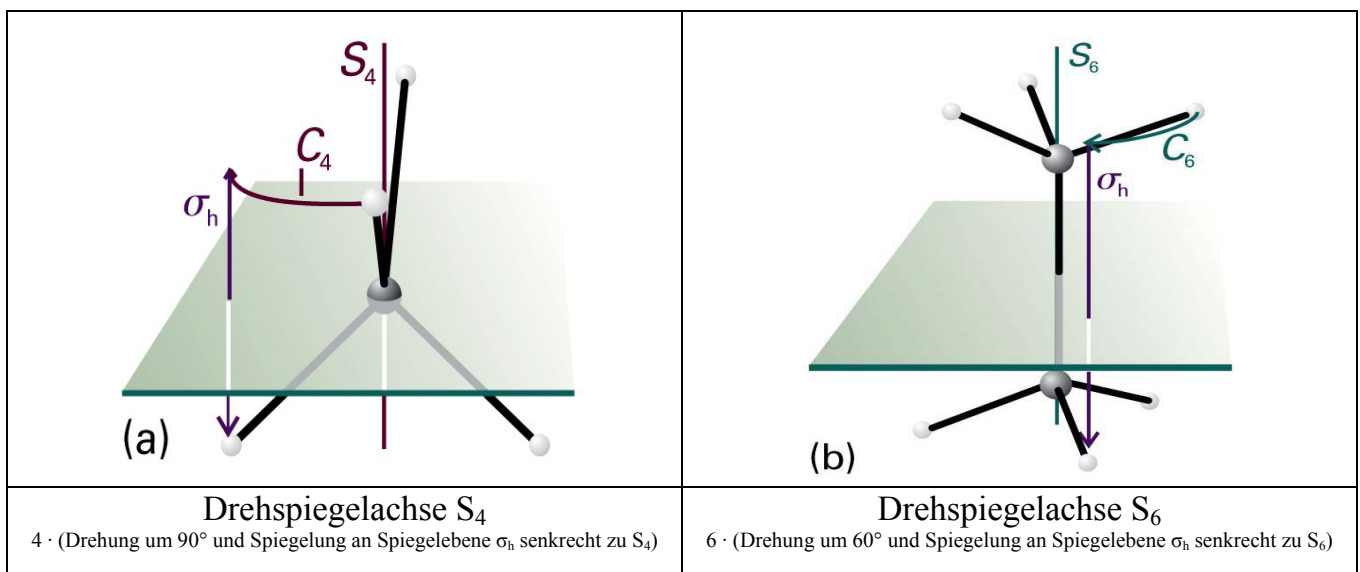


Abb. 3 Koppelung von Drehung und Spiegelung zu Drehspiegelachsen

Die Koppelung von Symmetrieelementen ist nur paarweise möglich. Die Ausführung geschieht **hintereinander als ein Vorgang**. Es entsteht eine neue Symmetrieoperation. Hilfspunkte werden nicht realisiert.

- **Drehinversion**  $\bar{n}$  bzw. ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) (s. Abb. 4) ( $I_n$  bei Schoenflies)  $n \cdot$  (Drehung um  $2\pi/n$  ( $360^\circ/n$ ) und Inversion an  $\bar{1}$  auf  $n$  (in 000))

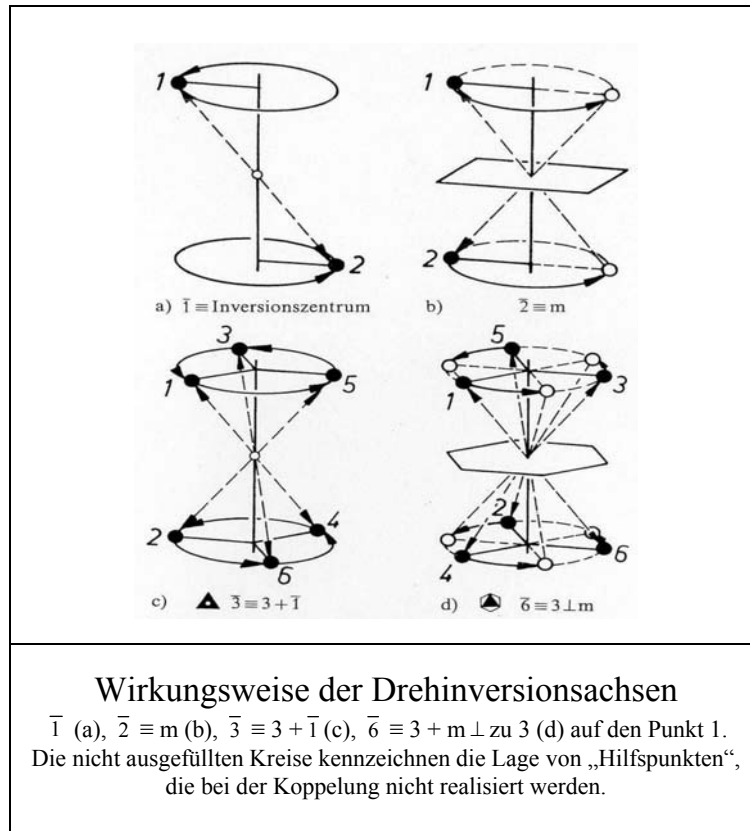


Abb. 4 Koppelung von Drehung und Inversion zu Inversionsdrehachsen  $\bar{n}$

Inversionsdrehachsen werden bevorzugt nach Hermann-Mauguin notiert und für Kristalle verwendet.

Symmetrieelemente und Symmetrieoperationen, die durch Koppelung von Drehungen oder Spiegelung mit Translationen entstehen, also die sog. **Schraubenachsen** oder **Gleitspiegelebenen** (s. Teil Kristallsymmetrie) treten nur bei Körpern mit Translationssymmetrie wie den Kristallen auf.

Drehspiegelungen lassen sich als Drehinversionen darstellen und vice versa:

$$S_1 \equiv \bar{2} \equiv m, S_2 \equiv \bar{1} \equiv i, S_3 \equiv \bar{6} \equiv 3/m, S_4 \equiv \bar{4}, S_5 \equiv \bar{10}, S_6 \equiv \bar{3} \equiv (3 + \bar{1})$$

Drehspiegelachsen  $S_n$  und Inversionsdrehachsen  $\bar{n}$  mit geradzahligem  $n$  haben die Ordnung  $n$ , die mit ungeradem  $n$  die Ordnung  $2n$ . Inversionsdrehachsen  $\bar{n}$  mit ungeradzahligem  $n$  enthalten auch ein Symmetriezentrum.

## Zusammenfassung der Punktsymmetrieelemente und -operationen

Symmetrietransformationen, Symmetrieoperationen, Symmetrieelemente  
(Notation nach Schönflies und internationale Notation nach Hermann/Mauguin)

Symbol*		Symmetrieoperation
Sch	HM	* Symmetrieelement-Notation nach Schönflies (Sch für Moleküle) und Internationale Notation nach Hermann/Mauguin (HM, Kristalle)
e	1	Identität E (E von "Einheit") ( $x, y, z \rightarrow x, y, z$ in kartesischen Koordinaten)
C <sub>n</sub>	n	Drehung 1. Art (eigentlich, proper) um einen Winkel $2\pi/n$ ( $360^\circ/n$ )
S <sub>n</sub>		Drehung 2. Art (uneigentlich, improper) um einen Winkel $2\pi/n$ ( $360^\circ/n$ ) gefolgt von einer Spiegelung an einer Ebene senkrecht zur Drehachse (Drehspiegelachse)
	$\bar{n}$	Drehung 2. Art (uneigentlich, improper) um einen Winkel $2\pi/n$ ( $360^\circ/n$ ) gefolgt von einer Spiegelung an einem Punkt auf der Drehachse (Drehinversionsachse)
i	$\bar{1}$	Inversion (Punktspiegelung) ( $\bar{1} \equiv S_2$ ) ( $x, y, z \rightarrow -x, -y, -z$ in kartesischen Koordinaten)
$\sigma$	m	Spiegelung an einer (nicht näher spezifizierten) Ebene
$\sigma_h$		horizontale Spiegelung an einer Ebene durch den Ursprung und senkrecht zur Achse mit der höchsten Symmetrie
$\sigma_v$		vertikale Spiegelung an einer Ebene durch den Ursprung und parallel zur Achse mit der höchsten Symmetrie
$\sigma_d$		diagonale Spiegelung an einer Ebene wie $\sigma_v$ , die den Winkel zwischen den zweizähligen Achse senkrecht zur Achse mit der höchsten Symmetrie halbiert
	$\vec{t}$	Translation $\vec{t} = n_1 \cdot \vec{a} + n_2 \cdot \vec{b} + n_3 \cdot \vec{c}$ (nur für Kristalle)

Die Kombination von Symmetrieoperationen bzw. Symmetrieelementen (1. und/oder 2. Art) führt zu weiteren Symmetriegruppen (s.u.).

Hat eine Symmetriegruppe, ein Molekül, Körper, Polyeder oder Kristall mehrere Drehachsen, so wird diejenige mit dem größten  $n$  als Haupt(dreh)-achse bezeichnet. Sie zeigt nach oben (vertikal). Alle anderen Symmetrieelemente sind in Bezug auf sie beschrieben. Daher werden vertikale Spiegelebenen (parallel zur Hauptachse) mit  $\sigma_v$  und horizontale Spiegelebenen (senkrecht zur Hauptachse) mit  $\sigma_h$  bezeichnet.

## Darstellung von Symmetrieeigenschaften

Zur Darstellung von Symmetrieeigenschaften dreidimensionaler Gebilde (z.B. Moleküle, beliebige Körper, Polyeder, Kristalle) in der Ebene benutzt man Projektionen wie z.B. die **stereographische Projektion** (Abb. 5).

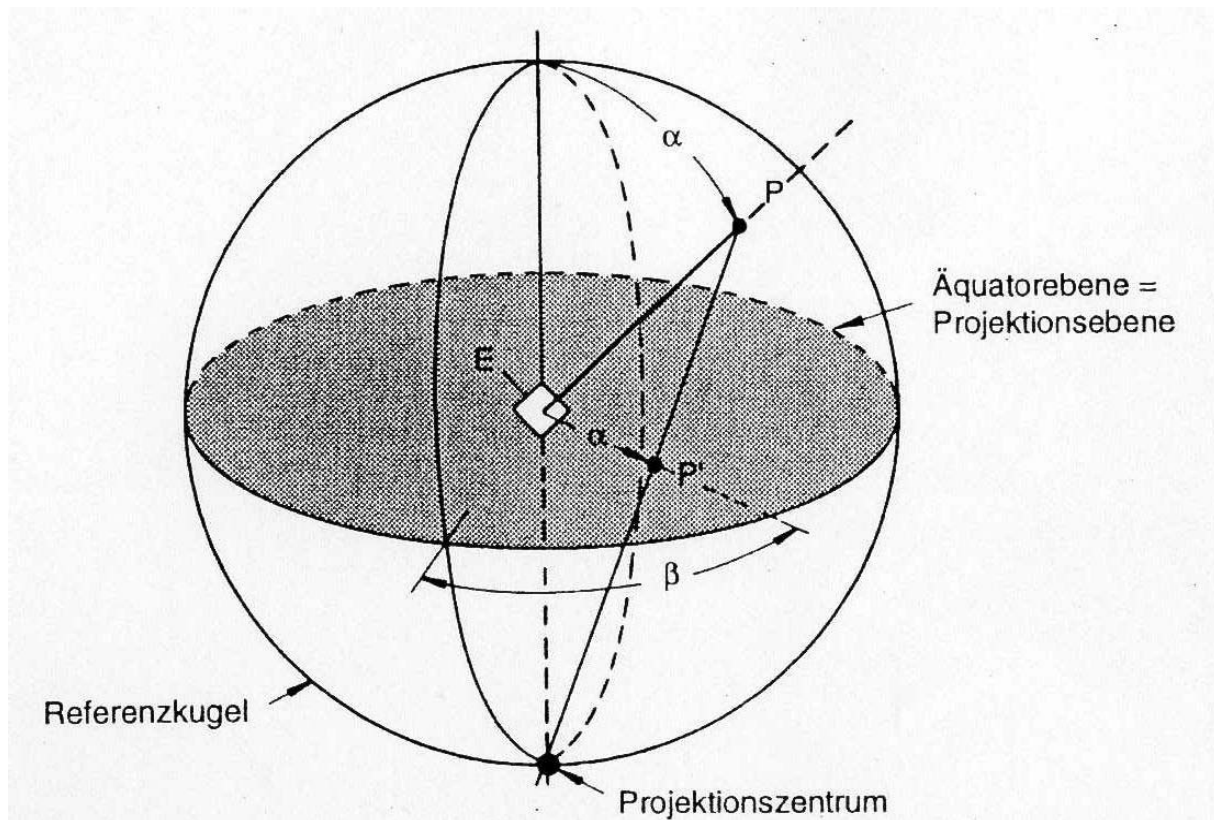


Abb. 5 Prinzip der stereographischen Projektion

Der zu betrachtende Körper, Kristall etc. befindet sich im Zentrum einer Kugel derart, dass seine Hauptachse (die Achse höchster Symmetrie, s.o.) senkrecht auf der Äquatorebene steht. Seine Flächennormalen oder Mittelpunktsstrahlen durchstoßen die Kugeloberfläche in den Punkt- oder Flächenpolen P. Wird der Punkt- oder Flächenpol P mit dem gegenüberliegenden (Nord- oder Süd-) Pol der Kugel verbunden, so schneidet diese Verbindungslinie die Äquatorebene im stereographischen Projektionspunkt P' des Punkt- oder Flächenpols P.

Der Winkel zwischen zwei Flächenpolen entspricht dem Winkel zwischen zwei Mittelpunktsstrahlen bzw. dem Normalenwinkel zweier Körperober- oder Kristallflächen (Normalenwinkel =  $180^\circ$  - Flächenwinkel).

Die **stereographische Projektion** ist also **winkeltreu** (s. Abb. 6 und 7).

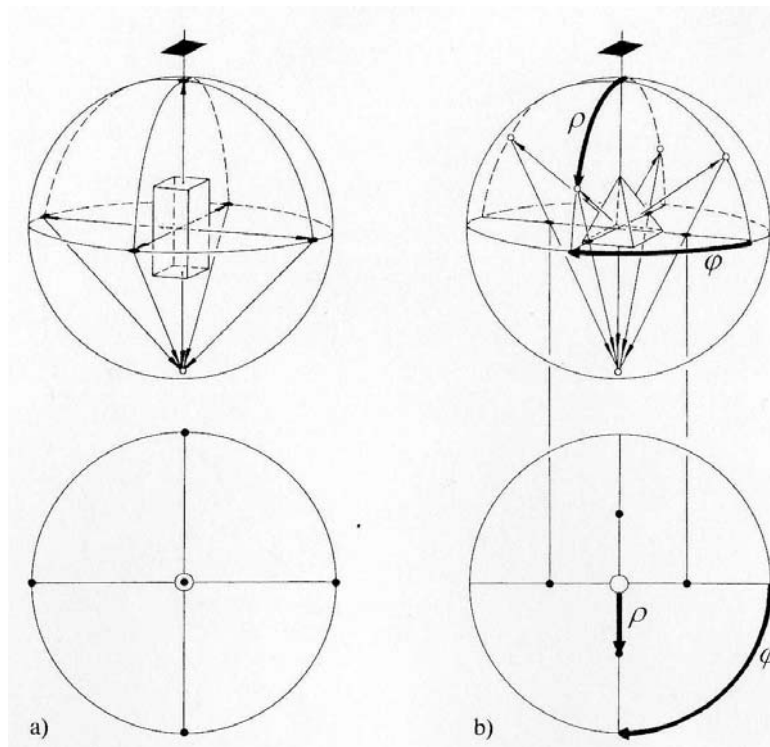


Abb. 6 Stereographische Projektion von tetragonalem Prisma (a) und tetragonaler Pyramide (b). Für die Pyramidenfläche sind die Winkelkoordinaten  $\varphi$  und  $\delta$  angegeben.

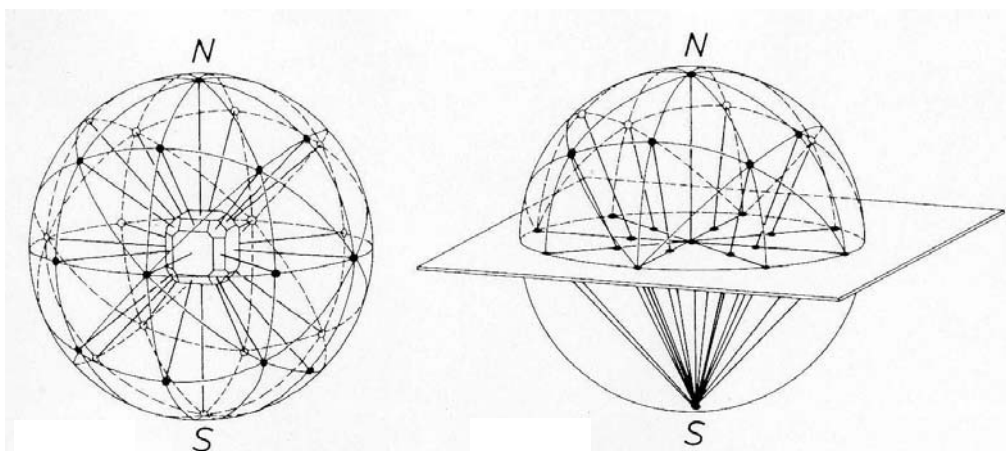


Abb. 7 Flächenpole und stereographische Projektion eines Galenitkristalls

Die Flächenpole eines Kristalls liegen meist auf wenigen Großkreisen. Die zugehörigen Flächen gehören zu einer sog. **Zone**. Die Zonenachse steht auf der Ebene des jeweiligen Großkreises senkrecht.

Mit Hilfe der stereographischen Projektion sind also die Flächenpole, die Flächenwinkel und damit die Symmetrieeigenschaften von Molekülen, Polyedern oder Kristallen darstellbar.



## Kombination von Symmetrieeoperationen bzw. Symmetrieelementen Punktgruppen

Zu jeder der bisher genannten Symmetrieeoperationen gehört eine **Symmetriegruppe**. Die **Kombination** dieser Symmetrieeoperationen bzw. -elemente führt im Gegensatz zur Koppelung nicht zu weiteren Symmetrieelementen sondern – unter Erhalt der einzelnen Symmetrien- zu weiteren Symmetriegruppen und zwar zu **Punktgruppen** (ohne Translation) oder **Raumgruppen** (mit Translation, s. Kristallsymmetrie) (s. Abb.8).

Die Punktgruppen beschreiben die Symmetrie der Körperoberflächen, die Raumgruppen die der Inhalte (und die daraus ableitbare der Oberflächen).

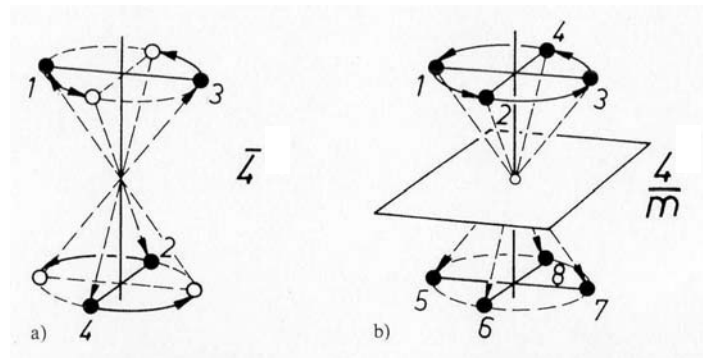


Abb. 8 Koppelung (a) und Kombination (b) von 4-zähliger Drehung (4) und Inversion ( $\bar{1}$ ). Die nicht ausgefüllten Kreise kennzeichnen nicht realisierte „Hilfspunkte“ (a). Bei der Kombination entsteht im Symmetriezentrum eine Spiegelebene senkrecht zur Drehachse (b). 4/m wird „4 über m“ gelesen.

Die **Punktgruppen** werden nach der **Notation von Schoenflies** eingeteilt in:

Drehgruppen: C	Drehspiegelgruppen: S	Diedergruppen: D
Tetraedergruppen: T	Oktaedergruppen: O	Ikosaedergruppen: I

Zur Beschreibung der Gesamtsymmetrie werden die Punktgruppensymbole mit einem zusätzlichen, tief gestellten Index versehen:

Spiegelebene: s	horizontale Spiegelebene: h
vertikale Spiegelebene: v	diagonale Spiegelebene: d*
Inversionszentrum: i	

\* nur bei gleichzeitigem Auftreten von zweizähligen horizontalen Drehachsen, die nicht auf den Spiegelebenen liegen

Je nach Bedarf wird die Zähligkeit n der Achse oder ein Symbol für andere Symmetrieelemente mit einem tief gestellten Index angegeben. Damit ergeben sich für Moleküle und Polyeder die in Tabelle 1 gezeigten Punktgruppen.

Tabelle 1 Mögliche Punktgruppen von Molekülen und Polyedern\*

Punktgr.	SymElm*	h***	Punktgr.	SymElm*	h***
$C_1$	E	1	$C_i$	i	2
$C_s$	$\sigma$	2	$C_n$	$C_n$	n
$S_n$	$S_n$	n	$C_{nv}$	$C_n, n\sigma_v$	2n
$C_{nh}$	$C_n, \sigma_h$	2n	$D_n$	$C_n, nC_2 \perp C_n$	
$D_{nd}$	$C_n, nC_2 \perp C_n, n\sigma_d$	4n	$D_{nh}$	$C_n, nC_2 \perp C_n, \sigma_h, n\sigma_v$	4n
$C_{\infty v}$	linear ohne i	$\infty$	$D_{\infty h}$	linear mit i	$\infty$
T	tetraedrisch	12	O	oktaedrisch	24
$T_d$		24	$O_h$	(kubisch)	48
$T_h$		24			
I	ikosaedrisch	60	$K_h$	sphärisch	$\infty$
$I_h$		120			

\* Schoenflies-Notation, \*\* wichtige Symmetrieelemente, \*\*\* Ordnung h (Anzahl der Wiederholungen)

Die Punktgruppen einiger anorganischer und organischer Verbindungen und schematische Darstellungen der Symmetrien wichtiger Punktgruppen für verschiedene Objekte und Polyeder mit den Ordnungen (Wiederholungen)  $n = 2, 3, 4, 5, 6$  und  $\infty$  sind in den Abbildungen 9a und 9b gezeigt.

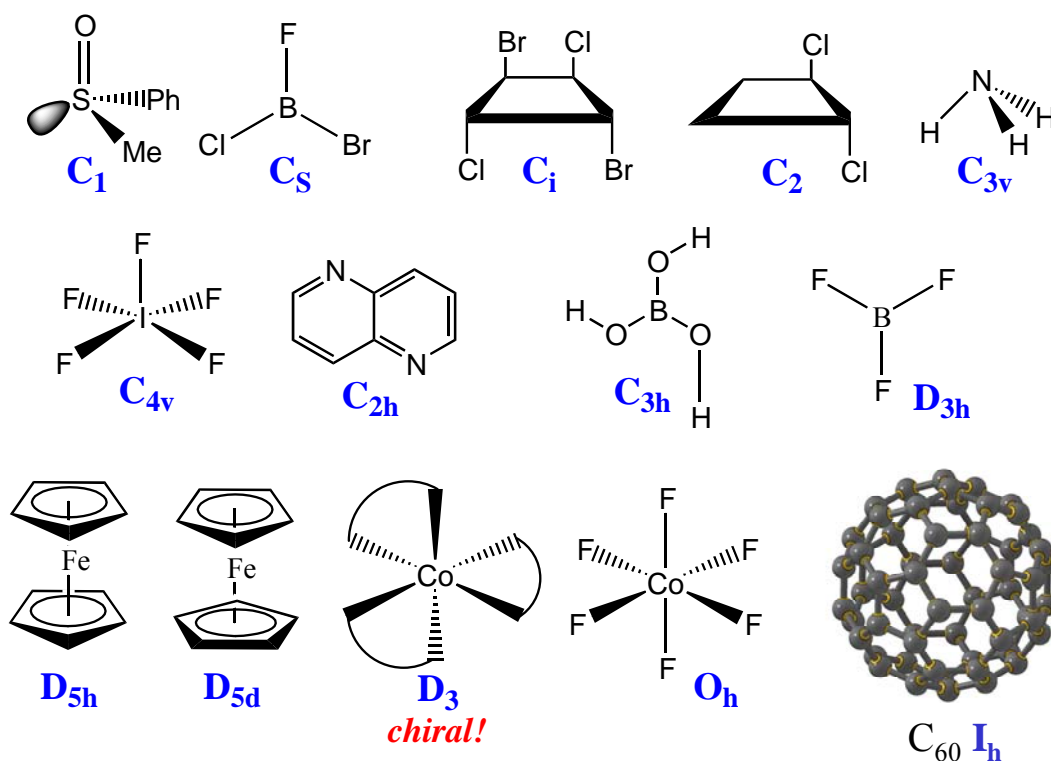
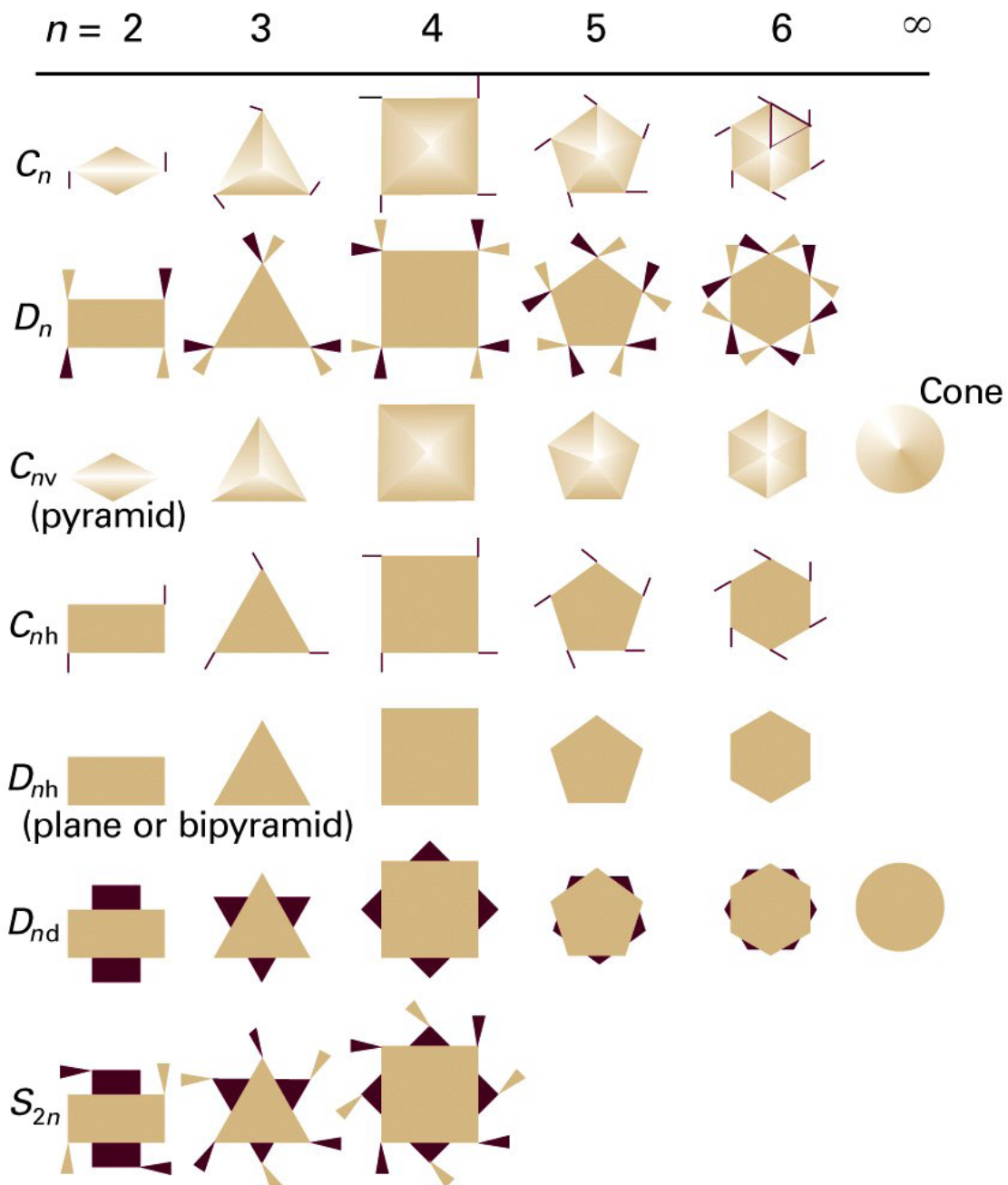


Abb. 9a Punktgruppen von anorganischen und organischen Molekülen



*Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition*  
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

Abb. 9b Schematische Darstellung verschiedener Körper und Polyeder mit ihren Symmetrieeigenschaften, Ordnungen  $n$  und Punktgruppen

Die Punktgruppennotation nach Hermann-Mauguin wird im Teil Kristallsymmetrie behandelt.

Zur Übung (finden, bezeichnen und systematisieren) sind in Abb. 10 die Symmetrieelemente und Punktgruppen verschiedener Moleküle aufgelistet. Die freien Elektronenpaare sind fortgelassen.

Punktgruppe	Symmetrieelemente	Struktur	Beispiel
$C_1$	$E$		SiBrClFI
$C_2$	$E, C_2$		$H_2O_2$
$C_s$	$E, \sigma$		$NHF_2$
$C_{2v}$	$E, C_2, \sigma_v, \sigma_v$		$H_2O, SO_2Cl_2$
$C_{3v}$	$E, 2C_3, 3\sigma_v$		$NH_3, PCl_3, POCl_3$
$C_{\infty v}$	$E, C_2, 2C_\infty, \dots, \infty \sigma_v$		$CO, HCl, OCS$
$D_{2h}$	$E, C_2(x, y, z), \sigma(xy, yz, zx), i$		$N_2O_4, B_2H_6$
$D_{3h}$	$E, C_3, 3C_2, 3\sigma_v, \sigma_h, S_3$		$BF_3, PCl_5$
$D_{4h}$	$E, C_4, C_2, 2C_2', 2C_2'', i, S_4, \sigma_h, 2\sigma_v, 2\sigma_d$		$XeF_4, trans-MA_4B_2$
$D_{\infty h}$	$E, C_\infty, \dots, \infty \sigma_v, i, S_\infty, \dots, \infty C_2$		$H_2, CO_2, C_2H_2$
$T_d$	$E, 3C_2, 4C_3, 6\sigma_d, 4S_4$		$CH_4, SiCl_4$
$O_h$	$E, 6C_2, 4C_3, 3C_4, 4S_6, 3S_4, i, 3\sigma_h, 6\sigma_d$		$SF_6$

Abb. 10 Punktgruppen und Symmetrieelemente verschiedener Moleküle

Zur Bestimmung der Punktgruppen von Molekülen oder Polyedern bedient man sich geeigneter Punktgruppen-Bestimmungsdiagramme. Ein solches Bestimmungsdiagramm zeigt Abb. 11. Mit den in Abb. 12 wiedergegebenen Molekülen und Körpern kann das Auffinden von Symmetrieelementen und die Bestimmung der zugehörigen Punktgruppen geübt werden.

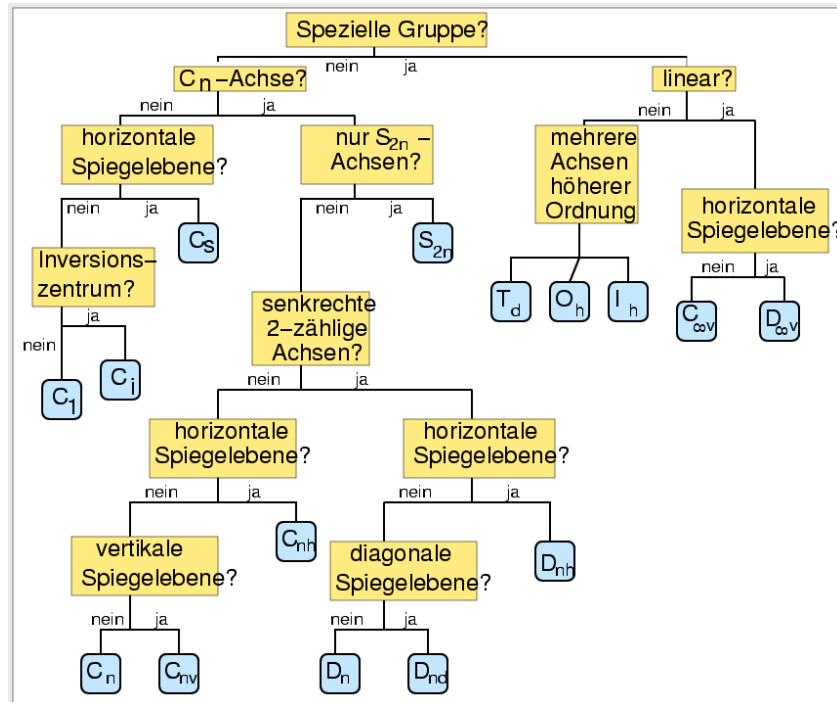


Abb.11 Punktgruppen-Bestimmungsdiagramm

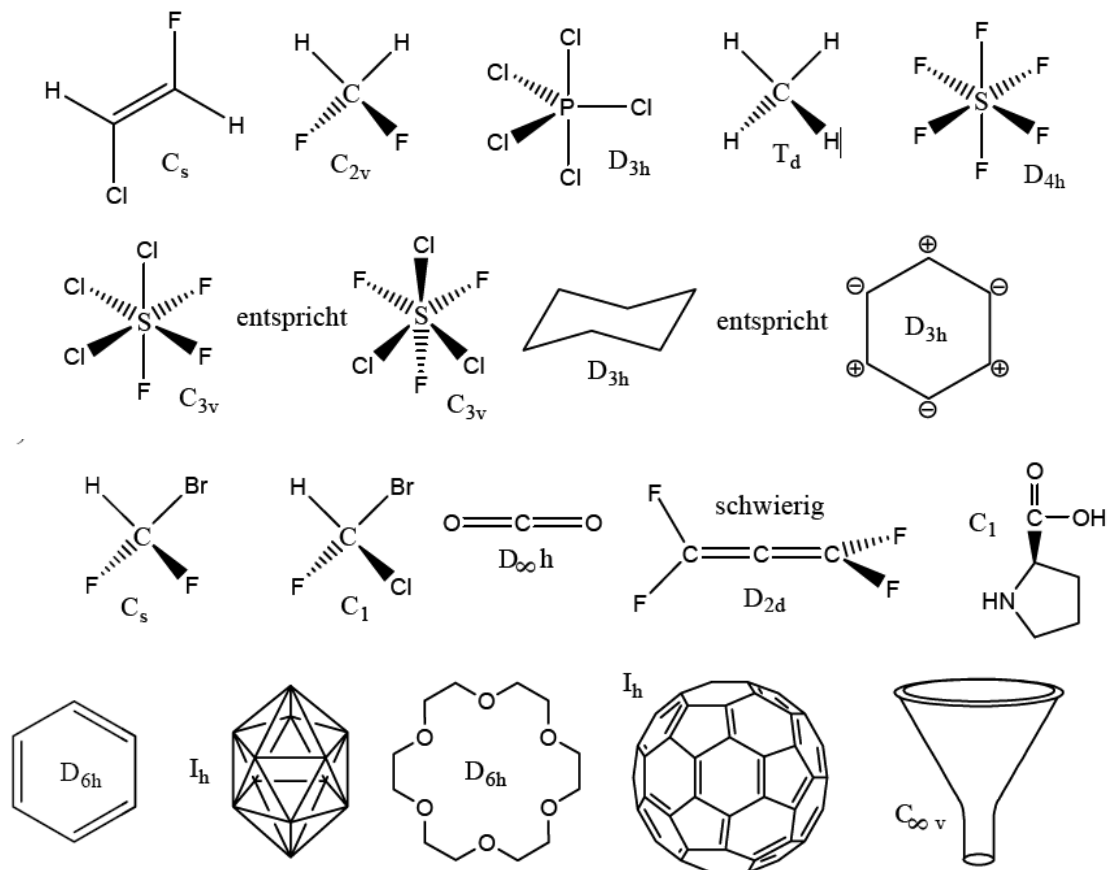


Abb. 12 Beispiele von Molekülen und Körpern mit ihren Punktgruppen

## Literatur zum Thema Symmetrie (1-4: für Liebhaber, 5-7: empfohlen)

1. A. Zschunke, Molekülstrukturen (Spektrum)
2. H. Brunner, Rechts oder Links (WILEY-VCH)
3. I. Hargittai / M. Hargittai, Symmetry through the Eyes of a Chemist (VHC)
4. International Tables for Crystallography, Vol. A
5. K. Sielaff, Einführung in die Theorie der Gruppen (Salle)
6. J. M. Hollas, Die Symmetrie von Molekülen (de Gruyter Lehrbuch)
7. W. Borchardt-Ott, Kristallographie (Springer)

## Nützliche (und auch lustige) Internetadressen zum Thema Symmetrie

### Allgemeines und Geschichte

[http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4/Kap\\_IV/Allgemein.html](http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4/Kap_IV/Allgemein.html)

<http://bastian16.tripod.com/PDF/punktgruppen.pdf> (Bestimmen von Punktgruppen)

<http://newton.ex.ac.uk/research/qsystems/people/goss/symmetry/Symmetry.html>

<http://www.staff.ncl.ac.uk/j.p.goss/symmetry/index.html> (Point Group Symmetry)

### Anwendungen in der Physik

[http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/reise\\_zum\\_urknall/pix/spaan.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/reise_zum_urknall/pix/spaan.pdf)

<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/wh/pams/Lohse.pdf>

### Anwendungen in der Chemie

[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/symmetrie\\_0.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/symmetrie_0.html)

[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/PDF\\_Demos/so\\_mathe.pdf](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/PDF_Demos/so_mathe.pdf)

[http://www.tu-chemnitz.de/physik/OHL/v1\\_sc/VL02.pdf](http://www.tu-chemnitz.de/physik/OHL/v1_sc/VL02.pdf) (Gruppen)

[http://www-schuetz.chemie.uni-regensburg.de/files/grouptheory/theochem\\_grouptheory\\_part1.pdf](http://www-schuetz.chemie.uni-regensburg.de/files/grouptheory/theochem_grouptheory_part1.pdf) (Gruppen)

[http://jones.math.unibas.ch/~walser/Stud\\_Arbeiten/Kunst/Haldimann.pdf](http://jones.math.unibas.ch/~walser/Stud_Arbeiten/Kunst/Haldimann.pdf)

[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/symmetrie\\_2\\_5\\_1.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/symmetrie_2_5_1.html) (Punktgruppen)

<http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC2/Punktgruppen/Punktgruppen.htm>

(Charaktertabellen)

<http://online-media.uni-marburg.de/chemie/bioorganic/stereo/kapitel1.html>

(Stereochemie)