

Skript zu Strukturgeologie

Educational Material

Author(s):

Burg, Jean-Pierre

Publication date:

2018

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000279496>

Rights / license:

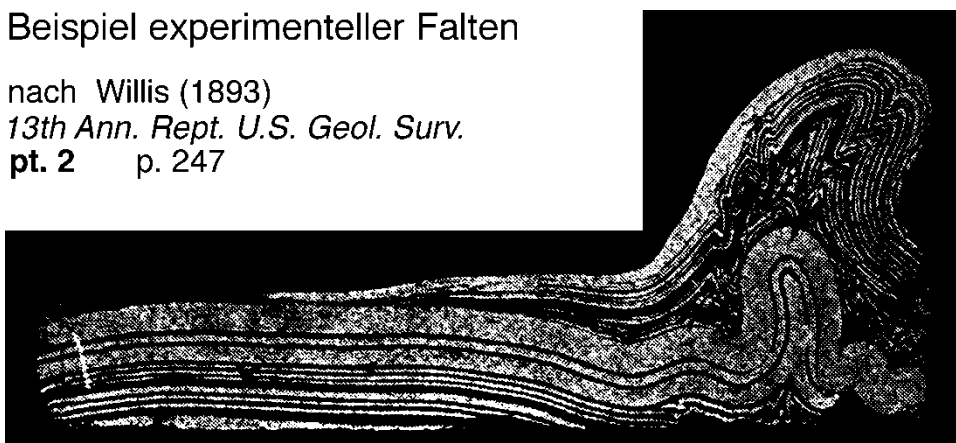
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

FALTEN

Das Wort **Falte** wird benutzt, wenn eine einzelne oder ein ganzer Stapel von ebenen Flächen, wie zum Beispiel Sedimentschichten, durch plastische (d.h. permanente) und duktile Verformung gebogen oder gekrümmt werden. Falten im Gestein variieren in ihrer Grösse von mikroskopischen Runzeln bis zu **Verfaltung** (*convolution*) in der Grössenordnung von Bergen. Sie kommen in allen Massstäben vor, einzeln als isolierte Falten oder als ausgedehnte **Faltenzüge** (*fold trains*) mit unterschiedlicher Grösse. Langgezogene Faltenssysteme, die sich in regionalem Massstab verfolgen lassen, werden als **Faltengürtel** (*fold belts*) bezeichnet. Falten-gürtel sind gewöhnlich mit konvergenten Plattengrenzen und kompressiver Druckspannung verbunden.

Beispiel experimenteller Falten

nach Willis (1893)
 13th Ann. Rept. U.S. Geol. Surv.
 pt. 2 p. 247



Falten bilden sich bei unterschiedlichen Drücken, Porendrücken und Temperaturen. Dies wird bezeugt durch ihr Auftreten in Sedimenten, in Sedimentgesteinen, im ganzen Spektrum von metamorphen Gesteinen und in einigen magmatischen Gesteinen. Falten können durch eine primäre oder sekundäre Verformung entstehen. Im ersten Fall findet die Faltung während der Bildung des Gesteins statt, im zweiten Fall handelt es sich um eine tektonische Verformung. **Rutschfalten** (*slumps*) im weichen Sediment und **Fliessfalten** (*flow folds*) in der Lava sind primäre Falten. In der Strukturgeologie beschäftigen wir uns aber hauptsächlich mit tektonischen Falten, sie werden in der Regel durch eine schichtparallele Verkürzungskomponente des Gesteins gebildet. Die aufsehenerregende Gegenwart von Falten in Scherzonen und Gebirgsgürteln zeigt an, dass verteilte, duktile Verformung eine allmähliche kontinuierliche Veränderung der Schichtung im Gestein herbeiführte, sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch. Die Form der Falten spiegelt oft die Bildungsbedingungen wider. Wie dem auch sei, muss daran gedacht werden, dass das Nichtvorhandensein von Falten nicht unbedingt auf das Fehlen einer Verformung hindeutet.

In dieser Vorlesung befassen wir uns zuerst mit der Beschreibung und der morphologischen Klassifizierung von Falten. Solche Klassifikationen haben das Ziel unter Verwendung der Faltengeometrie und des Entwicklungsgrades von Falten, den Umfang der Deformation anzuzeigen; aus diesem Grund sind der Versatz und die Verformungsmuster in die Entwicklung des deformierten Gebietes miteinzubeziehen. Es ist immer noch schwierig, die dynamischen oder kinematischen Informationen von diesen Strukturen zu extrahieren, da ihre Formen in den Gesteinen sehr variabel sind. Diese Veränderlichkeit reflektiert Unterschiede bezüglich einiger Parameter wie Schichtdicke, anfängliche Schichtunregelmässigkeiten, Verformungsintensität, Deformationsweg, Rheologie und Anisotropie.

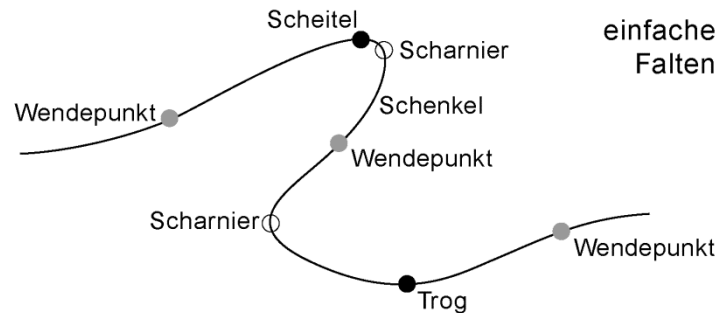
Falten einer einzelnen Fläche - Geometrische Grundterminologie

Eine Falte kann eine einzelne Fläche, eine Lage mit zwei Grenzflächen oder einen Schichtstapel mit mehreren Grenzflächen verbiegen. Aufgrund der beträchtlichen morphologischen Vielfalt von Falten

ist ein umfassendes Vokabular zur qualitativen Beschreibung dieser Strukturen entstanden. Einfachheitshalber wird eine Falte erst nur durch eine einzelne verbogene Fläche definiert.

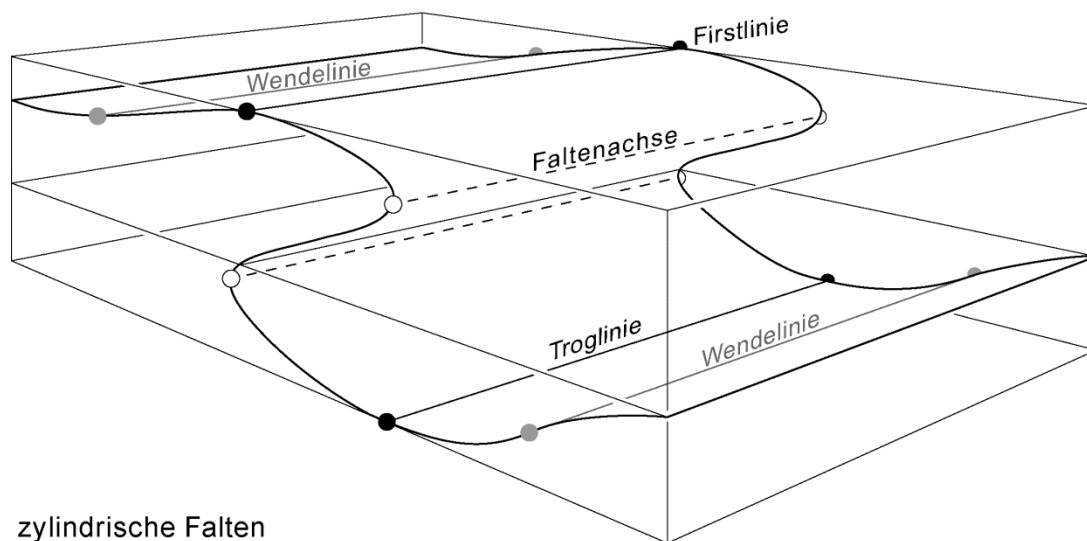
Morphologie einer verfalteten Fläche: Scharnier, Schenkel und Wendepunkte

Der Krümmungsradius einer verfalteten Fläche verändert sich schrittweise von Punkt zu Punkt. Der Punkt mit dem kleinsten Krümmungsradius wird **Scharnier** (*fold closure* oder *hinge*) genannt. Es ist von zwei Gebieten mit grösserem Krümmungsradius umgeben, den **Schenkeln** (*limbs*).



Falten sind dreidimensionale Strukturen. Die Verbindung der Scharnierpunkte auf einer bestimmten gefalteten Fläche definiert die **Scharnierlinie** oder **Faltenachse** (*fold axis, hinge line*). Die Faltenachse ist das wichtigste strukturelle Element einer Falte, da die Strukturen in dieser Richtung maximale Kontinuität zeigen. Einige Falten können mehrere Faltenachsen haben (z.B. die **Kofferfalten**, *box folds*).

Die **Wendepunkte** (*inflections*) sind Punkte mit Nullbiegung, in denen sich der Krümmungssinn von einer konvexen zu einer konkaven Kurve ändert.



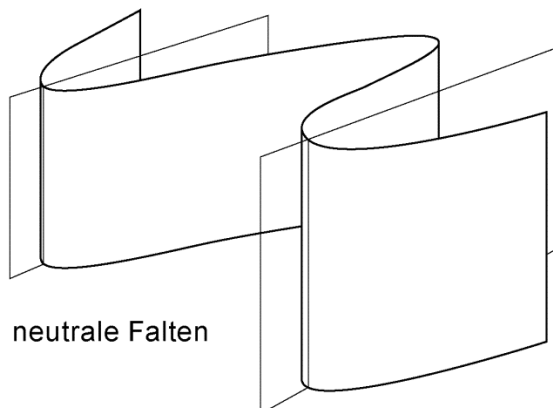
Auf beiden Faltenschenkeln liegt je eine **Inflexionslinie** (oder **Wendelinie**, *inflection line*), welche die Wendepunkte verbindet. Damit kann der Faltenschenkel neu definiert werden, als der Abschnitt zwischen der Scharnierlinie und der nächsten Inflexionslinie, die der geometrische Ort der Umkehrpunkte ist. Wenn der Schenkel ein gerades Segment hat, wird sein Mittelpunkt praktischerweise als Wendepunkt genommen.

Antiform und Synform

Eine Falte, die nach oben konvex ist, bildet eine **Antiform** (*antiform*), eine die nach unten konvex ist, eine **Synform** (*synform*). Sie treten häufig in Paaren auf. Gebiete im Innern, d.h. auf der konkaven Seite einer verfalteten Schicht werden als **Kern** (*core*) der Falte bezeichnet. Die konvexe und konkave Grenzfläche einer verfalteten Schicht werden mit **Aussenseite** (*extrados*) bzw. **Innenseite** (*intrados*)

bezeichnet. Anti- und Synklinale sind grosse (megaskopische, im regionalen Massstab) Anti- bzw. Synformen.

Falten, die weder eine Antiform noch eine Synform sind und deren Schenkel seitwärts konvergieren, werden als **neutrale Falten** (*neutral folds*) bezeichnet. Dazu gehören vertikal abtauchende Falten, Falten mit horizontalen Achsenebenen und Falten die parallel zum Einfallen ihrer Achsenebene abtauchen.

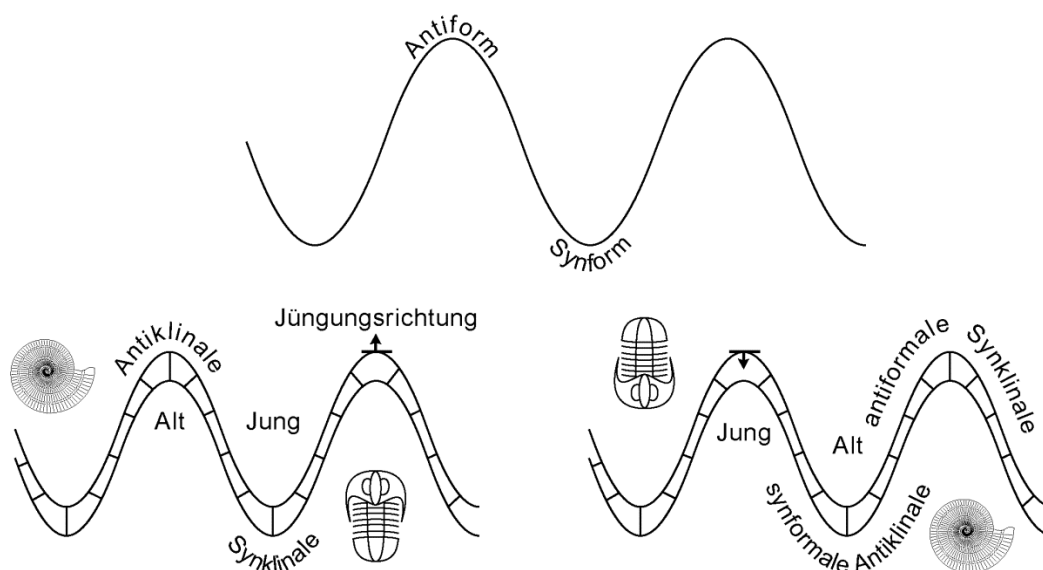


Eine ovale Antiform ohne bestimmbare Richtung der Scharnierlinie, bei der die Schichtung von einem zentralen Punkt in alle Richtungen abfällt, ist ein **Dom** (*dome*). Dementsprechend ist eine Synform ohne bestimmte Scharnierichtung, d.h. die Schichtung fällt aus allen Richtungen ein, ein **Becken** (*basin*). Dome und Becken bilden eine Struktur, die man mit Eierschachteln vergleichen kann.

Antiklinale und Synklinale

Antiklinale (Sattel) (*anticline*) und **Synklinale (Mulde)** (*syncline*) sind Bezeichnungen mit stratigraphischer Bedeutung.

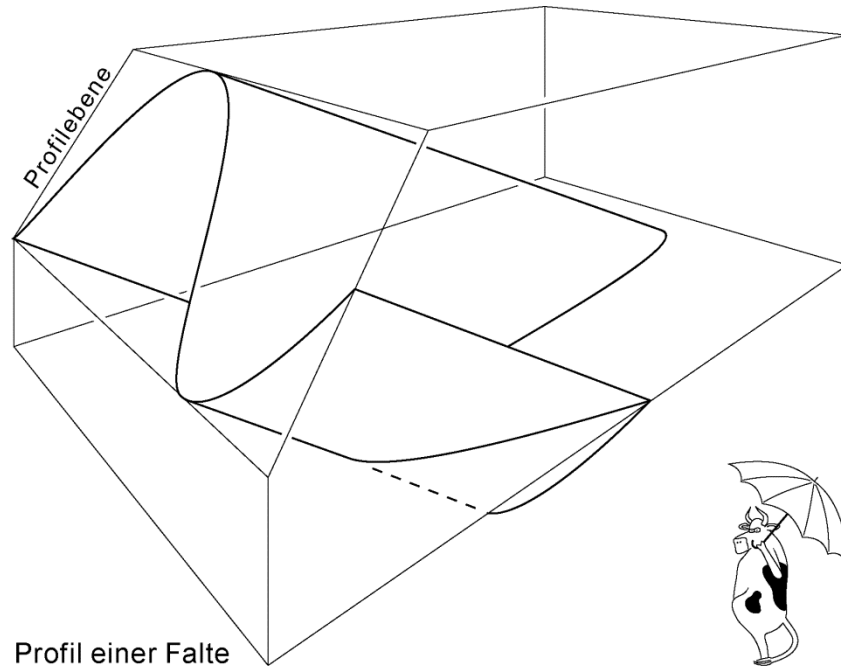
Eine Antiklinale ist eine Antiform, bei der die ältesten Schichten im Kern der Falte liegen, während bei der Synklinale die jüngsten Schichten im Kern der Synform liegen. In einfachgefalteten Bereichen sind Antiklinalen antiformal und Synklinale synformal. In mehrmals gefalteten Gebieten sind **antiformale Synklinale** (Antiform mit dem jüngsten Gestein im Kern) und **synformale Antiklinale** (Synform mit dem ältesten Gestein im Kern) häufig. In solchen Gebieten ist es wichtig die **Verjüngungsrichtung** (*younging direction*) zu bestimmen, welche die Richtung ist, in der die Schichten entlang der Achsenebene jünger werden.



Profil

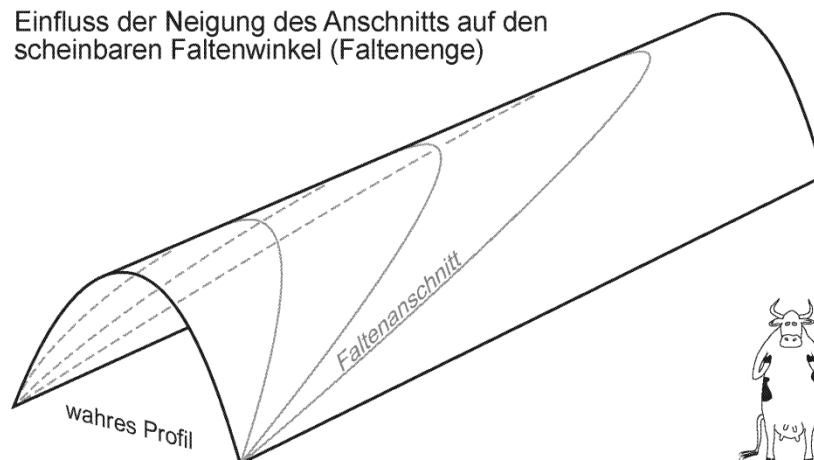
Eine zylindrisch (siehe weiter unten) gefaltete Fläche wird völlig in einer Ebene senkrecht zur Faltenachse beschrieben. Das **Profil** (*profile* oder *transverse profile*) einer Falte ist der Schnitt, der sowohl senkrecht zur Faltenachse als auch zur Achsenebene verläuft. Dies unterscheidet es von einem geologischen Abschnitt, der gewöhnlich in einer vertikalen Ebene gezeichnet wird.

Alle verschiedenen geometrische Eigenschaften eines Faltenprofils und die Orientierung der Faltenachse zusammen bestimmen den **Stil** (*style*) einer Falte.



Das Profil ist eine Bezugsfläche, die benutzt wird, um alle geometrischen Eigenschaften der Falte zu beschreiben und zu messen: Höhe oder Amplitude, Wellenlänge, Enge und Rundung. In der Tat schwanken diese Aspekte mit dem Winkelverhältnis zwischen jeder möglichen Anschnittfläche und der gefalteten Fläche. Alle verschiedenen geometrische Eigenschaften eines Faltenprofils und die Orientierung der Faltenachse zusammen bestimmen den **Stil** (*style*) einer Falte.

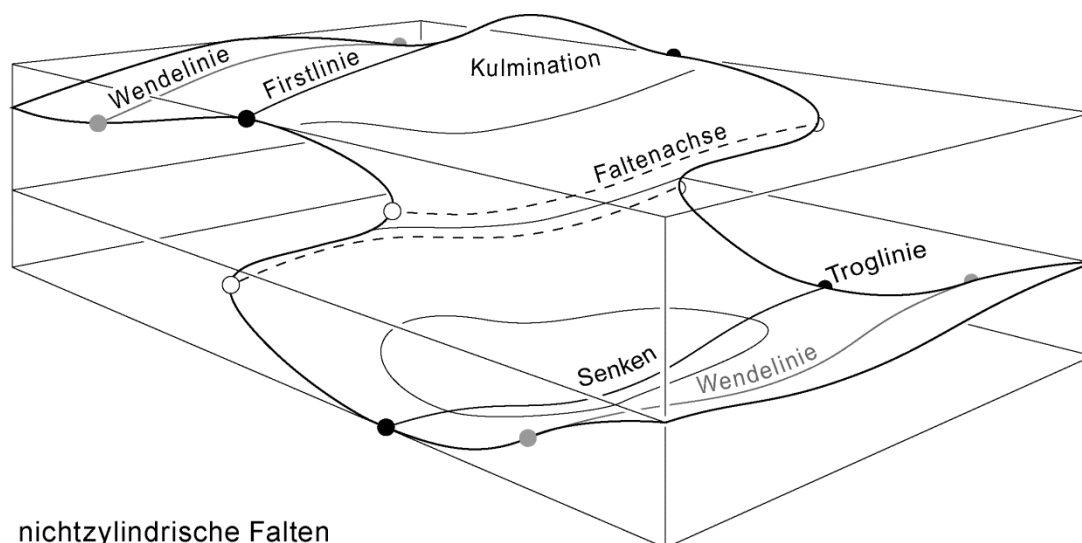
Einfluss der Neigung des Anschnitts auf den scheinbaren Faltenwinkel (Faltenenge)



Scheitel, Kulmination und Trog

Der höchste Punkt einer Antiform wird **Kamm** oder **Scheitel** (*crest*) genannt und der niedrigste Punkt einer Synform der **Trog** (*trough*). Gedachte Linien, die Scheitel oder Trog einer Schichtfläche

miteinander verbinden, werden als **Scheitellinie** (*crest line*) bzw. **Troglinie** (*trough line*) bezeichnet. Dies sind auch die Linien, wo das Einfallen der Schichtung von einer Richtung auf die entgegengesetzte Richtung wechselt; entlang der Scheitellinie fallen sie voneinander weg, entlang der Troglinie fallen sie aufeinander zu. Scheitel- und Troglinien sind weder horizontal noch geradlinig, sondern sie verändern die Höhe entlang ihres Verlaufs.

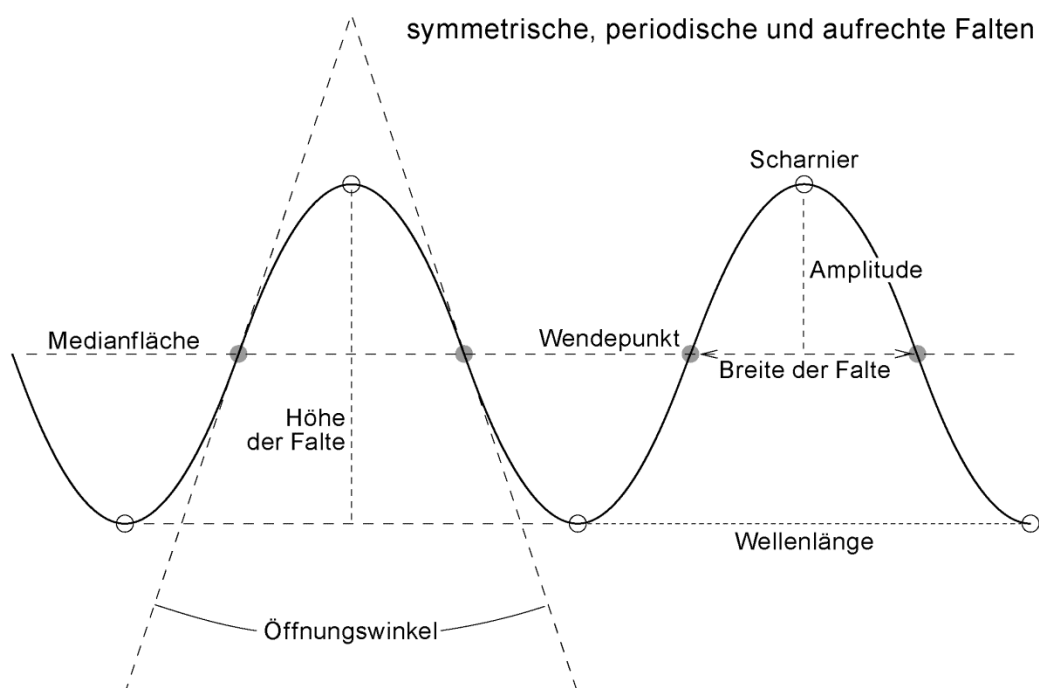


nichtzylindrische Falten

Die hohen Punkte der Scheitellinie werden **Kulminationen** (*culminations*) genannt; die tiefen Punkte der Troglinie sind **Senken** (*depressions*).

Öffnungswinkel

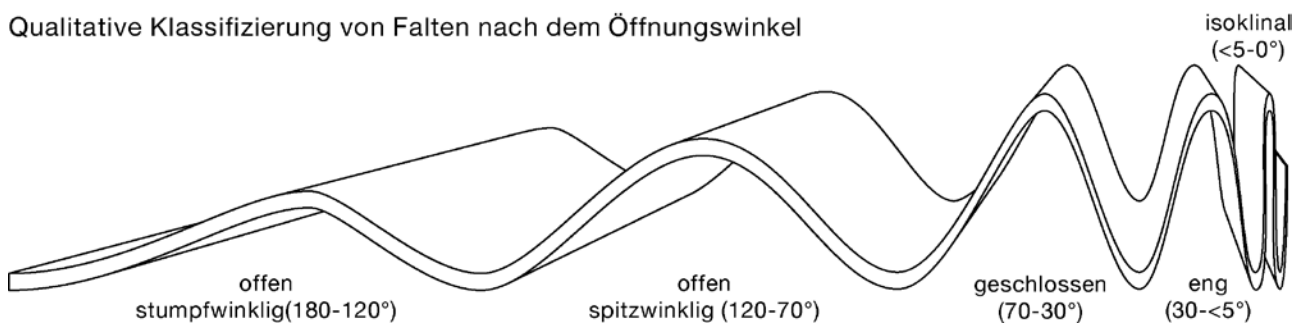
In Profilsicht wird der kleinere Winkel zwischen den Schenkeln einer Falte als **Öffnungswinkel** (*inter-limb-angle*) bezeichnet, der eine Masseinheit für die **Enge einer Falte** (*tightness of the fold*) ist. Er ist definiert als der Winkel zwischen den Tangenten von zwei nebeneinander liegenden Wendepunkten. Dieser Winkel kann die Intensität der Verkürzung widerspiegeln.



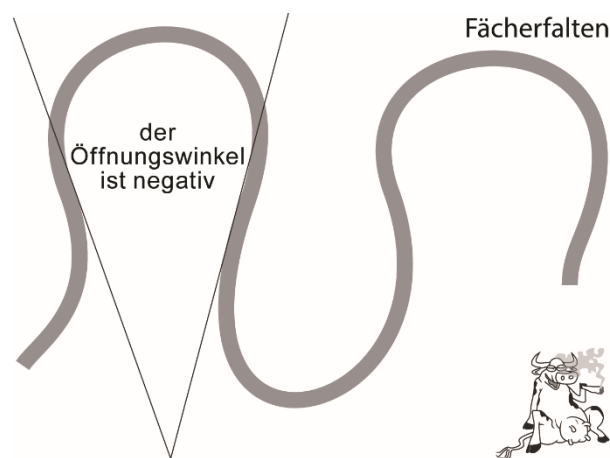
Eine qualitative Klassifizierung von Falten beruht auf dem Öffnungswinkel. Man unterscheidet fünf Klassen:

Öffnungswinkel	Klassen	englische Bezeichnung
180 bis ca. 120°	offen stumpfwinklig	<i>gentle</i>
120 -- 70°	offen spitzwinklig	<i>open</i>
70 -- 30°	geschlossen	<i>close</i>
kleiner als 30°	eng	<i>tight</i>
0°, d.h. parallele Schenkel	isoklinal	<i>isoclinal</i>
< 0°	Fächer-	<i>fan</i>

Qualitative Klassifizierung von Falten nach dem Öffnungswinkel



Fächerfalten (*fan folds*) haben negative Öffnungswinkel.

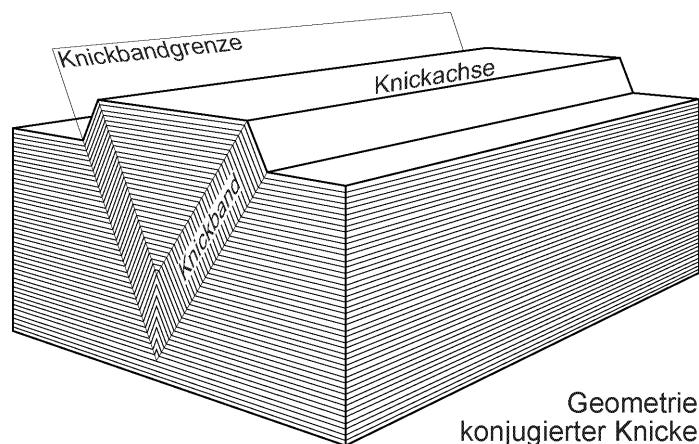


In einer **spitzen Falte** (*cusp*) sind die Scharnier- und die Wendepunkte der gleiche Punkt; mit anderen Worten die Falte hat keinen Umkehrpunkt. Ihre Enge wird durch einen spitzen Winkel zwischen den Tangenten zur gefalteten Oberfläche an der Spitze definiert.

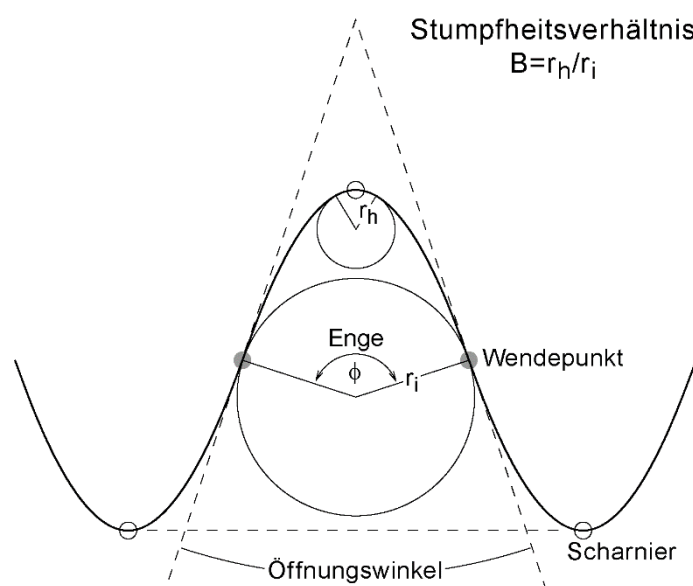
Faltenschluss

Der **Faltenschluss** (*fold closure*) zeigt die Richtung an, in der die Schenkel zusammenlaufen. Zum Beispiel schliesst eine Falte nach Westen. Die Form des Faltenschlusses hängt davon ab wie sich die Krümmung der gefalteten Fläche um das Scharnier ändert. Das Scharnier kann sehr scharf sein und die Faltenschenkel relativ gerade, oder die Krümmung kann sich eher regelmässig um die Falte ziehen. Faltenschlüsse können qualitativ als **gerundet** oder **eckig** beschrieben werden. **Pfeilspitz-** oder sogenannte **Flammenfalten** haben scharfe Scharniere mit unterschiedlichen, oft sigmoidal gekrümmten Schenkeln. **Knickfalten** (*kink folds*) haben gerade, flache Schenkel (es gibt keinen Wendepunkt) und sehr eckige Scharniere (die Scharnierzone wird auf einen Punkt verringert).

Knickfalten entwickeln sich in sehr anisotropen Gesteinen in denen die gut entwickelte Anisotropie entweder ein dünner, lamellierter Lagenbau oder eine Schieferung ist. Wenn solche Knickfalten stark asymmetrisch sind, kann die schmale, blättrige Zone, die vom kurzen Schenkel gebildet wird, als **Knickband** bezeichnet werden. Die seitliche Begrenzung eines Knickbands durch die Achsenebenenspur wird auch **Knickbandgrenze** genannt.



Das **Stumpfheitsverhältnis** (*bluntness ratio*) ist eine quantitative Größe, die beschreibt, wie rund oder eckig das Scharnier ist. Es wird als $B = r_h / r_i$ definiert, in dem r_h der Radius des Scharniers ist. r_i ist der Radius des Kreises, der tangential zu den Schenkeln an den zwei Wendepunkten ist. Der Winkel ϕ zwischen den zwei Wendepunktnormalen wird manchmal verwendet, um die **Enge** (*tightness*) der Falte zu definieren.



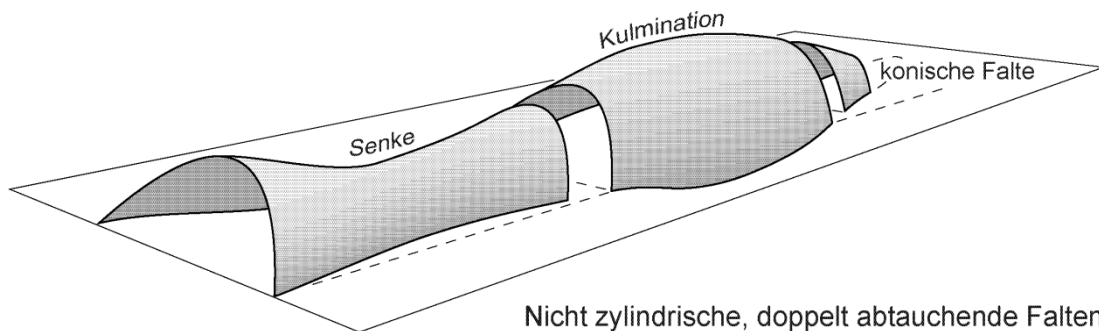
Zylindrizität

Zylindrische Falten

Falten werden oft als ebene **zylindrische** (*cylindrical*) Strukturen bezeichnet. Dies bedeutet, dass die Faltenachse als gerade Linie verläuft, die immer und über die ganze Krümmung der Falte parallel ist und dass die Faltenachsen von aneinander gereihten Falten derselben Generation, immer parallel sind. Die Zylinderachse liegt parallel zur Faltenachse. Mit anderen Worten in drei Dimensionen erscheint eine zylindrische Falte als gerade Linie, wenn sie parallel zu ihrer Achse angeschnitten wird. In jedem anderen Schnitt erscheint die Spur der gefalteten Fläche wellenförmig.

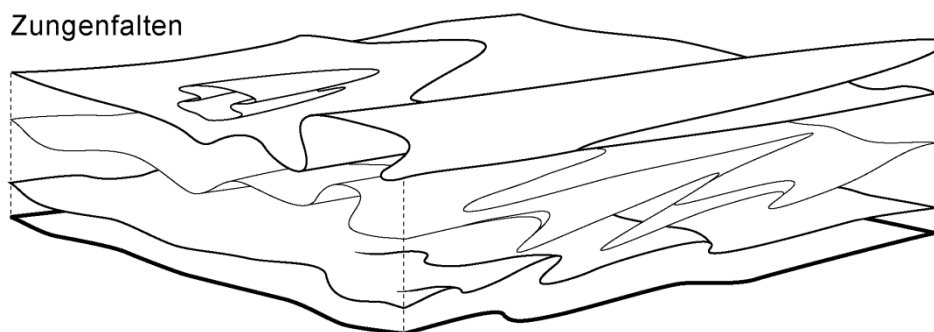
Doppelt abtauchende Falten

Falten weichen häufig von der ideal zylindrischen Querschnittsgeometrie ab und sind somit **nicht zylindrisch** (*non-cylindrical*). Scharniere von nicht zylindrischen Falten verändern ihr Streichen und Fallen: die gebogenen Faltenachsen liegen auf einer einzigen Ebene (der Achsenebene). Eine **konische Falte** (*conical fold*) beschreibt eine nicht zylindrisch gefaltete Fläche, die in etwa der Geometrie eines Kegels entspricht. Wenn in einem solchen Fall das Einfallen des Scharniers wechselt, entsteht eine **doppelt abtauchende Falte** (*doubly plunging fold*). Wenn die Scharnierlinie von einem Höhepunkt abfällt, ist der Hochpunkt eine **Kulmination** (*culmination*) (die Achse ist dann nach oben konvex). Fällt sie aber auf einen Tiefpunkt zu, so ist dieser eine **Senke** (*depression*) (die Achse ist dabei nach oben konkav). Fast kreisförmige Kulminationen und Senken werden **Dome** (*dome*) und **Becken** (*basin*) genannt.



Zungenfalten

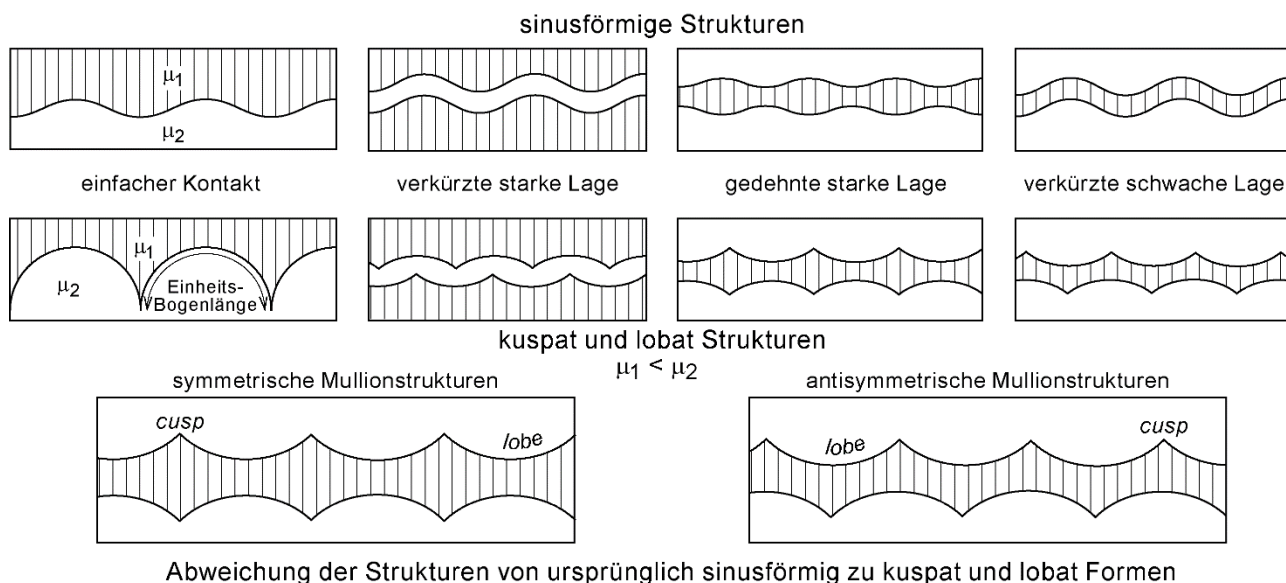
Falten mit ausgeprägten Krümmungen entlang ihrer Faltenachsen, so dass sie um mehr als 90° bis zu „Haarnadelkurven“ gebogen werden, werden als **Zungenfalten** (*sheath folds*) bezeichnet. Zungenfalten haben eine lange (gedehnte) Achse entlang der Länge ihrer „Zunge“, während die Querschnitte, die zu dieser Längsachse normal sind, eine geschlossene, elliptische Geometrie haben. Solche elliptischen Abschnitte oder verschachtelte Ringe definieren **Augen-Falten** (*eye-folds*). Diese röhrenförmigen Falten entstehen normalerweise durch heterogene einfache Scherung, oder durch Fließen von sehr schwachen Aufwölbungen (*buckles*), oder durch Störung der Scherströmung, z.B. durch eine Schieferungsausbuchtung um einen starren Klasten.



Im Umfeld progressiver Faltenamplifizierung während der Scherung können sich die Faltenachsen wie passive Marker verhalten und seitlich in die Scherrichtung hinein rotieren, bis sie bei sehr grossen Verformungen subparallel zur Scherrichtung zu liegen kommen. Leichte Biegungen der Ausgangswölbungsscharniere werden während der folgenden Scherung betont, bis Falten mit stark gekrümmten Faltenachsen gebildet werden. Zungenfalten sind also charakteristisch für die stark verformten Bereiche einer Scherzone.

Verbiegen einer Grenzfläche

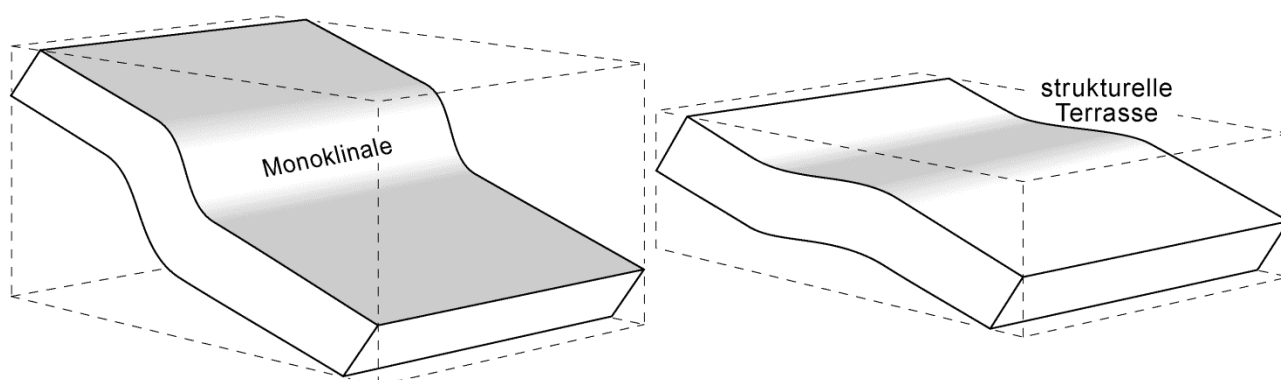
Stauchfalten können auch die ebenen Grenzflächen zwischen Materialien kontrastierender Viskosität beeinflussen. Wenn dies geschieht, haben die Falten eine charakteristische Form. Das eine Scharnier ist breit und gerundet (*lobate folds*), das entgegengesetzte ist eng und V-förmig.



Diese *cusps* zeigen immer zum Material mit der höheren Viskosität. Folglich kann in Aufschlüssen mit Kuspale-Lobate-Falten auf den ersten Blick gesagt werden, welche Lage zur Entstehungszeit der Falten die steifere war. Dies ist eine weit verbreitete Ursache der Mullion-Strukturen.

Homoklinale – Monoklinale

Eine Abfolge von Schichten mit gleich bleibendem parallelem Verhalten über ein weites Gebiet bildet eine **Homoklinale** (*homocline*).

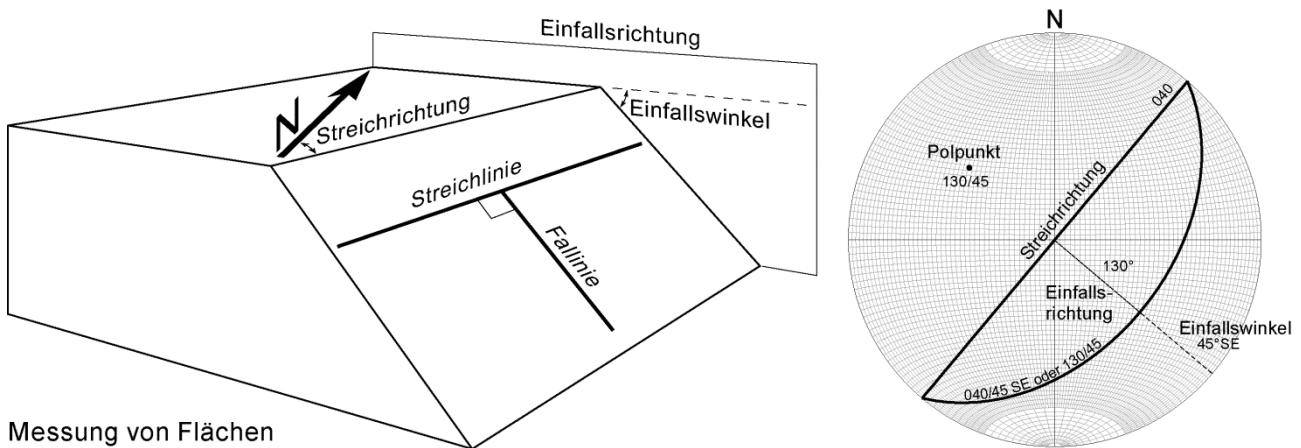


Eine Antiform und eine angrenzende Synform grenzen einen einzelnen Schenkel ab. Solch ein Biegungspaar, das eine lokale Zunahme des regionalen Einfallens (d.h. nur einen gekippten, stufenartigen Schenkel in einer ansonsten sub-horizontalen leicht einfallenden Sequenz) beinhaltet, ist eine **Monoklinale** (*monocline*). Umgekehrt bildet eine lokale Abflachung des Einfallens eine **strukturelle Terrasse**. Monoklinalen und strukturelle Terrassen sind typische grossräumige Strukturen entlang von Rändern breiter Becken oder gehobener Plattformen in Kratonen.

Orientierung einer Ebene

Per Definition braucht es zur Faltung die Rotation einer Schicht. Diese Rotation kann schlussendlich grosse Werte erreichen (90° oder mehr). Konsequenterweise sind verfaltete Gebiete dadurch charakterisiert, dass die Schichten nicht mehr horizontal liegen sondern geneigt sind. Zuerst müssen wir wissen, wie man die Neigung und Richtung einer Schicht misst und dokumentiert. Die **Stellung** (*attitude*) ist die räumliche Orientierung einer jeden Struktur. Um diese zu erfassen, bedarf es einiger Messungen. Wir wissen, dass geometrisch gesehen zwei sich schneidende Linien eine einzelne Fläche aufspannen.

- Das **Streichen** (*strike*) ist die Richtung der Schnittlinie zwischen einer geneigten Schicht und einer gedachten horizontalen Ebene.
- Senkrecht zum Streichen ist die **Fallrichtung/Fallazimuth** (*direction of dip*), die Linie mit der grössten Neigung auf der Schicht.
- Das **Fallen** (*dip*) bezeichnet den Winkel zwischen der Schicht und der Horizontalebene. Man misst das Fallen einer gedachten vertikalen Ebene, die orthogonal zum Streichen orientiert ist (also das Fallazimut beinhaltet).



Das Fallen und die Streichrichtung oder das Fallazimut definieren jede geologische Fläche vollständig.

Morphologische Klassifizierung: Mächtigkeitsänderungen einer verfalteten Schicht

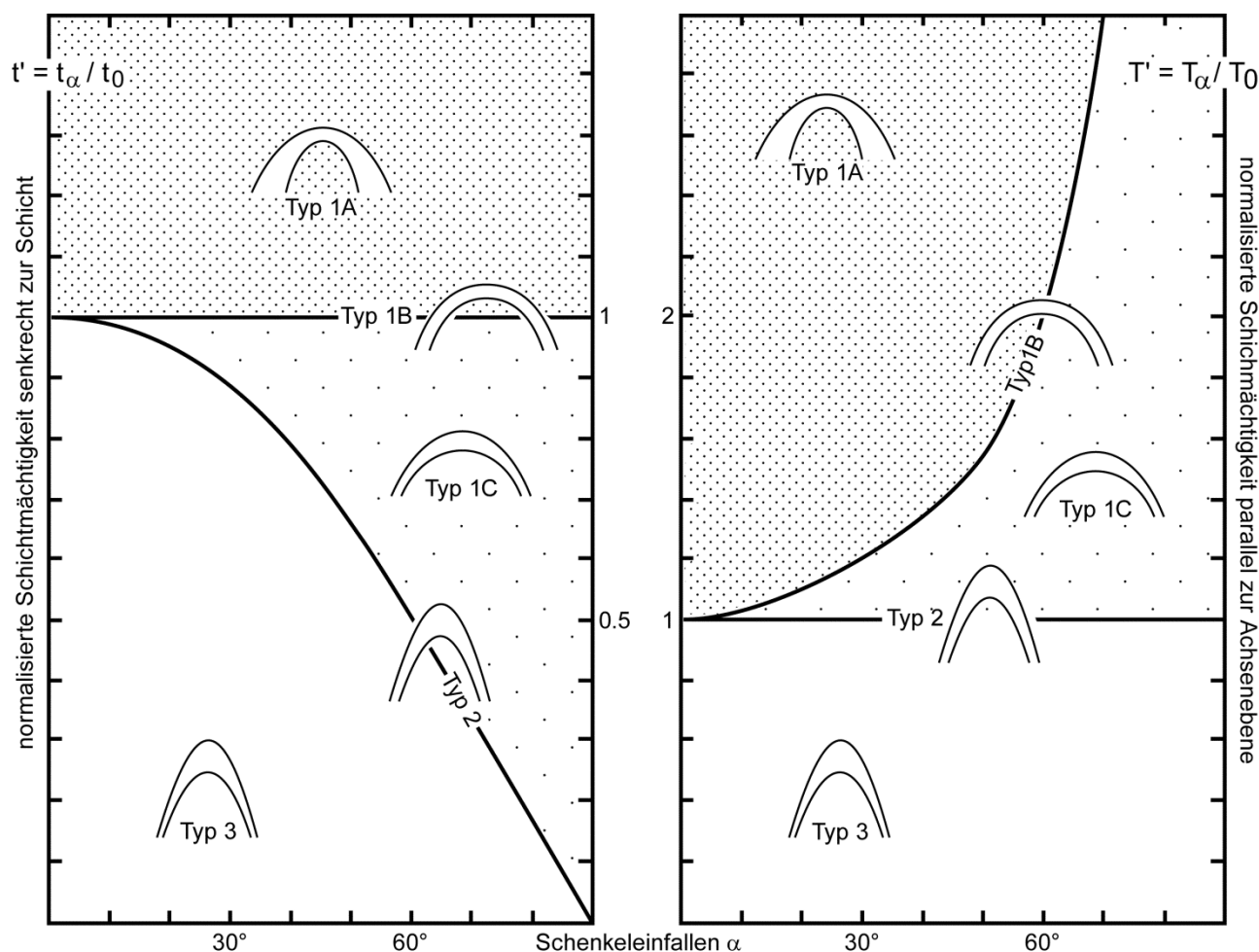
Strukturgeologen haben lange die Faltenformen für die Bestimmung der Verkürzungsgrösse infolge der Faltung von Gesteinen verwendet. Sie haben eine Reihe von Techniken ausgearbeitet, um die Verkürzung von Faltenformen zu schätzen.

Geometrische Parameter

Die variablen Biegungen von Scharnierzonen und Schenkeln aufeinanderfolgender Flächen spiegeln Variationen von Schichtmächtigkeiten wider, die durch die Faltung verursacht wurden. Diese Formänderungen können durch drei voneinander abhängige Messungen auf dem Profil kategorisiert werden:

- α = der Fallwinkel an verschiedenen Punkten der verfalteten Schichten;
- t_α = Schichtmächtigkeit senkrecht zur Schicht, wo α gemessen wurde;
- T_α = Schichtmächtigkeit parallel zur Achsenebene, wo α gemessen wurde.

Diese drei Messungen bilden die Grundlage einer Klassifizierung, die zur **Isogonenmethode** (*dip isogon patterns*) führt: ein Isogon (*dip isogon*) ist eine Linie (im Faltenprofil), die Punkte gleichen Schenkeleinfallens in aufeinanderfolgenden Schichtgrenzen verbindet.



Morphologische Klassifikation basierend auf den Mächtigkeitsänderungen einer verfalteten Schicht nach Ramsay, 1967, McGraw-Hill Inc.

Diese Klassifikation beinhaltet eine indirekte Beziehung überall auf der Falte:

$$T_\alpha \cdot \cos \alpha = t_\alpha$$

Im Faltenscharnier gilt $t_0 = T_0$. Das Verhältnis $t' = t_\alpha / t_0$ oder $T' = T_\alpha / T_0$ kann berechnet, und gegen α aufgetragen werden. Dieses Verhältnis zeigt, wie sich die orthogonale Schichtdicke mit dem Winkel α verändert.

Konstruktion

Isogonen werden wie folgt konstruiert.

- Die Spur der Achsenebene wird auf die Profilsansicht einer Falte (d.h. senkrecht auf die Faltenachse) gezeichnet.
- Eine andere Linie wird senkrecht dazu gezeichnet, bevorzugterweise ausserhalb der Falte.
- Mit einem Winkelmesser, der entlang der Linie senkrecht zur Achsenebene verschoben wird, können Punkte auf der gefalteten Fläche bestimmt werden, deren Tangente mit der Linie senkrecht zur Achsenebene bestimmte Winkel einschliessen.
- Je zwei Punkte, für die dieser Winkel gleich ist und die auf benachbarten, gefalteten Flächen liegen, sind durch eine Isogone verbunden.

Das resultierende Muster der Isogonen, über die ganze Falte betrachtet, beschreibt qualitativ die Mächtigkeitsveränderungen und die unterschiedliche Krümmung zwischen zwei nebeneinander liegenden Grenzflächen. Wenn die Isogonen zum Kern der Falte hin konvergieren, ist die Krümmung des äusseren Bogens weniger stark als die des inneren Bogens (im Kern der Falte). Umgekehrt, wenn

die Isogonen zum Kern der Falte hin divergieren, ist die Krümmung des äusseren Bogens grösser als die des inneren Bogens.

Faltentypen

Die Charakteristiken von Isogonen führen zu einer Klassifizierung von drei Faltenklassen mit zwei zusätzlichen Unterklassen: Typ 1 sind Falten mit konvergenten Isogonen gegen den Kern der Falte (die Krümmung des inneren Bogens ist grösser als die Krümmung des äusseren Bogens), Typ 2 sind Falten mit Isogonen parallel zur Achsenspur (die Krümmung des inneren Bogens ist gleich der Krümmung des äusseren Bogens), und Typ 3 sind Falten mit divergenten Isogonen (die Krümmung des inneren Bogens ist kleiner als die Krümmung des äusseren Bogens).

Diese Typen werden auf dem t' / α Diagramm dargestellt. Die Klassifikation ist rein geometrisch und sagt nichts über Faltungsprozesse aus.

Der Typ 1 ist unterteilt in drei Untertypen je nach Grad der Konvergenz:

- Typ 1A ist stark konvergierend. Dies bedeutet, dass die Dicke der verfalteten Lagen im Scharnier geringer ist als auf dem Schenkel.
- Typ 1B ist der Spezialfall einer parallelen Falte. Die Isogonen sind senkrecht zur Faltenoberfläche.
- Typ 1C ist schwach konvergierend. Dies bedeutet, dass die Dicke der verfalteten Lagen im Scharnier grösser ist als auf dem Schenkel.

Falten des Typs 2 sind kongruent. Die Krümmung von nebeneinander liegenden verfalteten Flächen bleibt immer dieselbe.

Bei Falten des Typs 3 nimmt die Krümmung in Richtung zum Faltenkern sukzessive von einer verfalteten Fläche zur anderen ab.

Faltensysteme und mehrlagige Falten – noch mehr Definitionen

Eine Falte verbiegt einzelne Flächen oder Schichten. Letztere werden durch zwei (verbogene) Flächen begrenzt. Die zwei Grenzen einer verfalteten Schicht werden in Bezug auf den Kern mit **Aussenseite** (*extrados*) bzw. **Innenseite** (*intradors*) bezeichnet. Eine Gruppe von Falten, häufig mit variablen Formen, Grössen und Orientierungen, die räumlich und genetisch miteinander zusammenhängen, bilden ein **Faltensystem**. Ein Grossteil der Geometrie der Falten bezieht sich auf die Form des Profils. In einem Querprofil kann die wellenförmige Spur der verfalteten Schicht durch eine Funktion $y = f(x)$ beschrieben werden. Dabei verbindet die x-Achse zwei aufeinanderfolgende

Wendepunkte und die y-Achse liegt senkrecht dazu und zeigt nach oben. In diesem Fall liegen die Wendepunkte wo $d^2y/dx^2=0$ gilt, und das Scharnier wo der absolute Wert von d^2y/dx^2 maximal ist.

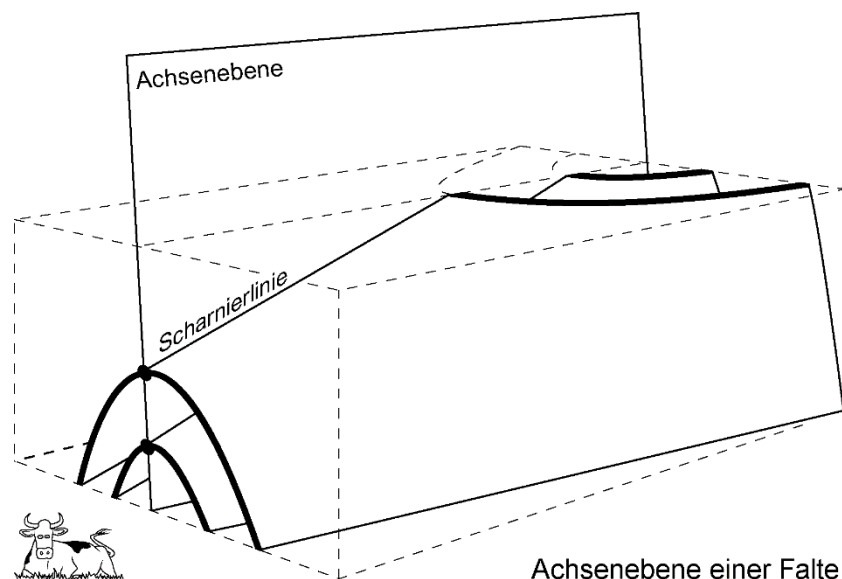
Da die unterschiedlichen Einflüsse sehr komplex zusammenwirken werden hier einige unterschiedliche vereinfachte Situationen diskutiert. Beispiel für den Einfluss mehrerer Lagen bei einer Verfaltung:

- A) Eine einzelne kompetente Lage in einer inkompetenten Matrix entwickelt sich zu einer **ptygmatischen Falte**.
- B) Mehrere Lagen mit unterschiedlicher Kompetenz in einer inkompetenten Matrix entwickeln wenn ihre Kontaktverformungszonen ($W_d/2$ von der **Medianfläche** (*median surface*) aus gemessen) weit genug auseinander liegen **disharmonische Falten**.
- C) Überlappen sich die einzelnen Kontaktverformungszonen und sind die kompetenten Lagen ungefähr gleich dick dann entwickeln sich **harmonische Falten**.
- D) Überlappen sich die einzelnen Kontaktverformungszonen und sind die kompetenten Lagen unterschiedlich dick dann entwickeln sich **polyharmonische Falten**.

Achsenenebene

Eine Falte kann auf eine einzelne Fläche beschränkt sein. Im Allgemeinen enthält sie aber mehrere übereinander liegende Schichten oder Lagen. Die Verbindungsfläche der Scharnierlinien von nebeneinander liegenden Schichten einer Falte nennt man **Achsenfläche** (*axial surface*). Wenn die

Achsenfläche planar ist, heisst sie auch **Achsenebene** (*axial plane*). Die Achsenfläche ist nur in der Vorstellung vorhanden. Oft ist sie gebogen und liegt gleich weit von beiden Schenkeln entfernt, d.h. sie halbiert den Öffnungswinkel der Falte. Polyklinale Falten haben mehrere Achsenflächen.



Orientierung von Falten

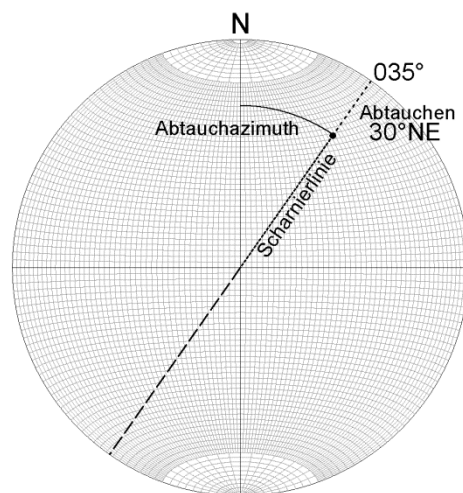
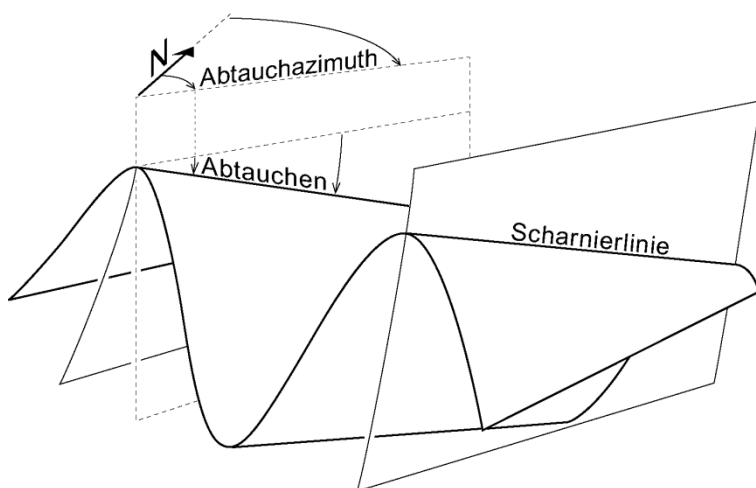
Die Orientierung von Falten ist vollständig gegeben durch die Faltenachse, die als Linie behandelt wird, und durch das **Fallen** (*dip*) und **Streichen** (*strike*) der Achsenebene.

Eine allgemeine Regel besagt, dass das Abtauchazimut und das Abtauchen von untergeordneten Falten benutzt werden kann für Extrapolationen in der Feldarbeit. Sie zeigen auch die Orientierung der Falten erster Ordnung derselben Generation an.

Orientierung der Faltenachsen

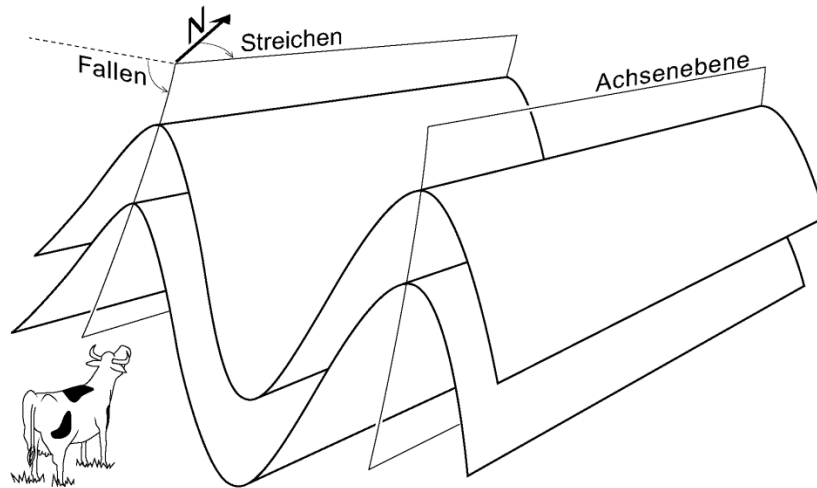
Die Orientierung der Faltenachse wird durch ihr **Abtauchen** (*plunge*) und das **Abtauchazimut** (*direction of plunge/trend*) definiert.

- Das Abtauchen entspricht der Neigung der Linie gemessen in einer gedachten vertikalen Fläche, welche die Linie enthält.
- Das Abtauchazimut entspricht dem Streichen (das Azimut, der Richtungswinkel im Verhältnis zu Norden) der gedachten vertikalen Fläche, welche die abtauchende Linie enthält.



Orientierung der Achsenebene

Die Achsenebene schneidet die Scharnierzone der gefalteten Fläche entlang der Faltenachse. Die Orientierung der Achsenebene wird mit dem Fallen und Streichen angegeben oder, in kompakterer Form, mit Fallen und **Fallazimut** (*direction of dip*). Bezüglich irgendeiner Fläche ist das Streichen die Richtung der Horizontalen Linie auf dieser Fläche; das Fallen ist der grösste Winkel zwischen der Fläche und der Horizontalebene. Das Fallazimut irgendeiner Fläche ist die Richtung senkrecht zum Streichen (entspricht der Falllinie) und zwar entlang der Fläche nach unten gesehen.



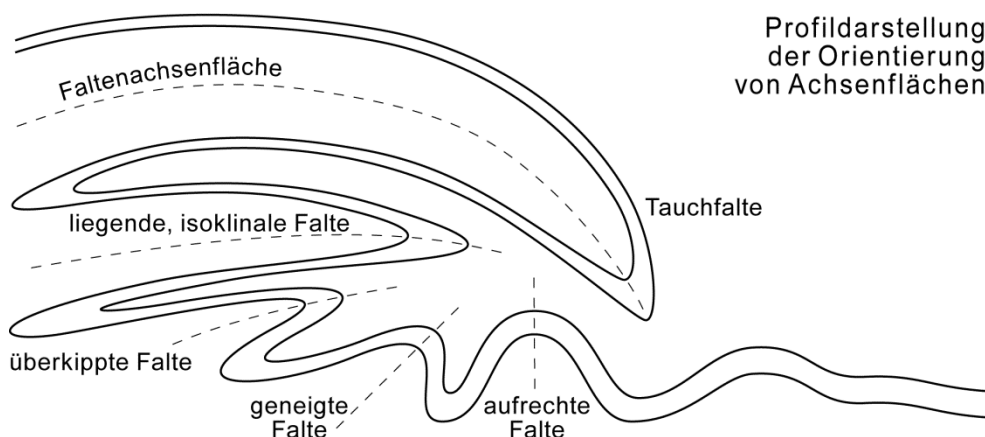
Eine halbquantitative Klassifikation ist für Falten mit subhorizontalen Achsen gültig.

Aufrechte (*upright*) Falten haben eine ungefähr vertikale stehende Achsenebene.

Falten mit einer einfallenden Achsenebene sind **geneigt** (*inclined*). Man unterscheidet je nach Neigung der Achsenebene: $80^\circ < \text{steil} < 60^\circ < \text{mittelsteil} < 30^\circ < \text{flach} < 10^\circ$ geneigte Falten wenn der steilere Schenkel eine Stratigraphie mit einer Verjüngungsrichtung nach oben hat oder vertikal steht. Die Falte ist **überkippt** (*overfold*), wenn beide Schenkel in die gleiche Richtung wie die Achsenebene einfallen und der steilere Schenkel eine überkippte Stratigraphie hat.

Liegende (*recumbent*) Falten weisen eine sub-horizontale Achsenebene auf. Grosse liegende Falten, mit mehreren Kilometer langem überkipptem Schenkel werden manchmal als **Faltendecken** (*fold nappes*) bezeichnet.

Tauchfalten (*plunging folds*) haben eine Achsenebene, die mehr als 90° rotiert ist.



Polyklinale (*polyclinal*) Falten sind Falten mit mehreren sub-parallelen Scharnieren, aber verschieden orientierten Achsenebenen.

Schichtmächtigkeit – parallele und kongruente Falten

Änderungen in der Schichtmächtigkeit reflektieren Materialeigenschaften der gefalteten Schichten. Es gibt zwei Grundgeometrien: Parallele und kongruente Falten. Annäherungen an diese zwei Grundgeometrien werden in Gesteinen zwar beobachtet, die Mehrzahl natürlicher Falten liegt jedoch meist irgendwo dazwischen. Ausserdem können einige Schichten eine fast ideale Morphologie erreichen, andere wiederum nicht.

Parallele Falten

Falten, deren Schichtmächtigkeit senkrecht zu den Schichten gemessen über die ganze Falte konstant ist, werden als **parallele** (*parallel*) Falten bezeichnet. Das heisst, dass die verbogenen Schichten parallele Kurven sind. Es gibt zwei Arten:

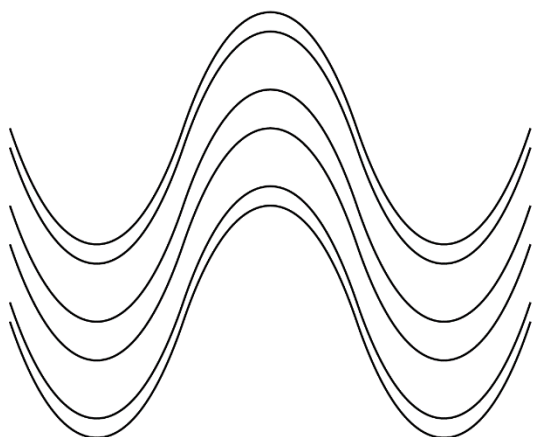
- Gerundete Formen, die regelmässige gebogene Schenkel und ausgedehnte Scharniere haben.
- Eckige Formen haben gerade Schenkel und schmale Scharnierzonen.

Gerundete parallele Falten

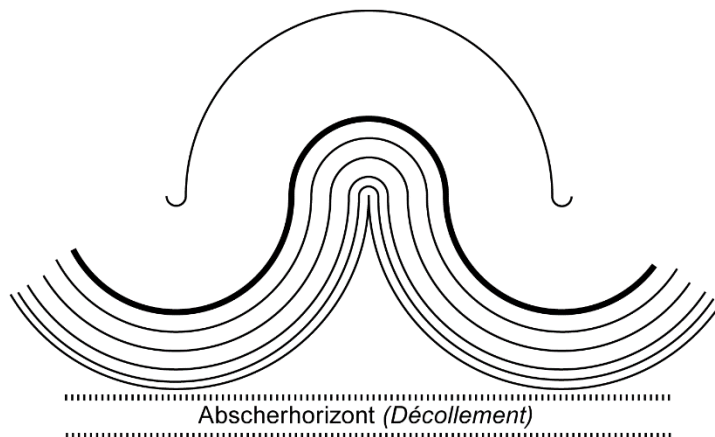
Im Profil einer **konzentrischen** (*concentric*) Falte beschreiben die gefalteten Schichtflächen kreisförmige Bögen mit einem gemeinsamen Zentrum. Konzentrische Falten erzeugen ein Raumproblem, weil die Antiformen geometrisch nach unten hin auf einen Punkt (**Kuspat**) verringert werden. Genau gleich werden die tiefen, breiten Synformen nach oben hin ausgekilt. Diese geometrische Beschränkung erfordert, dass parallele Falten auf einer nicht-gefalteten, ebenen Flachbahn auslaufen, und dass weiche Gesteine im kuspäten Kern der Antiformen fließen.

Effekt der Schichtmächtigkeit auf die allgemeine Faltengeometrie

ideale, kongruente, harmonische Falten

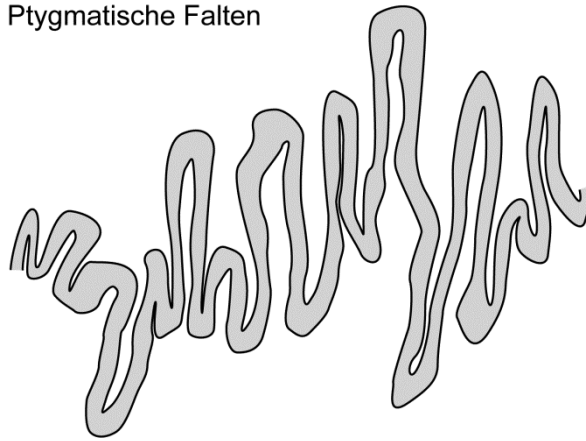


ideale, parallele, disharmonische Falten



Ptygmatische (*ptygmatic*) Falten beinhalten eine unregelmässig gefaltete, isolierte „Lage“, typischerweise eine quarz-feldspatische Ader, die in einer weitaus duktileren schiefrigen oder vergneisten Matrix liegt. Ptygmatische Falten sind charakteristisch für hochgradigmetamorphes Gestein und kommen meistens in Migmatiten vor. Sie bilden Züge von gerundeten Falten mit beinahe konstanter Dicke, in denen die Amplitude gross (>10) und die Wellenlänge, in Bezug auf die Schichtdicke, klein (Mäander-Muster) ist. Es sind Falten mit lobater, verschnörkelter Erscheinung (z.B. werden die Schenkel in sich selbst zurückgefaltet und damit wird der Öffnungswinkel negativ) und sie tendieren dazu polyklinal zu sein. Sie haben jedoch keine Schieferung parallel zur Achsenebene.

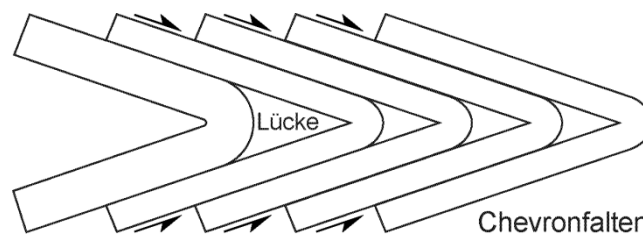
Ptygmatische Falten



Konvolute (*convolute*) Falten haben ausgesprochen gebogene Achsenflächen und sind meistens disharmonisch (benachbarte Schichten haben nicht die gleiche Wellenlänge und Amplitude). Wie die ptygmatischen Falten sehen diese gerundeten, parallelen Falten aus wie komplex verdrehte aber regelmässige Strukturen ohne axiale Achsenebenenschieferung. Sie sind charakteristisch für abgerutschte, weiche Sedimente.

Eckige parallele Falten

Chevronfalten (*chevron folds*) sind symmetrische oder leicht asymmetrische Falten mit geraden Schenkeln, scharfen eckigen Scharnieren und spitzen Öffnungswinkeln. Sie treten häufig in Mehrlagenabfolgen von abwechselnd kompetenten und inkompetenten Schichten auf und verbinden folglich die kongruenten (in den inkompetenten Schichten) und parallelen (in den kompetenten Schichten) Faltengeometrien. Asymmetrische Chevronfalten werden auch **Zickzack-Falten** (*zigzag folds*) genannt.



Knickfalten (*kink folds*) sind Chevronfalten in stark geschieferten, anisotropen Gesteinen.

Kongruente Falten

Falten, bei denen die "Schichtmächtigkeit" parallel zur Achsenfläche gemessen konstant ist, sind **kongruent** (*similar*). Kongruente Falten haben generell die Tendenz im Profil ihre Wellenlänge, Symmetrie und allgemeine Form beizubehalten, d.h. ihre Form wiederholt sich in allen angrenzenden Schichten: die Schichten werden zu ähnlichen Kurven verbogen. Als geometrische Konsequenz behalten die Schichtungen ihre ursprüngliche Stärke nicht gänzlich bei und die Schenkel sind dünner als die Scharniere. Kongruente Falten sterben nicht aus, weder nach unten noch nach oben, die Krümmung im Scharnier bleibt immer gleich. Dies ist insbesondere der Fall für Knickfalten.

In Gebieten mit starker Faltung ist es nicht ungewöhnlich, isolierte, enge Faltscharniere (*fold closures*) - eingeklemmt zwischen scheinbar unverfalteten Schieferungsflächen oder Schichtflächen – anzutreffen; sie liegen zwischen nicht verfalteten Gesteinsschichten. Solche Strukturen werden als **Intrafolialfalten** (*intrafolial folds*) oder, wenn sie unzusammenhängend sind, als **schenkellose Intrafolialfalten** (*rootless intrafolial folds*) bezeichnet.

Geplättete Falten

Das Konzept der geplätteten Falten basiert auf der Idee, dass extreme Verkürzung bei grossen Amplituden die Form der Stauchfalten ändert. Die homogene Plättung verdickt die Scharnierregionen

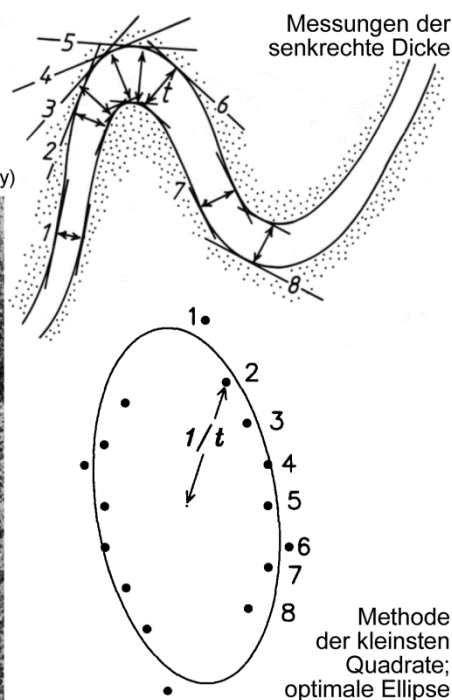
und verdünnt die Schenkel. Dabei verringert sich stufenweise der Öffnungswinkel. Schätzungen der Abplattungsverformung in den Typ-1C Falten erlauben aus diesen parallele Falten zu konstruieren, um die Grösse der Stauchungsverkürzung zu bestimmen. Eine einfache und direkte Methode um Abplattungsverformung (die späte reine Scherung der Stauchfaltung) zu messen geht davon aus, dass Typ 1C, 2 oder 3 Falten vorher eine Form des Typs 1B (konzentrische und parallele) hatte. Die Schätzung der Stauchungsverkürzung erlaubt die Wiederherstellung der ursprünglichen Länge und Mächtigkeit der unverfalteten Lagen, vorausgesetzt, dass die schichtparallele Verkürzung während der Anfangsstadien der Faltung bedeutungslos ist. Einige Techniken ermöglichen den Grad der Plättung zu bestimmen, bei der Annahme, dass die Verformung homogen war. Keine dieser Techniken betrachtet jedoch die Verkürzung der Schicht, die der Faltung vorausgeht. Daher gibt jede dieser Techniken eine minimale Verformung, die der Falte zugeordnet ist. Eine weitere Einschränkung ist, dass alle dieser Techniken zweidimensional sind.

t' / α Methode: Der Verformungsbetrag wird daraus abgeleitet wie die orthogonale Dicke t und die Dicke T (Dicke parallel zur axialen Fläche der gefalteten Schichten) als Funktion des Einfallens des Schenkels wechseln.

Inverse Mächtigkeitmethode: Die Dicke der Schicht an irgendeinem Punkt um die Falte ist umgekehrt proportional zur Ausdehnung (Schlusslänge/Ursprungslänge) der Tangente zur gefalteten Schicht im Fallwinkelpunkt, in dem die Stärke gemessen wird. Die Technik ist einfach. (1) Die orthogonale Mächtigkeit t wird im rechten Winkel zur Tangenten der gefalteten Schichtung gemessen. (2) Dann werden die inversen Mächtigkeiten $1/t$ von einem gemeinsamen Punkt aus, eine jede in der Richtung der Tangentenlinie (d.h. in Polarkoordinaten) geplottet. Es entsteht ein Verformungsellipsoid, das die Verformung aufgrund von Plättung zeigt.

Verformung der geplätteten Stauchfalten
nach Lisle (1992)
Journal of Structural Geology 14(3)
369-371

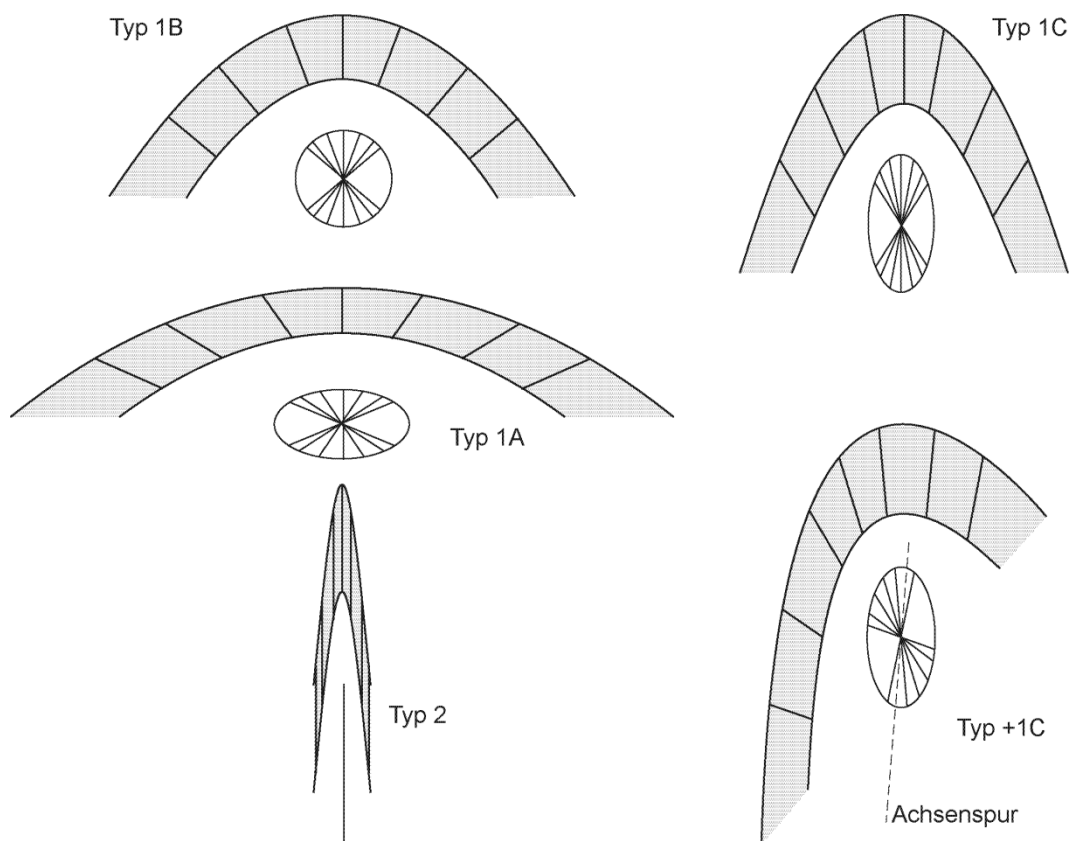
Falten im präkambrischen Gneisen (Gjeroy Island, Norway)



Abstand Faltenmitte-Schichtmittellinie: Die Methode basiert auf der Annahme, dass in konzentrischen Falten die Längen in jeder möglichen Richtung von der Faltenmitte zur gefalteten Lage den Durchmessern einer Ellipse entsprechen, die das gleiche Längenverhältnis von grosser zu kleiner Hauptachse wie die Verformungsellipse hat. (1) Auf dem Faltenprofil, wird die Faltenmitte als die Intersektion zwischen der Achsenebene und der mittleren Linie, die die Wendepunkte verbindet definiert. (2) Linien werden in regelmässigen Winkelabstand

durch die Faltenmitte gezeichnet. (3) Die Länge d wird von der Faltenmitte zur Mitte der gefalteten Schicht entlang jeder Linie gemessen. Wieder entsteht eine Verformungsellipse auf einem Polardiagramm, in dem d als Funktion der Linienrichtung geplottet wird.

Isogon Rosette: Die Isogonen werden auf das Profil einer geplätteten parallelen Falte gezeichnet, indem auf der Schichtinnen- und der Schichtaußenseite die Punkte verbunden werden, in denen das Einfallen gleich ist. Sie können in einer Rosette geordnet werden, wenn die Isogonen verschoben werden, ohne ihre Orientierung zu ändern, bis der Mittelpunkt jeder Isogone der Schnittpunkt aller Isogonen wird. Die Endpunkte der Isogonen in der resultierenden Rosette verfolgen eine charakteristische Linie, die die Faltengeometrie definiert. Diese Kurve ist ein Kreis für parallele Falten, eine Ellipse in geplätteten parallelen Falten, und sie verringert sich auf ein Punktpaar in den kongruenten Falten. Da Isogonen sich als Materiallinien während der Abplattung verformen, stellt die charakteristische Linie nämlich die Ellipse, die Verformungsellipse in geplätteten parallelen Falten dar. Die ``Isogonenrosetten`` Methode erlaubt die Darstellung einer gegebenen Falte durch einen Punkt im $R_S - \theta$ Diagramm, wobei R_S und θ das zweidimensionale Verformungsverhältnis bzw. der Winkel zwischen der maximalen Hauptverformungsachse und der Spur der Faltenachsebene sind.

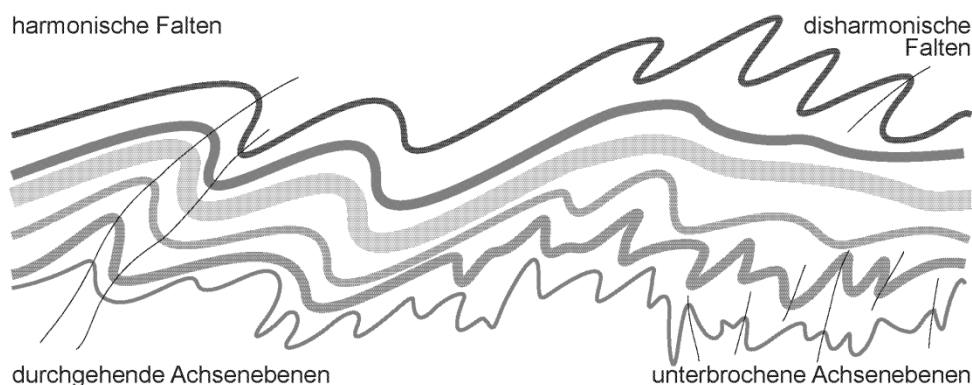


Profilschnitte mit Isogonen in verschiedenen Faltenarten mit charakteristischen Kurven (Kennlinien) durch die Endpunkte der Isogonenrosetten nach Srivastava & Shah 2008 *Journal of Structural Geology*, **30**, 44-450

Achsenkontinuität- harmonische und disharmonische Falten

Falten, in denen die Achsenebene über mehrere aufeinanderfolgende gefaltete Schichten oder Lagen zusammenhängend ist, und die ungefähr dieselbe Wellenlänge und Amplitude haben werden als **harmonisch** (*harmonic*) bezeichnet. Typischerweise sind kongruente Falten, die ihre Form über ein ganzes Profil hinweg beibehalten, harmonisch. Falten, deren Amplitude, Wellenlänge und Form sich entlang der unterbrochenen Achsenkontinuitäten von einer Schicht zur nächsten ändern, sind

disharmonisch (*disharmonic*). Disharmonische Falten entwickeln sich, weil die verschiedenen Lagen unterschiedliche rheologische Eigenschaften besitzen. Dabei werden inkompetente Lagen zusammengedrückt und passen sich der Form an, die ihnen durch die kompetenten Lagen auferlegt wird.



Disharmonische Falten kommen speziell oft in Gebieten mit parallelen Falten vor, da solche Falten mit zunehmender Tiefe entlang ihrer Achsenebene aussterben. Manchmal wird im Kern sogar übermäßige Einengung erreicht. Aus diesem Grund ist die Ausdehnung der parallelen Falten aufs Zentrum der Krümmung beschränkt. Weiter davon entfernt wird Verkürzung durch Bruchbildung oder durch einen anderen Faltungstyp bewerkstelligt. Nach unten können sie in einem **Abscherhorizont** (*detachment*) oder in einer **décollement**-Fläche enden, entlang der sie von unterliegenden, ungefalteten Schichten getrennt (entkoppelt) sind. Der Jura wird oft zitiert für solche Beziehungen.

Konvolute (*convolute*) und **ptygmatische** (*ptygmatic*) Falten sind charakteristisch für hochgradig-metamorphes Gestein und kommen meistens in Migmatiten vor. Dort treten sie auf in Verbindung mit unregelmäßig verfalteten isolierten Lagen, typischerweise pegmatitische Adern, die in einer schiefrigen oder vergneisten Matrix liegen. Konvolute Falten haben ausgesprochen gebogene Achsenflächen und sind meistens disharmonisch. Ptygmatische Falten sind gerundete Falten mit konstanter Dicke, in denen die Amplitude gross (>10) und die Wellenlänge, in Bezug auf die Schichtdicke, klein ist. Es sind beinahe parallele Falten mit lobater, verschnörkelter Erscheinung (z.B. werden die Schenkel in sich selbst zurückgefaltet und damit wird der Öffnungswinkel negativ). Meistens sind sie konzentrisch und sie tendieren dazu poliklinal zu sein.

Symmetrie

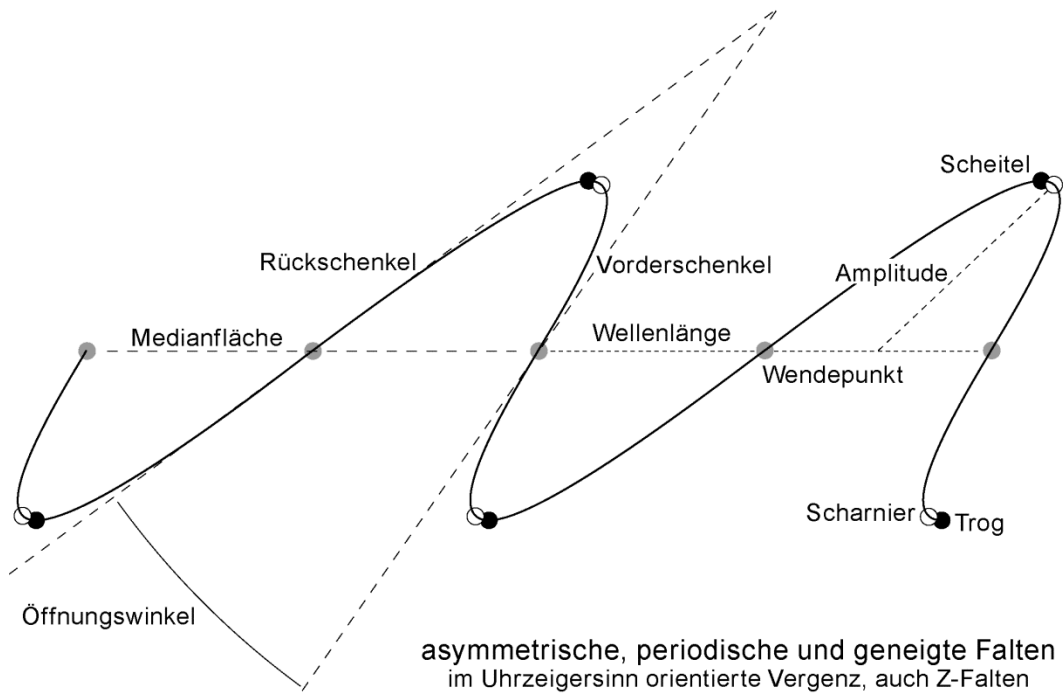
Falten sind **symmetrisch** wenn die Achsenebene den Öffnungswinkel halbiert und dann die Falte in zwei spiegelsymmetrisch Hälften teilt. In symmetrischen Falten mit vertikaler Achsenebene verläuft die Scharnierlinie durch den Scheitel (höchster Punkt) oder durch den Trog (tiefster Punkt) jeder Antiform bzw. Synform.

Wenn die Faltenschenkel ungleich lang sind und/oder die Halbierende des Öffnungswinkels nicht mit der Achsenebene zusammenfällt, so ist die Achsenebene keine Symmetrieebene. Solche Falten sind **asymmetrisch**. Ihre Neigungsrichtung indiziert eine relative Bewegungsrichtung, die sog. **scheinbare Vergenz** (*apparent vergence*).

Vorderschenkel - Rückschenkel

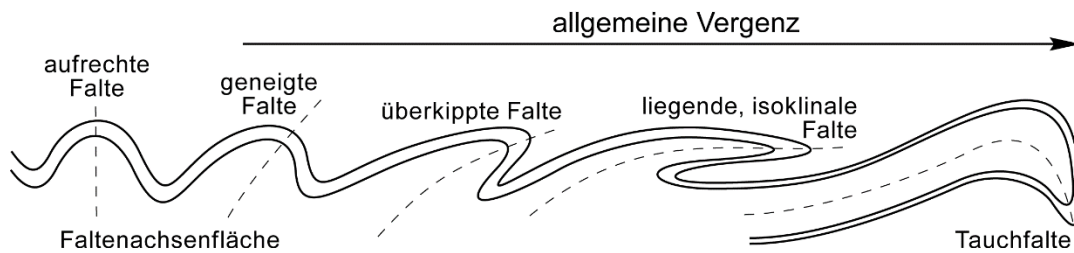
Der **Vorderschenkel** (*forelimb*) ist der steile kurze Schenkel einer asymmetrischen Antiform, wohingegen der **Rückschenkel** (*back limb*) der flachere längere Schenkel der gleichen Antiform ist. Der Vorderschenkel ist in überkippten Antiklinalen stratigraphisch überkippt. Der Vorderschenkel mit seiner verkehrten Stratigraphie ist der **Verkehrt-** (*reversed*) oder **überkippte** (*inverted, overturned*) **Schenkel**, der Rückschenkel ist als **Normal-** (*normal*) oder **aufrechter Schenkel** bekannt. Beachten Sie, dass der überkippte Schenkel steiler und der normale **Schenkel** flacher als die

Achsenenebene einfällt. Beachten Sie auch, dass in den überkippten Schenkeln die Schichtung in entgegengesetzter Richtung zum Fallazimut jünger wird.



Facing und Vergenz

Die Richtung der scheinbaren Bewegung des oberen, längeren Schenkels in Bezug zum kürzeren Schenkel einer asymmetrischen Falte wird **Vergenz** (*vergence*) genannt. In diesem Sinne ist die Vergenz einfach die Richtung der Asymmetrie. Die **wahre Vergenz** (*true vergence*) oder das **Facing** (*facing*) ist die Verjüngungsrichtung entlang der Achsenenebene, senkrecht zur Faltenachse. Gleichmässig vergente, asymmetrische Falten sind charakteristisch für Überschiebungsgürtel. Die Vergenz wird nützlich, wenn man die regionale Richtung des Transportes ausarbeitet; die Vergenz hilft auch die Beobachtungsposition auf grossen Falten zu bestimmen.



Antiformale Synklinalen und synformale Antiklinalen können als **downward facing folds** bezeichnet werden, weil die Stratigraphie vollständig invertiert ist. Im umgekehrten Fall von "normalen" Antiklinalen und Synklinalen spricht man auch von **upward facing folds**. Eine häufige Situation, bei der **downward facing folds** entstehen, kommt bei der Wiederverfaltung von stratigraphisch verkehrt liegenden Schenkeln überkippter Falten vor.

Achtung:

In der deutschsprachigen Literatur wurde der Begriff verwendet für die Richtung, in welche die Falte geneigt ist. Dies mit dem Gedanken, dass die Form des Faltenprofils eine eingefrorene Bewegung und Rotation darstellt, welche für die Entwicklung der Faltenform wichtig war. Die Ableitung des **Bewegungsschemas** (*movement picture*) ist denkbar, wo alle Falten eine einzige einseitige regionale Bewegung anzeigen. Wie dem auch sei, die Asymmetrie von untergeordneten Falten variiert von einem zum anderen Schenkel der Grossfalte (siehe Abschnitt über parasitäre Falten weiter unten). Genau genommen sollte nur die Form allein einer Falte, als scheinbare Vergenz definiert sein. Dies im Gegensatz zur wahren Vergenz/Facing, welche die Verjüngungsrichtung miteinbezieht. Das Bewegungsschema ergibt sich aus der wahren Vergenz von Falten erster Ordnung.

Faltenzüge

Ein **Faltenzug** (*fold train*) ist eine Reihe von Falten entlang einer bestimmten Schicht oder einer Serie von Schichten.

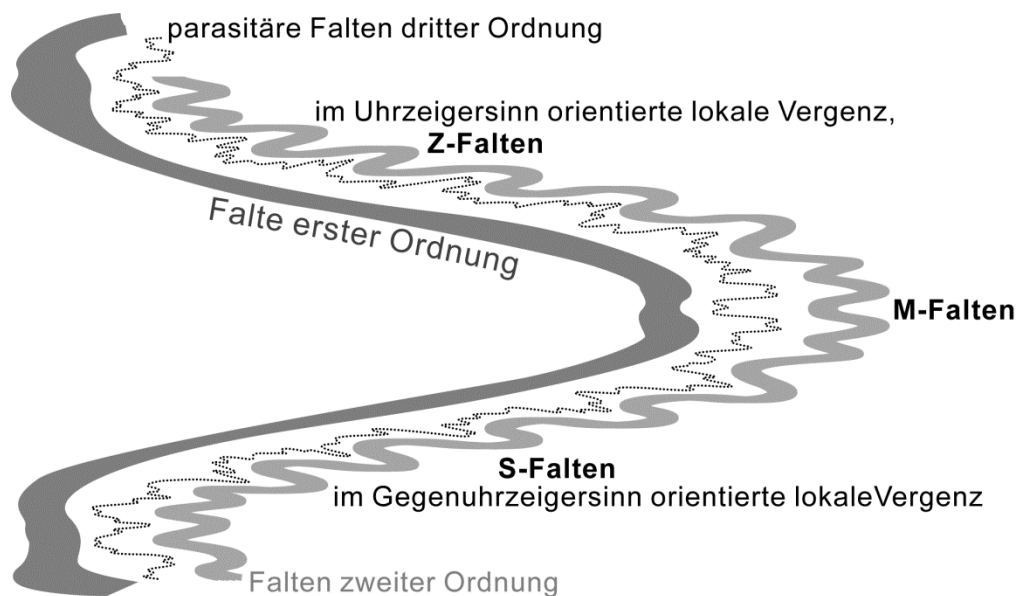
Mehrere liegende Falten können nebeneinander in einer "weichen" Schicht entstehen, die zwischen den angrenzenden kompetenten, praktisch unverfalteten Schichten abgeschert wird. Wenn solche schichtbegrenzte Faltenzüge eine systematische Vergenz aufweisen, kann aufgrund der Faltenasymmetrie ein relativer, lagenparalleler Schersinn zwischen den angrenzenden Gesteinsschichten bestimmt werden. In diesem Fall wird der Faltenzug auch als **Schleppfalten** (*drag folds*) bezeichnet. Man deutet damit an, dass die Scherkomponente des Geschwindigkeitsgradienten quer über den Gesteinsstapel die dazwischen liegende weiche Schicht verfaltete. Dabei entstehen typischerweise nicht-zylindrische, asymmetrische und disharmonische Falten (d.h. die weiche Schicht wird von den angrenzenden Schichten abgetrennt). Ebenso können sich **Schleppfalten** (*drag folds*) innerhalb einer Überschiebungszone entwickeln.

Gravitationskräfte, die auf plastisch verformbare Schichten wirken, können zur Bildung von **Faltenkaskaden** (*cascades of folds*) führen.

Parasitäralfalten

Im Scharnierbereich und in den Schenkeln einer grösseren Falte sind oft Falten kleinerer Wellenlänge und Amplitude entwickelt: Grössere und kleinere Falten sind zusammen **polyharmonische** Falten. Die kleinen Falten werden **Parasitäralfalten** (*parasitic folds*) in Bezug auf die grösseren Falten genannt. In einigen, meist älteren, deutschsprachigen Texten werden diese Falten auch als „**Spezialfalten**“ bezeichnet. Die grössten Falten werden als **Falten erster Ordnung** (*first-order folds*) bezeichnet, die zweitgrössten als **Falten zweiter Ordnung** (*second-order folds*), usw.

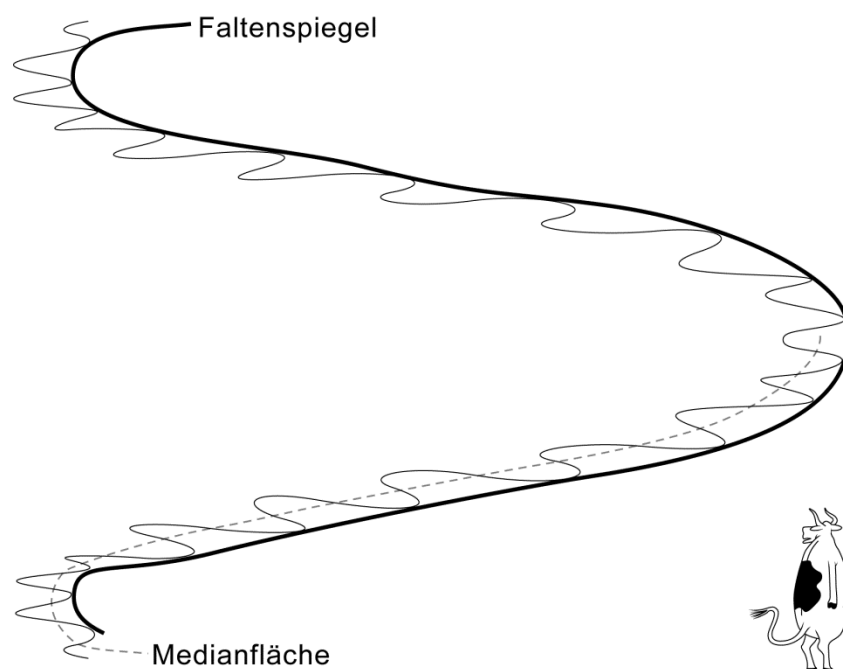
Die Achsen parasitärer Falten sind normalerweise nahezu parallel zur Achse der Hauptfalte, mit der sie assoziiert sind. Sie werden als kongruent bezeichnet. Im Kontrast dazu sind die parasitären Falten, deren Achsen bemerkenswert von den Eigenschaften der Achse der Hauptfalte abweichen, inkongruent.



Falten erster Ordnung können symmetrisch sein, während die kongruenten Falten zweiter Ordnung asymmetrisch sind. Die Richtung der Asymmetrie, bekannt als **lokale scheinbare Vergenz** (*local vergence*), zeigt konsequent in Richtung zu den Scharnieren der Antiformen grösserer Ordnung. Sie ändert sich bei Falten erster Ordnung systematisch von einer Seite der Achsenfläche zur anderen. Diese systematische Änderung ist so, dass (parallel zur axialen Richtung schauend), alle parasitäre Falten in einem Schenkel eine (scheinbare) so genannte **Vergenz im Uhrzeigersinn** haben. Diese werden auch als **Z-Falten** bezeichnet. Dagegen werden die Falten des anderen Schenkels welche eine scheinbare **Vergenz im Gegenuhrzeigersinn** aufweisen, dann als **S-Falten** bezeichnet. Symmetrische **M-Falten** treten meistens im Bereich der Scharnierzone auf. **W** kann für die Synformen, die den Antiformen entgegengesetzt sind, verwendet werden. Die Achsenebene der Falte erster Ordnung verbindet die M-Falten zweiter Ordnung und trennt Schenkel mit entweder S- oder Z- Falten. Im Gelände wird die lokale Vergenz oft benutzt, um Scharniere der nächst grösseren Faltenordnung aufzuspüren. Dies funktioniert aber nur, wenn beide Faltenordnungen zusammen entstanden sind. Beachten Sie, dass die Biegegleitung und/oder Biegescherung eine zusammenhängende Erklärung liefert warum sich Z- und S-Falten zweiter Ordnung auf den Schenkeln einer Falte erster Ordnung entwickeln. Die parasitären Falten würden beginnen sich als symmetrische Stauchungsfalten zu bilden, die zur Achse hin während des Biegungsfließens der inkompetenten Schichten geschert werden.

Faltenspiegel und Medianfläche

Die allgemeine Orientierung einer gefalteten Fläche, die durch einen Faltenzug beeinflusst wurde, wird durch den **Faltenspiegel** (*enveloping surface*) bestimmt. Dies ist eine gedachte Fläche, die tangential zu den Scharnieren der meisten oder aller Falten ist. Der Faltenspiegel definiert die Begrenzungen der Falten und verbindet die Geometrie von kleinen- mit grossräumigen Falten in Gebieten mit vielen kleinen Falten. Wo durch starke kleinmasstäbliche Verfaltung die generelle Orientierung der Schichtung unkenntlich ist, wird diese durch den Faltenspiegel erkennbar (z.B. in einem eng gefalteten Schenkel). Welche Falten vom Faltenspiegel berührt werden, hängt vom Massstab der Betrachtung ab.



Die Fläche, welche die Wendelinien einer einzelnen gefalteten Fläche verbindet, heisst **Medianfläche** (*median surface*). Diese Fläche trennt Antiformen und Synformen.

Die Medianfläche und der Faltenspiegel sind im Allgemeinen nahezu parallel und liefern folglich die gleichen Informationen. Die Achsenebenen von symmetrischen Falten sind senkrecht zum Faltenspiegel und zur Medianfläche.

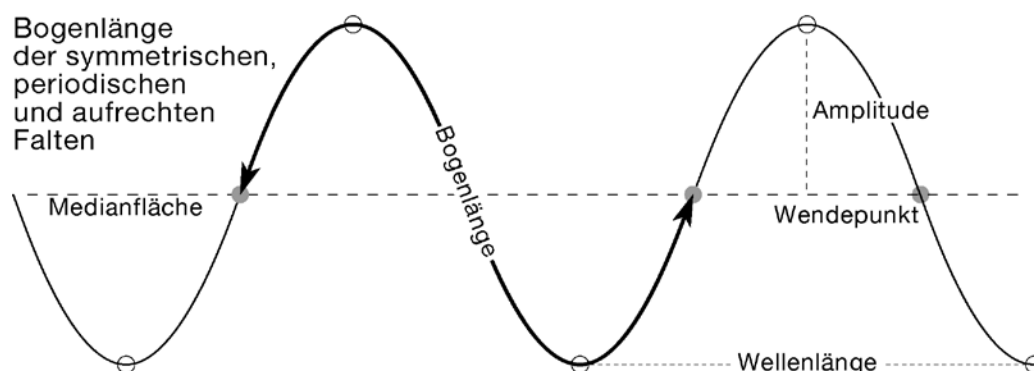
Wellenlänge, Bogenlänge, Amplitude und Formfaktor

Amplitude und Wellenlänge bestimmen die **Grösse** (*size*) einer einzelnen Falte. Sie beziehen sich auf die mathematische Terminologie, die benutzt wird um sinusförmige Kurven zu beschreiben.

Wellenlänge - Bogenlänge

Die Distanz im Profil zwischen zwei aufeinanderfolgenden Antiklinalen (oder Synklinalen) definiert die **Wellenlänge** (*wavelength*). Die Wellenlänge kann aber auch als Distanz zwischen dem einen und dem übernächsten Wendepunkt gemessen werden.

Die **Bogenlänge** (*arc length*) ist der entlang der gefalteten Fläche gemessene Abstand zwischen zwei Punkten, die durch eine Wellenlänge getrennt sind.



Amplitude

Die **Amplitude** (*amplitude*) wird gemessen, indem man entlang der Achsenebene die Hälfte der Distanz vom Scharnier der Antiklinalen zur Umhüllenden der zwei angrenzenden Synklinalenscharniere misst (oder umgekehrt). Mit anderen Worten, die Distanz entlang der Achsenebene von der Medianfläche zum Faltenscharnier.

Der Ausdruck **Periklinale** (*pericline*) wird gebraucht für grosse Antiformen oder Synformen, deren Amplitude in beiden Richtungen regelmässig auf null abfällt. Somit hat die Falte räumlich exakte Begrenzungen. Dome und Becken sind Periklinalstrukturen.

Formfaktor

Das Verhältnis der Amplitude zur halben Wellenlänge ist der **Formfaktor** (*aspect ratio*) einer Falte. Eine Fläche kann durch einen Faltenzug **periodisch** oder **nicht-periodisch** verfault sein. Bei disharmonischer Faltung variieren Wellenlänge und Amplitude der Falte von Schicht zu Schicht.

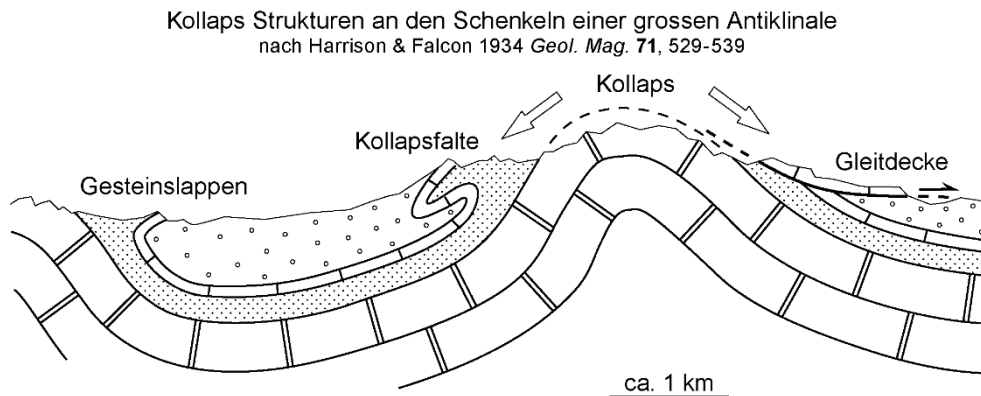
Konjugierte Falten

Der Ausdruck der **konjugierten Falten** (*conjugate folds*) wird verwendet, um ein Paar von identischen Falten zu beschreiben, deren Achsenflächen mit grossem Winkel zueinander im Profil oder auf einer Karte geneigt sind (dies bedingt entgegengesetzt gerichtete Vergenz). Solche Falten enden meistens in einer eckigen Falte (mit anderer Orientierung), dort wo die beiden Achsenflächen zusammentreffen oder sich schneiden. Dieser Punkt befindet sich meistens in einer inkompetenten Schicht.

Konjugierte Falten mit runden Scharnierzonen sind **Kofferfalten** (*box-folds*). **Konjugierte Knickfalten** (*conjugate kinks*) oder konjugierte Knickbänder (Falten mit eckigen Scharnierzonen) sind üblich.

Kollapsfalten

In Gebieten, die nahe der Erdoberfläche gefaltet wurden, gibt es Falten mit eher flachen Achsenebenen und einer lokalen Vergenz derjenigen von Parasitärfaleten entgegengesetzt. Diese entstanden aufgrund gravitationsgetriebenem **Kollaps** (*collapse*) von Lagen steilgestellt durch Faltung in Richtung der nächstgelegenen Synklinale. **Gesteinslappen** (*flaps*) sind überkippte Sequenzen, die aus der Biegung über rückwärtsgerichtete gravitative Instabilitäten entstehen, ohne dabei zu brechen.



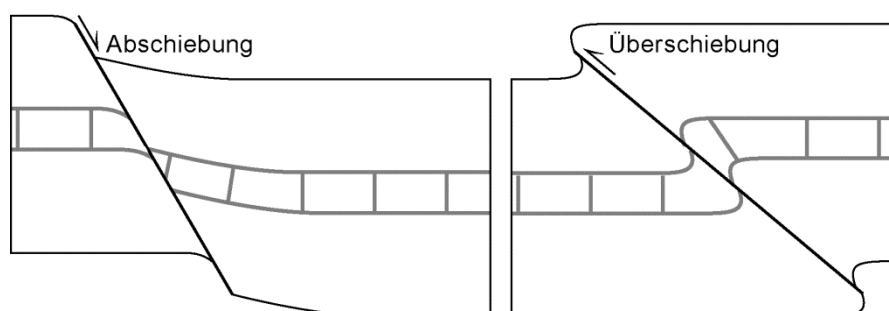
Störungsgebundene Falten

Es gibt allgemein Falten, die geometrisch mit Verwerfungen assoziiert sind. Sie sind im Allgemeinen durch die Verwerfungsgeometrie gesteuert.

Schleppfalten

Die Gesteinsschichten werden häufig in Störungszone verbogen. Diese lokalen Verbiegungen werden **Schleppfalten** (*drag folds*) genannt. Sie sind normalerweise in Richtung der Verwerfungsbewegung konvex und werden folglich der Reibung entlang einer Verwerfungsfläche zugeschrieben (normale Schleppung). Man nimmt dabei an, dass zuerst die Verwerfungsfläche angelegt wurde und erst später, mit der Relativbewegung der beiden Blöcke - die Gesteinsschichten verfaulteten wurden. Die Faltung kann aber auch älter als die Verwerfungsbildung sein. In diesem Fall stellen die Schleppfalten die Verbiegung des Gesteins dar, bevor es bricht.

Schleppfalten entlang Verwerfungsflächen

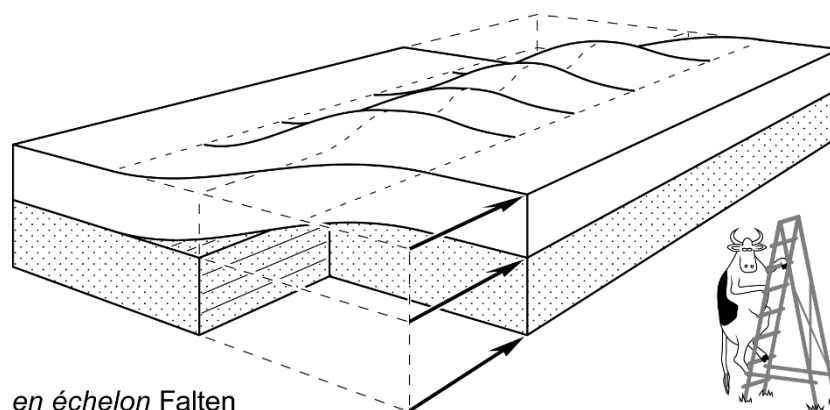


Durch die Betrachtung von Schleppfalten kann intuitiv darauf geschlossen werden, dass die Richtung der Falte in Richtung zur Verwerfungsbewegungsrichtung ist. Das kann zu falschen Resultaten führen, da sog. **inverse Schleppfalten** (*reverse drag fold*), die konvex in entgegengesetzter Richtung zum Bewegungssinn sind, ein häufiges Phänomen sind. Ein weiteres Beispiel sind **antithetische Flexuren** (*rollover anticline*): Falten, die konkav zur Gleitrichtung im Hangenden von listrischen Abschiebungen entstehen. Inverse Schleppfalten reflektieren heterogene Deformation nahe einer Störung, sind aber von normaler Schleppung schwierig zu unterscheiden, speziell dann, wenn sie getrennt vorkommen. Zusätzlich wird die Orientierung solcher Schleppfalten häufig nicht durch die Bewegungsrichtung kontrolliert, sondern vielmehr durch die Intersektion zwischen Schichtung und Bruchfläche. Die Schleppung kann von der Mitte bis zum Endpunkt der Verwerfungen von invers zu normal wechseln. Schleppfalten sollten deshalb mit grösster Vorsicht als Bewegungsindikatoren auf Verwerfungen benutzt werden.

Züge von Schleppfalten sind häufig in inkompetenten Schichten zwischen zwei kompetenten Schichten in der Umgebung von Überschiebungen.

En échelon Falten

In einigen nichtzylindrisch gefalteten Flächen sind doppelt eintauchende, fast aufrechte Falten mit ziemlich kurzen Achsen räumlich so angeordnet, dass aufeinanderfolgende Antiformen und Synformen entlang von einer Reihe liegen, die schräg zu den Achsenebenen ist. Man sagt, dass solche stufige und systematisch überlappende Falten *en échelon* angeordnet sind. Bitte beachten Sie, dass dieser Ausdruck die Geometrie der verfalteten Fläche beschreibt und unabhängig von der Beziehung der Struktur zur Horizontalen und Vertikalen ist.



en échelon Falten

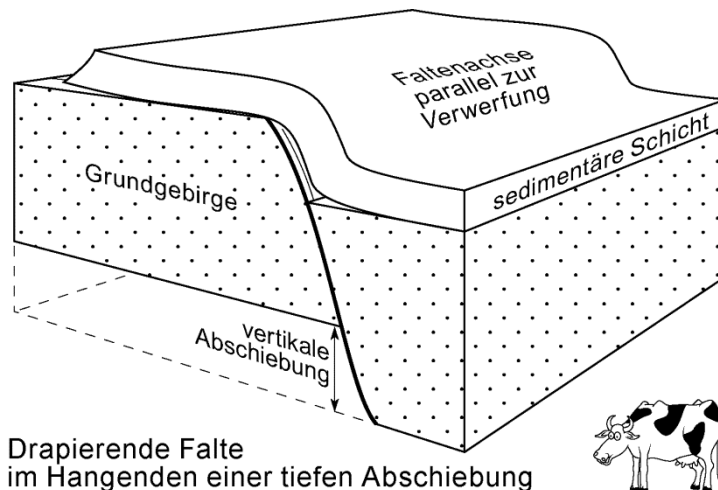
Falls angenommen wird, dass die steilen Achsenebenen senkrecht zur Verkürzungsrichtung liegen, so erlaubt die räumliche Anordnung der *en échelon* Falten, die mögliche Verwerfung zu der sie gehören, zu erraten. Solche *en échelon* Falten kommen häufig im Gestein über Horizontalverschiebungen des Grundgebirges vor, dort wo das Deckgebirge nicht zerbrochen wurde.

Eine *en échelon* Faltenanordnung weist auf den relativen Schersinn entlang der Verwerfung des Grundgebirges hin.

Drape folds, forced folds

Sedimentäre Abfolgen können mehr oder weniger passiv auf der Topographie der begraben/verdeckten Grenzfläche Grundgebirge-Sediment gebogen werden. Ein wichtiger Formsteuernder Faktor ist, ob die sedimentäre Decke mit dem Grundgebirge fest verbunden ist oder davon abgetrennt wurde.

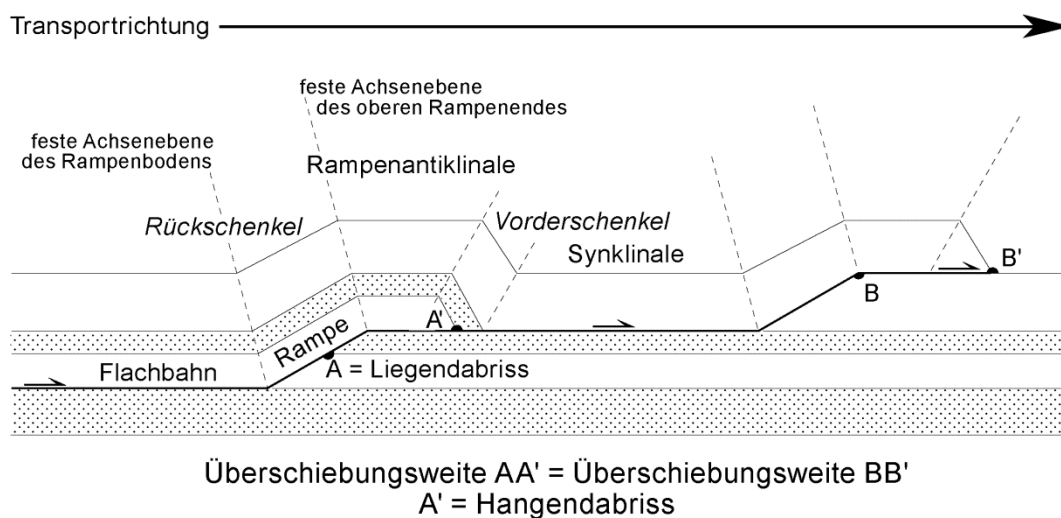
Drapierende Falten (*drape folds*) sind oft Umbiegungen in sedimentären Schichten, die sich damit passiv einer tiefer liegenden Struktur oder einem geologischen Körper anpassen. Eine Falte, welche durch differentielle Kompaktion entstanden ist, ist ein Beispiel dafür.



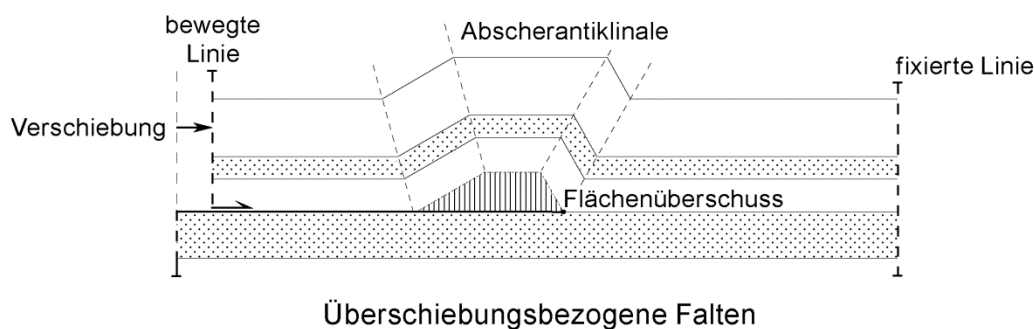
Erzwungene Falten (*forced folds*) sind im Allgemeinen mit Verwerfungen verbunden (*fault related*). Sie sind lange und lineare Biegungen, die in den Abdeckungsgesteinen durch relative Bewegungen von Grundgebirgsblöcken entlang von steilen Verwerfungen erzeugt werden. Ihre gesamte Form und Orientierung wird durch die Form und Orientierung der tiefer liegenden, beeinflussenden Verwerfungsblöcke beherrscht. Erzwungene Falten sind gewöhnlich Monoklinen mit langen und leicht fallenden Rückschenkeln und kurzen, steilen Vorschenkeln. Die Vorschenkel liegen über den Verwerfungsflächen. Die erzwungenen Falten treten sowohl in Kompressions- als auch in Extensionsregimen auf. Die Art und die Größe der Verwerfungsbewegung steuern die Faltenprofilgeometrie.

Überschiebungsbezogene Falten

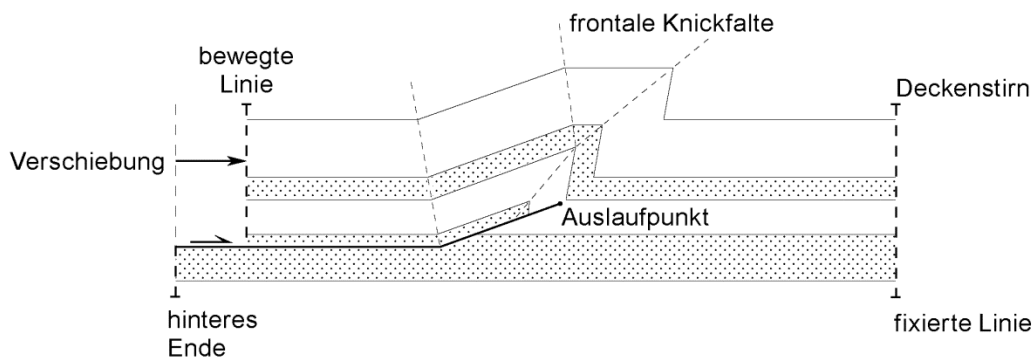
Überschiebungsbewegung in der Tiefe erzeugt geometrisch notwendige Falten im allochthonen Hangenden im Zuge der Bewegung über die topographischen Unebenheiten der Überschiebungsbahn. Dabei entstehen Knickfalten-ähnliche Kofferfalten. Zwei Arten von rampenbezogenen Falten sind in Überschiebungsgürteln häufig.



- **Rampenfalten** (*fault bend folds*) entstehen und wachsen dort, wo Überschiebungen von tieferen auf höhere Abscherhorizonte springen und Schichten des Hangenden oberhalb der Verwerfung verbiegen. Wenn Gleitung erfolgt, wird der Hangendblock gefaltet um die Form der Liegendrampe aufzunehmen. Dadurch entsteht ein passives Syklinal-Antiklinal Paar an der Basis und der Oberseite der Rampe. Typische Geometrien werden während der Entwicklung der Antiform beibehalten. (i) Die Rampenantiklinale endet in der oberen Flachbahn. (ii) Der Rückschenkel ist zur Liegendrampe parallel. (iii) Der Vorschlenkel ist kürzer und steiler als der Rückschenkel. (iv) Das Antiklinal-Synklinal Paar reflektiert direkt die Geometrie der Biegung der Verwerfung.



- Bei einer **frontalen Knickfalte** (*fault propagation fold*) geht die Rampe nicht in eine obere Flachbahn über. Schichten werden an der Basis der Rampe durchbrochen und durch Überschiebung verkürzt. Der Verwerfungsversatz verringert sich auf null in Aufstiegsrichtung und die Überschiebung läuft in die Achsenebene einer Synklinale aus. Schichten über und vor der vorderen Linie der voranschreitenden Überschiebung werden völlig verfaltet. Typischerweise sind solche Falten (i) asymmetrisch in Bewegungsrichtung entlang der Verwerfung, (ii) sie werden enger mit zunehmendem Versatz, (iii) beide Schenkel werden verlängert, während sich das Verwerfungsende aufwärts fortpflanzt.

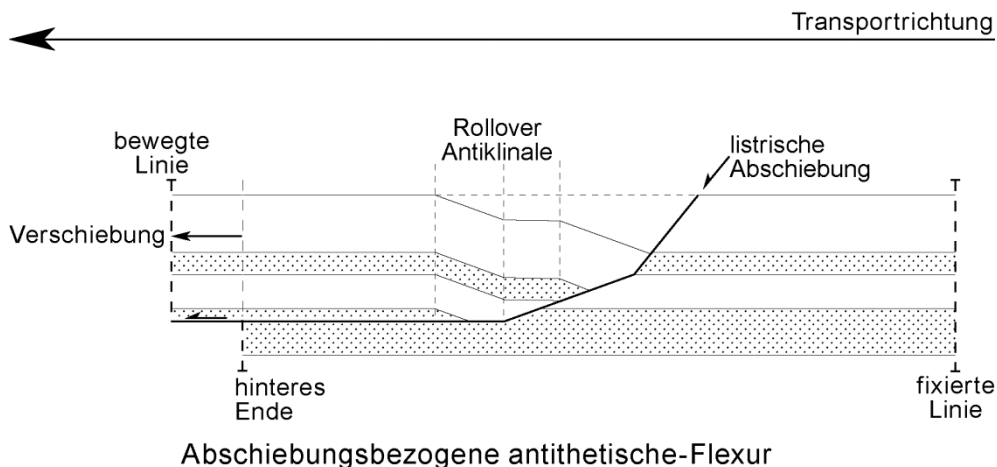


Wachstumsfalten (*growth folds*) entstehen in sedimentären Schichten gleichzeitig mit ihrer Ablagerung. Antiformstrukturen wachsen gewöhnlich über Rampen oder Duplexzonen; dies führt zu **antiformalen Stapeln** (*antiformal stacks*).

In einem grösseren, regionalen Massstab spricht man bei solchen Falten und Überschiebungen von einem **Falten- und Überschiebungsgürtel** (*fold and thrust belt*). Die Faltenform ist gegeben durch die Form der vorrückenden Rampe, welche nicht in eine obere flache Scherzone (flat) mündet. Die Rampe wird nach oben durch eine asymmetrische Falte ersetzt. Diese ist in die Richtung des Transports überkippt. Es gibt eine systematische und vorhersagbare geometrische Beziehung zwischen einer Falte und der sie verursachenden Verwerfung. Deshalb können wir Faltengeometrien benutzen, um die Lage der Verwerfung und ihre Geometrie in der Tiefe zu bestimmen.

Abschiebungsbezogene Faltenstrukturen

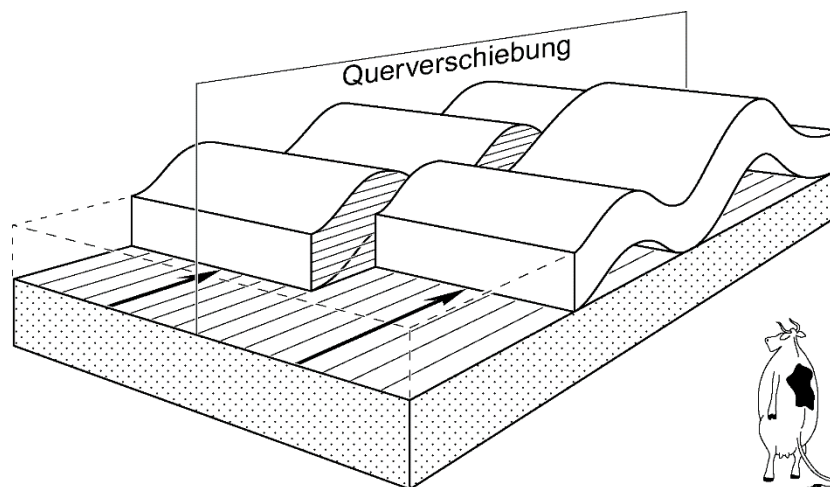
Wie in Überschiebungssystemen, werden geometrisch notwendige Falten über topographischen Unregelmässigkeiten der Abschiebungsflächen gebildet. Bei listrischen Abschiebungen produziert die Kippung des Hangenden zum Hauptbruch hin eine halbe Antiform, die sogenannte **antithetische Flexur** (*rollover anticline*). Die antithetische Flexur ist eine schwache konvexe Biegung der Schichten im Hangenden, die die notwendige Verformung aufnehmen, um das Hangende der konkaven Verwerfungsfläche anzupassen.



Während das Hangende entlang des tieferen, flach einfallenden Teils der Verwerfung gleitet, entsteht freier Raum zwischen dem Liegenden und dem Hangenden entlang den oberflächennäheren, steileren Teilen der Verwerfung. Die Schichtungen, die zuerst im Hangenden horizontal waren, müssen nach oben konvex gefaltet werden, um diesen zusätzlichen Raum zu füllen.

Querverschiebungen

In Gegenden wie dem Jura, scheinen Blattverschiebungen die Falten auseinander zu reißen. Sie entstehen durch unterschiedliches Propagieren aneinander grenzender Segmente von Falten, wobei in einem Block die Falten enger sind als im angrenzenden Block. **Querverschiebungen** (*tear faults*) sind Transferverwerfungen die während der Faltung entstehen.



Bruchmuster in Falten

Die Geometrie und Dichte von Brüchen passt sich der Verformung, die in den Schichten während der Faltung verursacht wird an. Von Bruchscharen wird allgemein berichtet, dass sie sich vom Scharnier zum Schenkel ändern.

- In der Scharnierregion sind die Brüche meist parallel zur Faltenachse und orthogonal zur Schichtung. Klüfte und Abschiebungen entstehen durch Biegung, infolge von Dehnungsspannungen im äusseren Bogen der Falte. Stylolitische Klüfte und Aufschiebungen werden durch Kompressionsspannungen innerhalb des inneren Bogens der Falte gebildet.
- In den Schenkeln sind die Brüche meist parallel zur Faltenachse aber schief zur Schichtung. Sie hängen mit schichtparalleler Scherung zusammen.

Primäre Falten

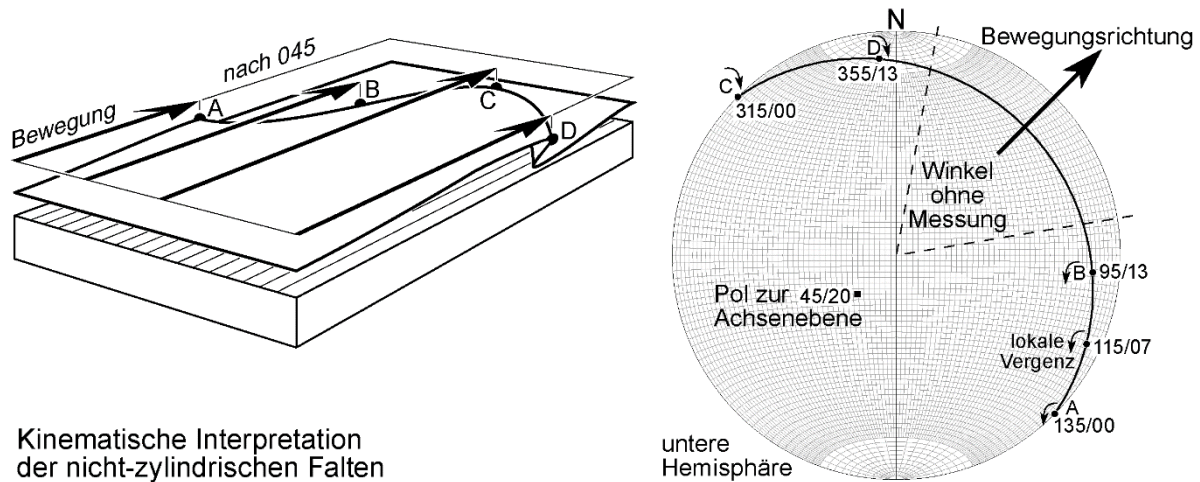
Laven entwickeln gewöhnlich während des Fließens Oberflächenfalten. Diese Falten entstehen durch die unterschiedlichen Eigenschaften der gekühlten äusseren Kruste im Verhältnis zu dem heissen, schneller fließenden inneren Teil der Lava.

In magmatischen Gesteinen verformen Falten häufig die Primärbänderungen während der Spätphase des Magmaflusses.

Nicht versteinerte Sedimente gelten als Suspensionen, die sich in gewissem Sinne duktil verformen können. **Gleitfalten** (*slumps*) entwickeln sich in leicht geneigten Sedimentlagen durch gravitative Kriechbewegungen. Abrutschende Schichten liegen in der Regel zwischen unverformten Schichten.

Bestimmung der Scherrichtung mittels Faltenorientierungen

Schichten in gescherten Gesteinen bilden normalerweise nicht-zylindrische Schleppfalten aus, deren Achsenebene nahe der Scherebene ist. Zungenfalten sind ein Endglied dieser Geometrien. Die Scharniere sind gebogen, weil ihre Orientierung abhängig ist von einigen Parametern wie der ursprünglichen Orientierung der Schicht relativ zur Scherebene und lokalen Heterogenitäten der Fließbewegung. Darüber hinaus können sich Faltscharniere parallel zur Scherrichtung bilden oder sie können sich während progressiver Verformung in Scherrichtung einrotieren. Folglich sind Faltscharniere selten orthogonal zur Scherrichtung. Infolge solcher wichtiger lokaler Änderungen geben lokalisierte Kleinfalten alleine häufig irreführende Transportrichtungen.



Kinematische Interpretation
der nicht-zylindrischen Falten

untere
Hemisphäre

Eine sichere Annahme ist, dass die Asymmetrie jeder möglichen Falte, die der gleichen Gruppe angehört, mit der Richtung der Scherung, die sie produzierte, konsistent ist. Diese Übereinstimmung ist die Grundlage der geometrischen Methode, die zur Bestimmung der Scherrichtung dient. Die (Hansen) Methode betrachtet eine Gruppe kleiner Falten und geht, wie folgt vor:

- Alle Scharnierorientierungen werden im Stereonetz mit ihrer individuellen Richtung der Asymmetrie geplottet
- Alle Scharniere sollten ungefähr entlang derselben Achsenebene (z.B. ein Grosskreis), in der Nähe der Scherebene, liegen.
- Der Ausschnitt des Grosskreises, über dem die Richtung der Asymmetrie gegenläufig wird, enthält die Gleitrichtung, ungefähr entlang der Halbierenden dieses Winkels, der den Bogen begrenzt.
- Die Asymmetrie der Falten definiert die Richtung der Scherung.

Zusammenfassung

Eine Falte ist eine Biegung in einem geschichteten Gestein, die durch Kompressionsspannung (Stauchung) oder durch passives Drapieren von Schichten über einer unteren Struktur oder um ein resistenteres Objekt herum verursacht wird. Falten repräsentieren grossräumiges Fließen von Material.

Falten zeigen einen grossen Bereich von Formen und resultieren aus einer grossen Zahl von Prozessen, beide reflektieren im Wesentlichen das Gesteinsverhalten. Es ist folglich üblich zu beobachten, dass sich geometrische Eigenschaften sich innerhalb der gleichen Falte von Schicht zu Schicht ändern.

Antiformen sind Reservoirs für Kohlenwasserstoffe. Falten beinhalten Erzablagerungen in den Scharnierbereichen infolge des Materialflusses zu jenen Stellen. Falten bilden sich in Verbindung mit Verwerfungen und können folglich Erdbebengefahren signalisieren. Falten dokumentieren die Zeiträume der geologischen Deformation, folglich müssen Generationen unterschieden und datiert werden. Aus diesen Gründen müssen Strukturgeologen die Faltengeometrie für die ökonomischen und geologischen Gefahrenwendungen, die Schichtkonfiguration als Anhaltspunkte für die Zustände der Deformation und die Definition der Falten Generationen für die geologische Geschichte dokumentieren.

Empfohlene Literatur

- Hansen, E. 1971. *Strain facies*. Springer-Verlag, Berlin.
- Ramsay, J. G. 1989. Fold and fault geometry in the Western Helvetic nappes of Switzerland and France and its implication for the evolution of the arc of the Western Alps. In: *Alpine Tectonics* (edited by Coward, M. P., Dietrich, D. & Park, R. G.) **45**, 33-45.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I. 1987. *The techniques of modern structural geology - Volume 2 : Folds and fractures*. Academic Press, London.
- Reches, Z. & Eidelman, A. 1995. Drag along faults. *Tectonophysics* **247**(1-4), 145-156.
- Treagus, J. E. & Treagus, S. H. 1981. Folds and the strain ellipsoid: a general model. *Journal of Structural Geology* **3**(1), 1-17.