

FALTEN

Das Wort **Falte** (*fold*) wird benutzt, wenn eine einzelne oder ein ganzer Stapel von ursprünglich flachen und ebenen Flächen, wie zum Beispiel Sedimentschichten, durch duktile (d.h. permanente) Verformung gebogen oder gekrümmt wird. Die Verbiegung erfolgt durch Verkürzung parallel zu den Gesteinsschichten. Falten in Gesteinen variieren von mikroskopischen Runzeln bis zu Falten von Gebirgsgrösse. Die Verbiegungen kommen in verschiedenen Massstäben vor, einzeln als isolierte Falten oder als ausgedehnte **Faltenzüge** (*fold train*) unterschiedlicher Grösse. Lang gezogene Faltensysteme, die sich in regionalem Massstab verfolgen lassen, werden als **Faltengürtel** bezeichnet.

Falten entstehen in verschiedensten Spannungsregimen, unter verschiedenen hydrostatischen Drücken, Porendrücken und bei unterschiedlichen Temperaturen. Dies wird bezeugt durch synsedimentäre Gefüge (z.B. oberflächennahe Falten, die verbunden sind mit Rutschungen von wassergesättigten, nicht-zementierten Sedimenten an Kontinentalthängen) oder später entstandene Falten in Sedimenten, im ganzen Spektrum von metamorphen Gesteinen, in Mantelgesteinen oder als primäre Fliegsstrukturen in einigen magmatischen Gesteinen. Die Aufsehen erregende Gegenwart von Falten zeigt an, dass duktile Verformung eine allmähliche kontinuierliche Veränderung der Schichtung im Gestein herbeiführte, sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch. Das Nichtvorhandensein von Falten deutet allerdings nicht unbedingt auf das Fehlen einer Verformung hin.

In dieser Vorlesung befassen wir uns zuerst mit der Beschreibung und Klassifizierung von Falten, dann mit einigen Ideen betreffend die Entwicklung von Falten.



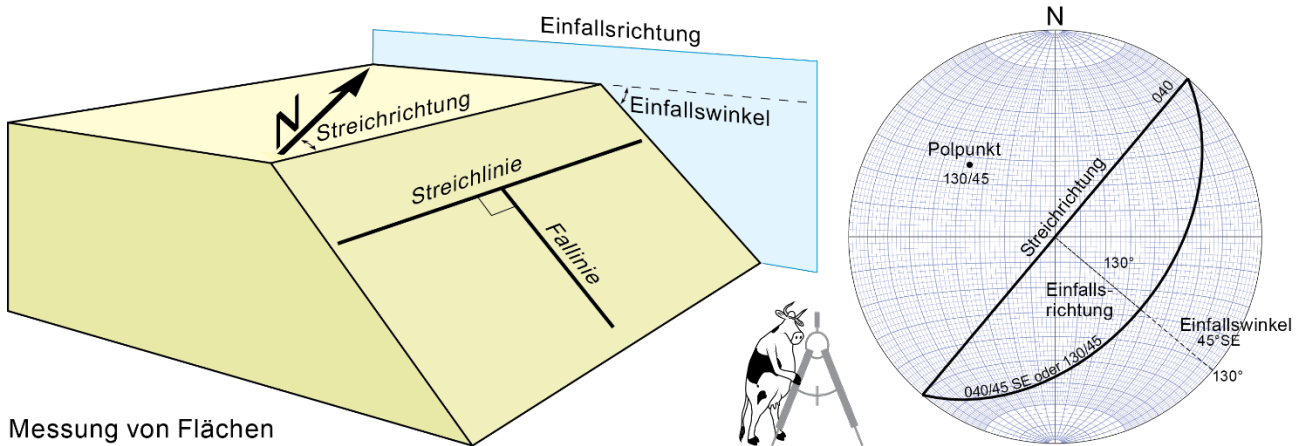
Antiklinale natürliche Falte (Zagros Gebirge, SW Iran)

Einfache Falten – zwei-dimensionale Terminologie

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 Beschreibung dieser Strukturen entstanden. Einfachheitshalber wird eine Falte erst nur durch eine einzelne verbogene Fläche definiert.

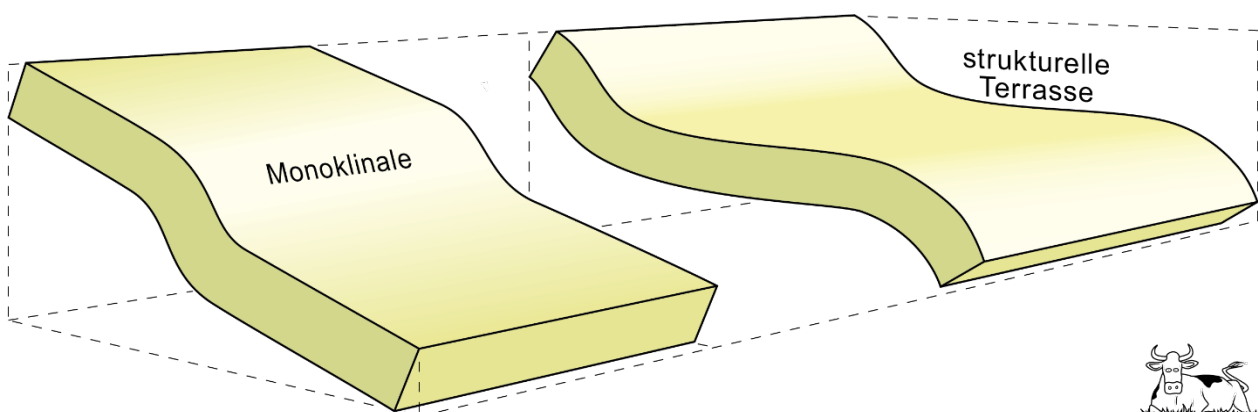
Orientierung einer Ebene

Definitionsgemäss braucht es zur Faltung die Rotation einer Schicht. Diese Rotation kann schlussendlich grosse Werte erreichen (90° oder mehr). Dementsprechend sind verfaltete Gebiete dadurch charakterisiert, dass die Schichten nicht mehr oder selten horizontal liegen, sondern geneigt sind. Zuerst müssen wir wissen, wie man die Neigung und Richtung einer Schicht misst und dokumentiert. Geneigte Schichten schneiden die Horizontalebene in einer Richtung des Kompasses, diese wird das **Streichen** (*strike*) genannt. Die **Fallrichtung/Fallazimut** (*direction of dip*), die Linie mit der grössten Neigung auf der Schicht, ist senkrecht zum Streichen. Das **Fallen** (*dip*) bezeichnet den Winkel zwischen der Schicht und der Horizontalebene.



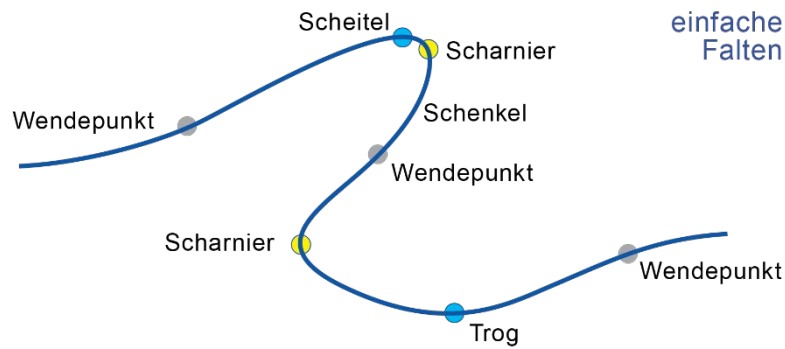
Monoklinale – Homoklinale

Im regionalen Massstab bildet eine doppelte Biegung oder Flexur eine steil einfallende, stufenartige Zone in sonst flachen und regelmässigen Abfolgen eine **Monoklinale** (*monocline*). Umgekehrt bildet eine lokale Abflachung des Einfallens eine **strukturelle Terrasse** (*structural terrace*). Eine Abfolge von Schichten mit gleich bleibendem parallelem Verhalten über ein weites Gebiet bildet eine **Homoklinale** (*homocline*).

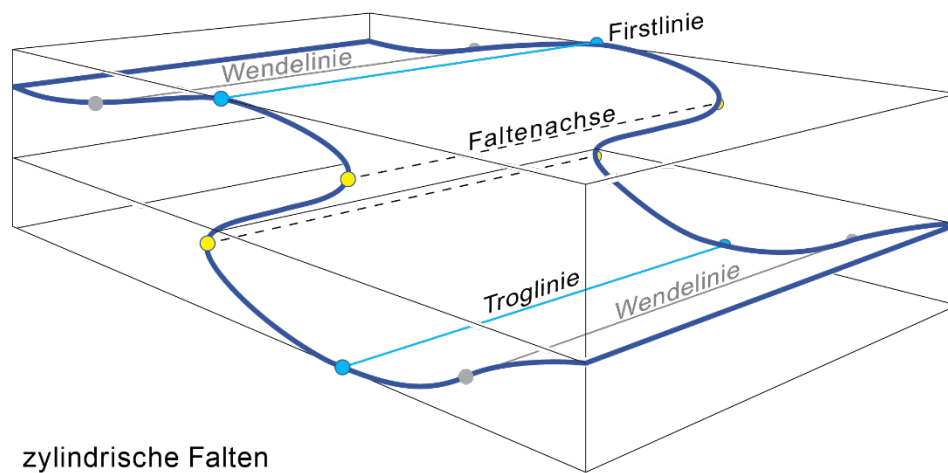


Scheitel, Kulmination und Trog

Der höchste Punkt einer gefalteten Schicht bezüglich einer horizontalen Referenzlinie wird **Kamm** oder **Scheitel** (*crest*) genannt und der niedrigste Punkt **Trog** (*trough*).

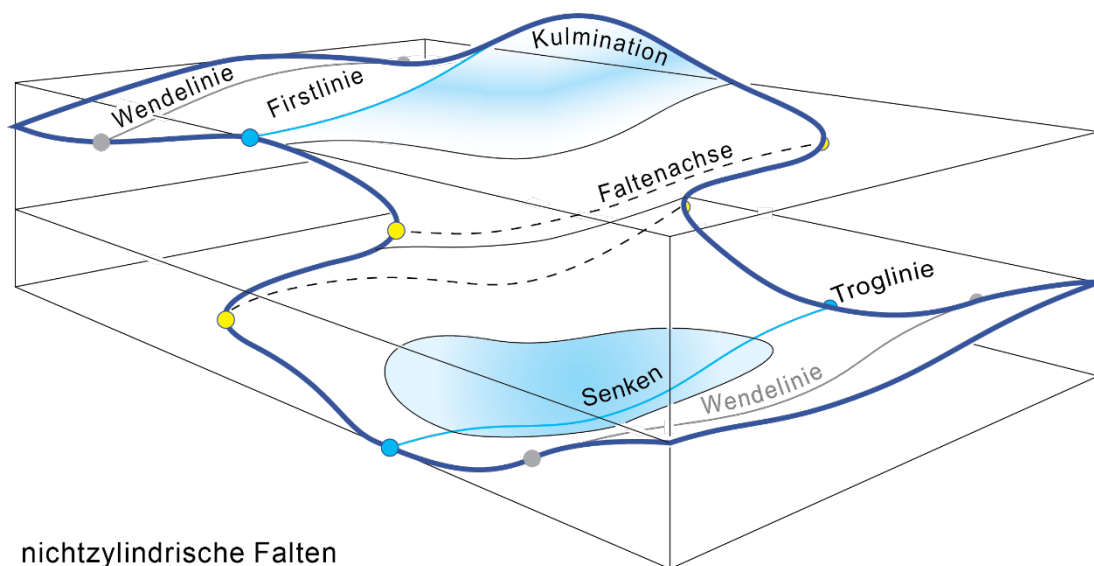


Imaginäre Linien, die First- oder Trog-Punkte einer bestimmten Schichtfläche miteinander verbinden, werden als **Scheitellinien** (*crest lines*) oder **Troglinien** (*trough lines*) bezeichnet.



zylindrische Falten

Scheitel- und Troglinien sind zumeist weder horizontal noch geradlinig, sondern sie verändern die Höhe entlang ihres Verlaufs. Höhepunkte der Scheitel- oder Troglinie werden **Kulminationen** (*culminations*) genannt; die Tiefpunkte sind **Depressionen** (*depressions*).

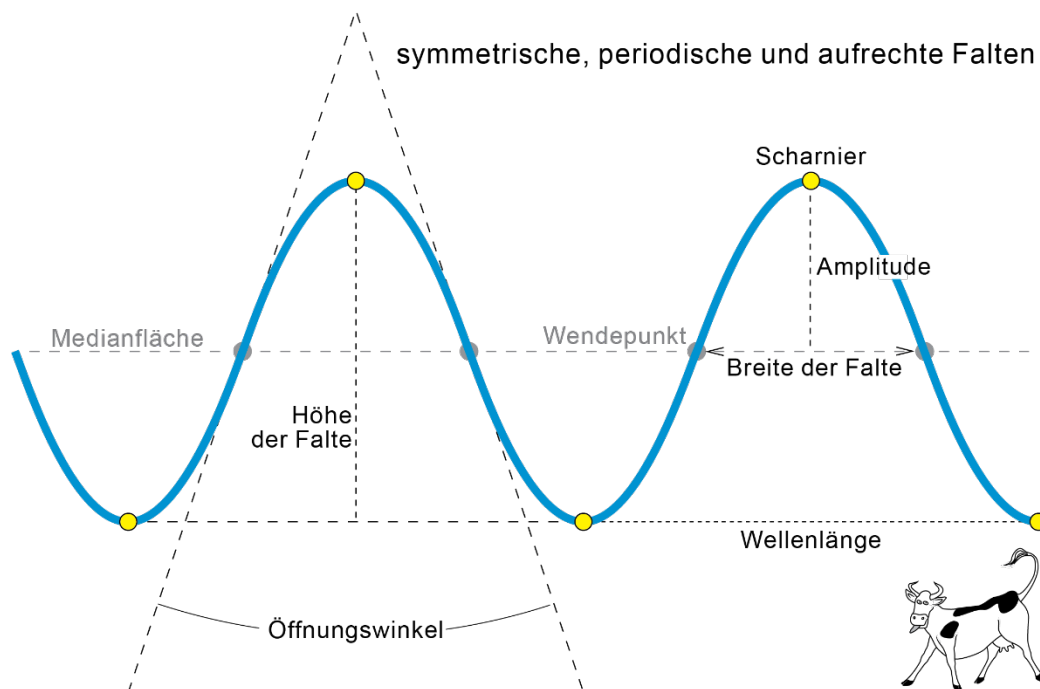


nichtzylindrische Falten

Scharnier, Schenkel und Wendepunkte

Der Krümmungsradius einer typisch verfalteten Fläche verändert sich schrittweise von Punkt zu Punkt. Das Stück mit dem kleinsten Krümmungsradius wird **Scharnier** (*hinge*) genannt. Es ist von zwei Gebieten mit grösserem Krümmungsradius umgeben, den **Schenkeln** (*limb*). Die Verbindung von Punkten mit minimalem Krümmungsradius entlang des Scharniers der Falte nennt man **Scharnierlinie** (*hinge line*) oder **Faltenachse** (*fold axis*). Entlang dieser Linie verändert die Schichtung gewöhnlich auch ihre Orientierung, indem das Fallen von der einen Seite auf die entgegengesetzte Seite wechselt. In drei Dimensionen wird die nach unten gerichtete Neigung der Scharnierlinie **Tauchen** (*plunge*) genannt.

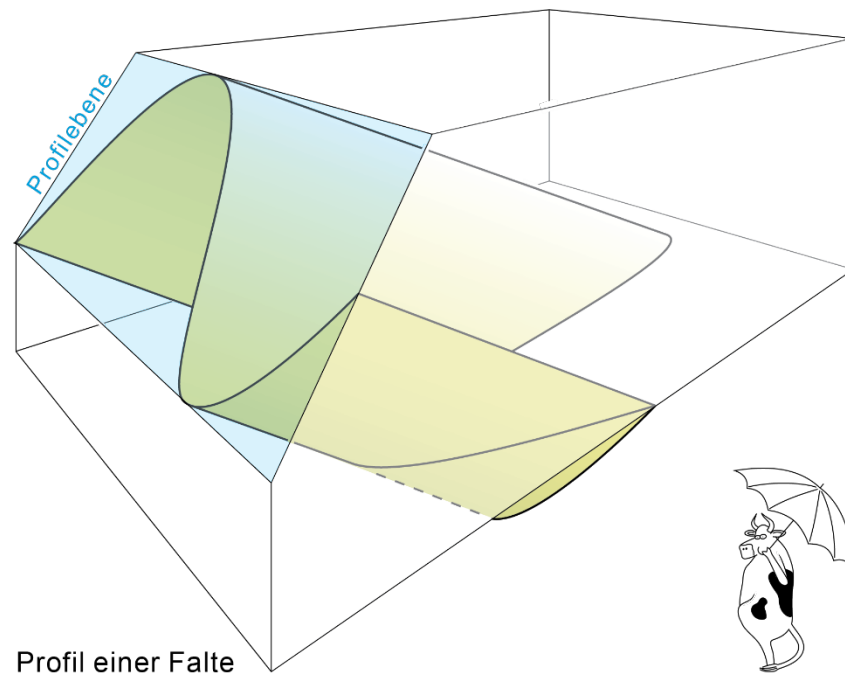
Die **Wendepunkte** (*inflexion points*) sind Punkte, in denen sich der Krümmungssinn von einer konvexen zu einer konkaven Kurve ändert. Auf beiden Faltenschenkeln liegt je eine **Inflexionslinie**, welche die Wendepunkte verbindet. Damit kann der Faltenschenkel neu definiert werden als der Abschnitt zwischen der Scharnierlinie und der nächsten Inflexionslinie.



In symmetrischen Falten mit vertikaler Achsenebene verläuft die Scharnierlinie durch den Scheitel (höchster Punkt) oder Trog (tiefster Punkt) jeder Falte.

Profil

Eine gefaltete Fläche zeigt ihre maximale Krümmung in einer Ebene senkrecht zur Faltenachse. Das **Profil** einer Falte ist der Schnitt, der senkrecht zur Faltenachse verläuft. Das unterscheidet es von einem geologischen Profil, das gewöhnlich in einer vertikalen Ebene gezeichnet wird.



Profil einer Falte

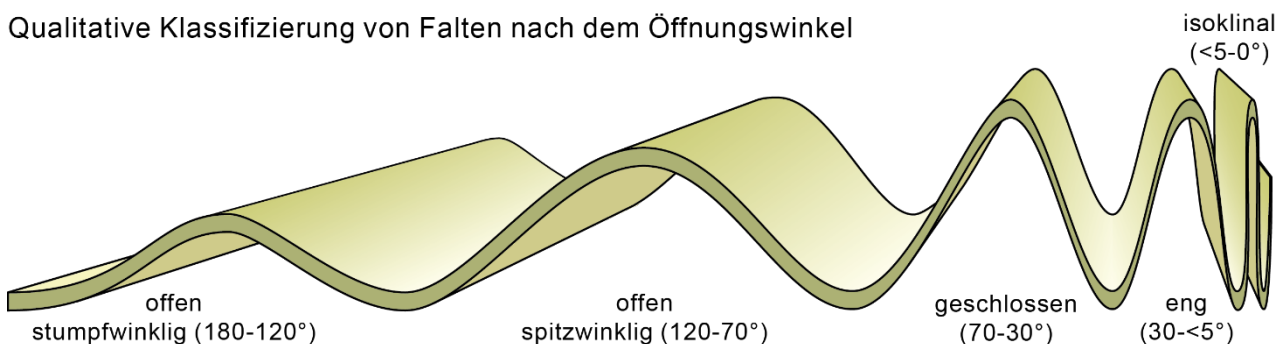
Öffnungswinkel

In der Profilansicht wird der kleinere Winkel zwischen den Schenkeln einer Falte als **Öffnungswinkel** (*inter-limb angle*) bezeichnet. Er ist definiert als der Winkel zwischen den Tangenten an zwei benachbarten Wendepunkten.

Dieser Winkel kann die Intensität der Verkürzung widerspiegeln. Eine qualitative Klassifizierung von Falten beruht auf dem minimalen Winkel, der durch die beiden Schenkel gebildet wird. Man unterscheidet fünf Klassen: **offene stumpfwinklige** Falten (180° bis ca. 120°), **offene spitzwinklige** Falten (120° bis 70°), **geschlossene** Falten (70° bis 30°), **enge** Falten (weniger als 30°) und **isoklinale** Falten (0° , d.h. parallele Schenkel). **Fächerfalten** haben negative Öffnungswinkel.

Das Faltenprofil und die Orientierung der Faltenachse zusammen bestimmen den **Stil** einer Falte.

Qualitative Klassifizierung von Falten nach dem Öffnungswinkel



Faltenscharnier

Die Form der Falte hängt davon ab, wie die gefaltete Fläche die Krümmung ändert; das Scharnier kann ganz scharf umrissen sein, mit langen, geraden Schenkeln, oder um die ganze Falte geht eine regelmässige Krümmung. **Faltenscharniere** können also **gerundet** (*rounded*) oder **eckig** (*angular*) sein. **Pfeilspitz-** (*arrowhead*) oder **Flammenfalten** (*flame folds*) haben scharfe Scharniere mit unterschiedlichen, oft sigmoidal gekrümmten Schenkeln. Falten mit geraden, flachen Schenkeln und sehr eckigen Scharnieren nennen wir **Knickfalten** (*kinks*). Wenn solche Knickfalten stark asymmetrisch sind, kann die schmale, lange Zone, die vom kurzen Schenkel gebildet wird, als **Knickband** (*kink band*) bezeichnet werden. Die seitliche Begrenzung eines Knickbands durch die Achsenebenenspur wird auch **Knickbandgrenze** (*kink band boundary*) genannt.

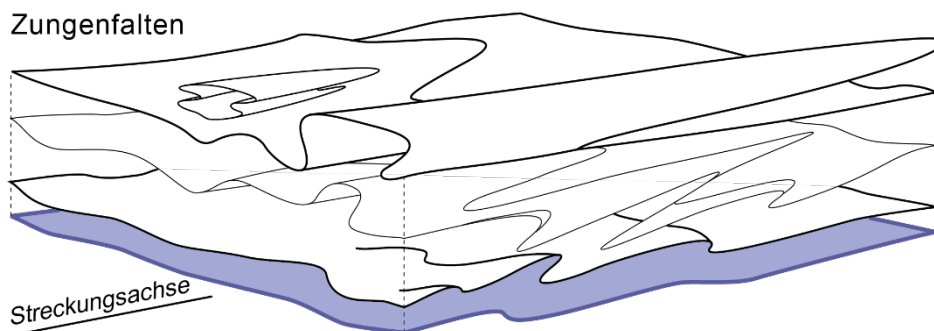
Spezielle Falten, deren verfaltete Schichtflächen durch drei Seiten, analog zu drei Seiten eines Rechtecks, aufgebaut werden, heissen **Kofferfalten** (*box-fold*).

In Gebieten mit intensiver Faltung trifft man häufig isolierte, enge Faltenscharniere an, die zwischen scheinbar kaum gefalteten Schieferungsflächen liegen. Solche Strukturen heissen **Intrafolialfalten** oder können als **wurzellose Intrafolialfalten** bezeichnet werden, wenn ihre Schenkel nicht zusammenhängen.

Zylindrizität

Falten werden oft als ebene, **zylindrische** (*cylindrical*) Strukturen gezeichnet. Dies bedeutet, dass die Faltenachsen aneinander gereihter Falten derselben Generation immer gerade und parallel sind. Die Zylinderachse liegt parallel zur Faltenachse. Mit anderen Worten 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. Falten weichen häufig von der idealen zylindrischen Querschnittsgeometrie ab und sind **nicht zylindrisch** (*non-cylindrical*). Scharniere von nicht zylindrischen Falten verändern ihren Azimut und ihr Tauchen. Wenn in einem solchen Fall der Azimut des Scharniers wechselt, entsteht eine **zweiseitig abtauchende Falte** (*doubly plunging fold*). Eine **konische Falte** (*conical fold*) beschreibt eine nicht zylindrisch gefaltete Fläche, die in etwa der Geometrie eines Kegels entspricht.

Falten mit ausgeprägten Krümmungen ihrer Faltenachsen, sodass diese um mehr als 90° bis zu Haarnadelkurven abdrehen, werden als **Zungenfalten** (*sheath folds*) bezeichnet.

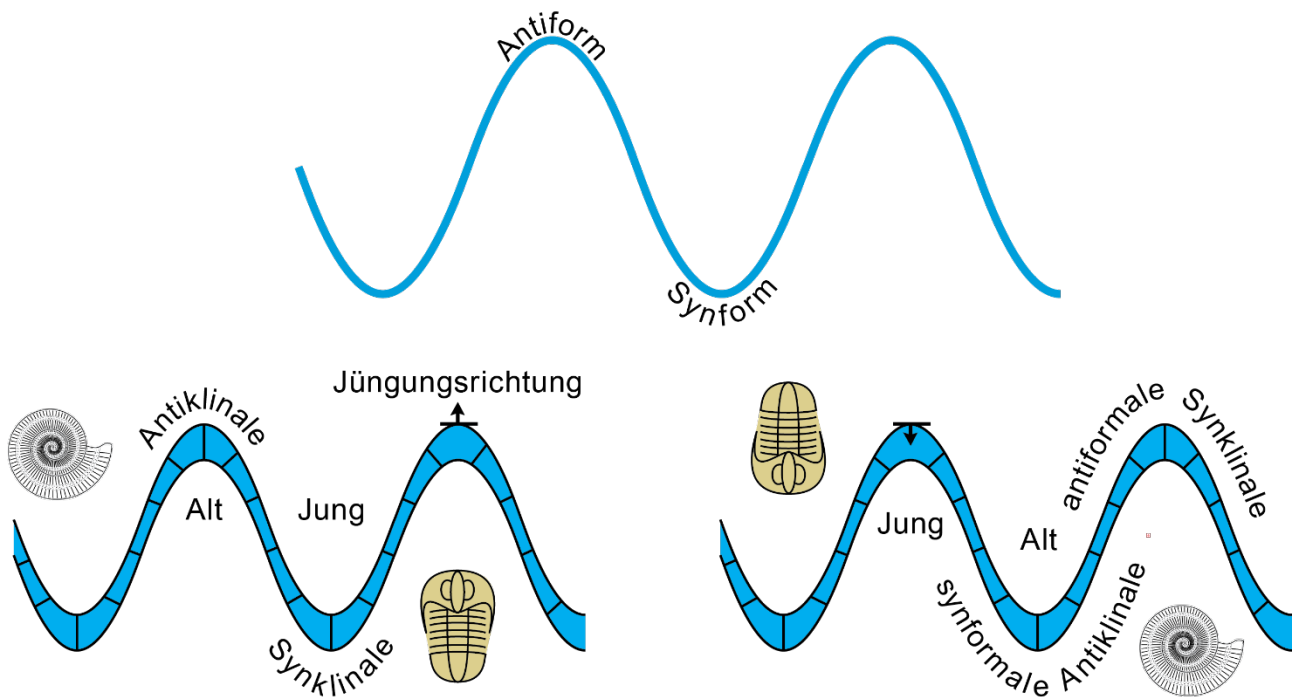


Antiform und Synform

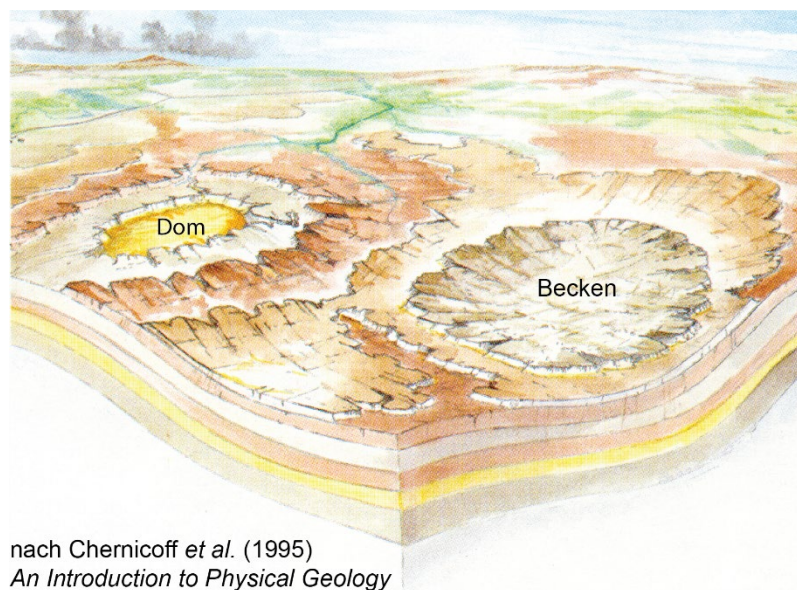
Eine Falte, die nach oben konvex ist, bildet eine **Antiform**, eine, die nach unten konvex ist, eine **Synform**. Gebiete im Innern oder auf der konkaven Seite einer verfalteten Schicht werden als **Kern** einer Falte bezeichnet. In gewissen Fällen ist es nützlich, die konvexe und konkave Grenzfläche einer verfalteten Schicht mit **Aussenseite** respektive **Innenseite** zu bezeichnen.

Antiklinale und **Synklinale** sind Bezeichnungen mit stratigrafischer 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 Gebieten mit komplexer polyphaser Deformation sind **antiformale Synklinale** (Antiform mit dem jüngsten Gestein im Kern) und **synformale Antiklinale** (Synform mit dem ältesten Gestein im Kern) häufig. In solchen Gebieten spricht man gerne von einem **Facing**. Das Facing ist entlang der Achsenfläche die Richtung, in welcher sich die Schichten verjüngen. Synklinale Antiformen und antiklinale Synformen können als **downward facing folds** bezeichnet werden, weil die Stratigrafie 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 stratigrafisch verkehrt liegenden Schenkeln überkippter Falten vor.

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



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



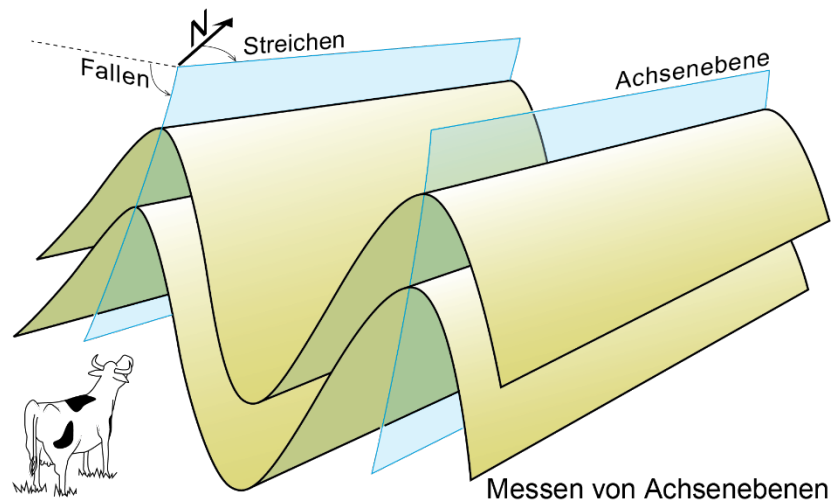
Faltensysteme – drei-dimensionale Definitionen

Eine Falte verbiegt eine einzelne Fläche, eine Schicht mit zwei Grenzflächen, oder sie verformt einen Schichtstapel mit mehreren Grenzflächen. Eine Gruppe von Falten, die räumlich und genetisch miteinander zusammenhängen, bildet ein **Faltensystem**. Ein Grossteil der geometrischen Beschreibung der Falten handelt von der Form in Profilansicht.

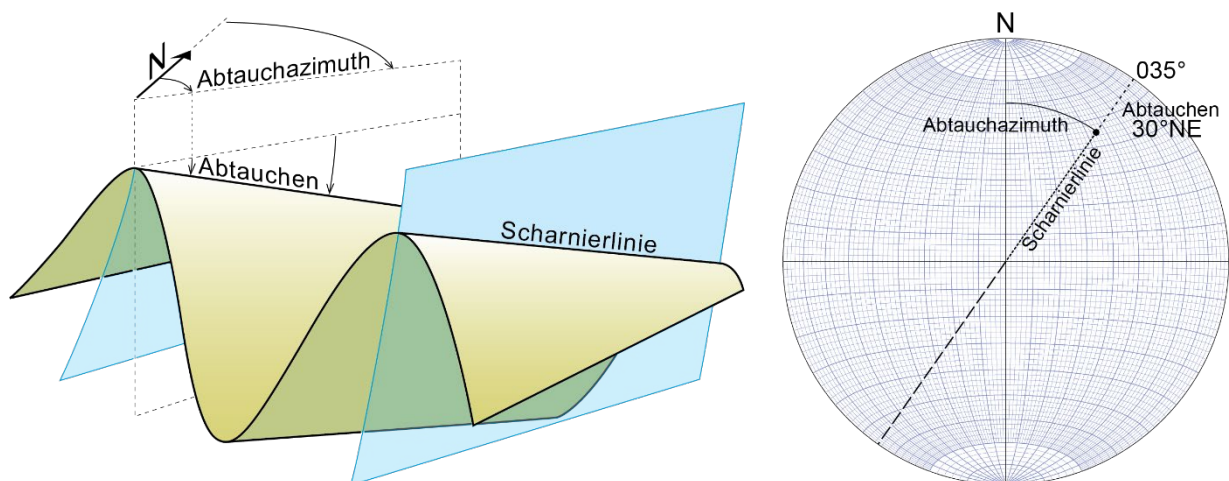
Faltenachse und Achsenebene

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**. Wenn die Achsenfläche

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



Die Orientierung der Achsenebene wird mit Fallen und Streichen angegeben; in kompakterer Form mit Fallen und Fallazimut (Richtung des Fallwinkels). Wie bei jeder Fläche ist das Streichen die Horizontale (horizontale Linie) einer Fläche. Der Fallwinkel ist der Winkel zwischen der Fläche und der horizontalen Ebene. Die Achsenebene schneidet die Scharnierzone der Falte entlang einer Linie, nämlich entlang der **Faltenachse** (*fold axis*). Die Orientierung der Faltenachse oder der **Scharnierlinie** wird durch ihr **Abtauchen** (*plunge*) und das **Abtauchazimut** (*plunge direction*) definiert. Das Abtauchen einer Linie wird in der Vertikalebene gemessen; es ist der Winkel zwischen der Linie und der Horizontalebene. Das Abtauchazimut ist die Richtung der Linie nach der Vertikalprojektion auf die Horizontalebene, und zwar entlang der Linie in Abtauchrichtung gesehen.



Die Faltenachse ist das wichtigste strukturelle Element einer Falte, da die Strukturen in dieser Richtung maximale Kontinuität zeigen.

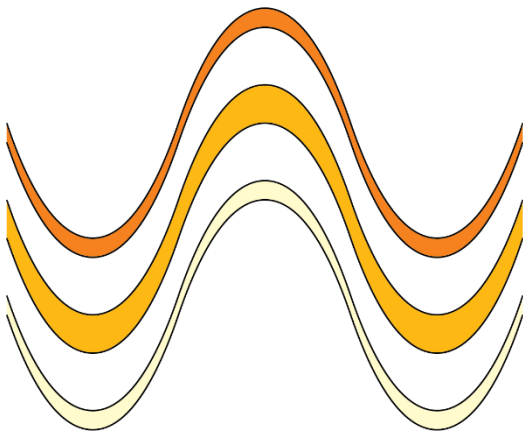
Schichtmächtigkeit – parallele und kongruente Falten

Falten mit konstanter Schichtmächtigkeit, gemessen senkrecht zu den Schichten, werden als **parallele** Falten bezeichnet. Ein Spezialfall sind die **konzentrischen** Falten, in welchen die gefalteten Schichtflächen kreisförmige Bögen mit einem gemeinsamen Zentrum beschreiben. Falten, bei denen die "Schichtmächtigkeit" parallel zur Achsenfläche gemessen konstant ist, heissen **kongruente** Falten. Kongruente Falten behalten ihre Form über das ganze Profil, und die aufeinander folgenden

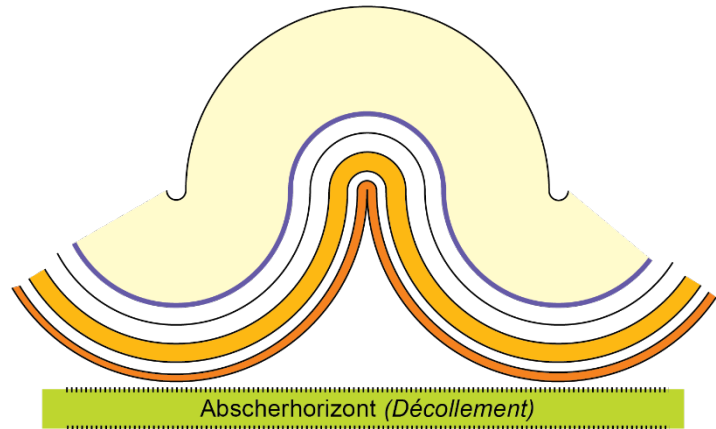
gefalteten Flächen sind vollkommen deckungsgleich (=kongruent). Sie sterben nicht aus, weder nach unten noch nach oben, die Krümmung im Scharnier bleibt immer gleich.

Effekt der Schichtmächtigkeit auf die allgemeine Faltengeometrie

ideale, kongruente, harmonische Falten



ideale, parallele, disharmonische Falten

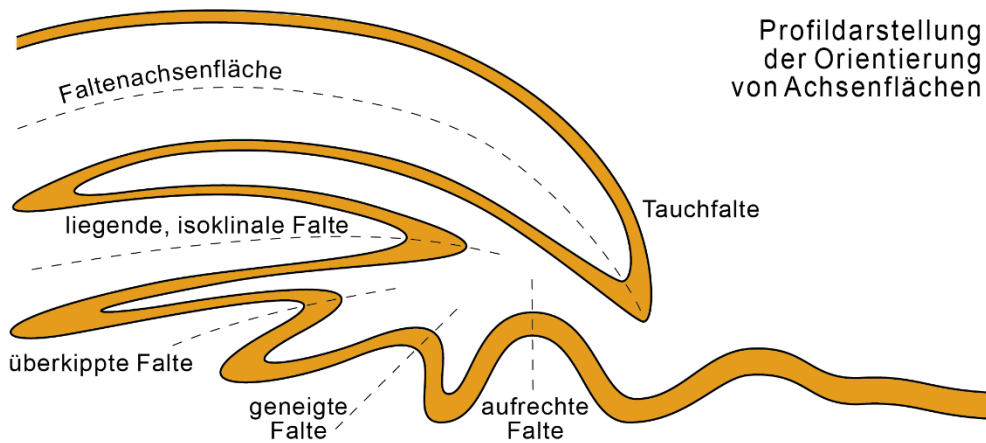


Annäherungen an diese zwei Grundgeometrien werden in Gesteinen zwar beobachtet, die Mehrzahl natürlicher Falten liegt jedoch meist irgendwo dazwischen. Ausserdem können einige Schichten eine fast ideale Morphologie erreichen, andere wiederum nicht. Kongruente Falten haben generell die Tendenz im Profil, ihre Wellenlänge, Symmetrie und allgemeine Form beizubehalten, d.h. ihre Form wiederholt sich in allen angrenzenden Schichten. Solche Falten, ob nun kongruent oder nicht, sind **harmonisch**. Falten, deren Form sich von einer Schicht zur nächsten ändert, sind **disharmonisch**. Disharmonische Falten kommen speziell oft in Gebieten mit parallelen Falten vor, da solche Falten nach oben und unten 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** oder in einer **Sohlfläche** (*décollement*) enden. Der Jura wird oft zitiert für solche Beziehungen.

Konvolute und **ptygmatische** Falten sind charakteristisch für hochgradig-metamorphes Gestein. Erstere haben ausgesprochen gebogene Achsenflächen und sind meistens disharmonisch. Ptygmatische Falten kommen meistens in Migmatiten vor. Dort treten sie in Verbindung mit einzelnen Lagen auf, typischerweise pegmatitische Adern, die in einer schiefrigen oder vergneisten Matrix liegen. Es sind beinahe parallele Falten mit lobater, verschnörkelter Erscheinung und sie tendieren dazu, polyklinal zu sein. Meistens sind sie konzentrisch.

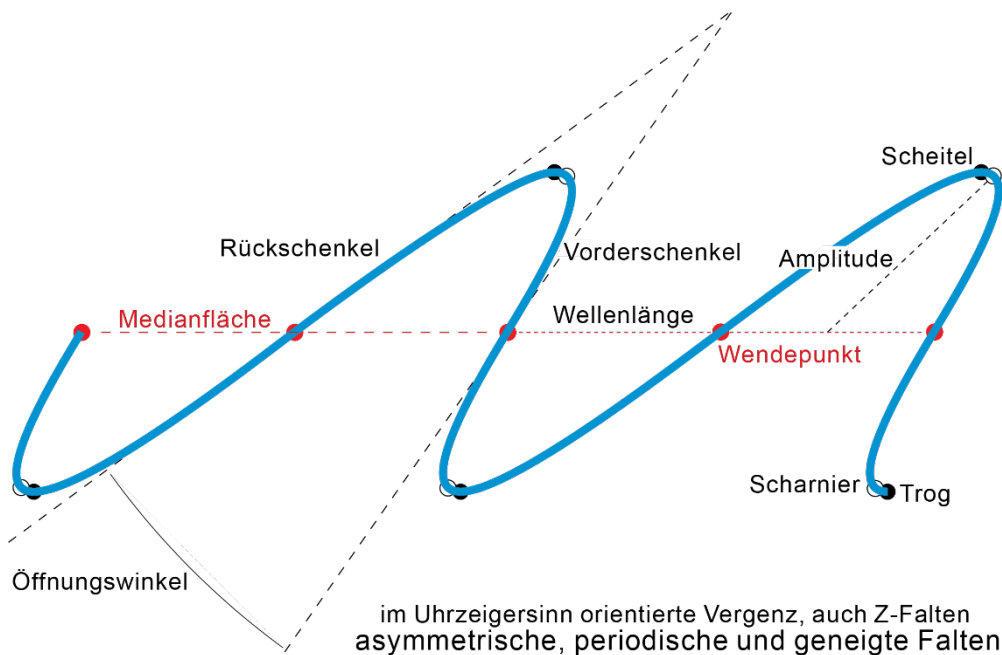
Aufrechte, geneigte und liegende Falten

Falten mit ungefähr vertikal stehender Achsenfläche bezeichnet man als **aufrechte** (*upright*) Falten. Falten mit einfallender Achsenebene nennt man **geneigte** (*inclined*) Falten. Man unterscheidet je nach Neigung der Achsenebene: $80^\circ < \text{steil} < 60^\circ < \text{mittelsteil} < 30^\circ < \text{flach} < 10^\circ$ geneigte Falten. Falten mit sub-horizontaler Achsenebene nennt man **liegende** (*recumbent*) Falten. **Tauchfalten** (*plunging folds*) haben eine Achsenebene, die mehr als 90° rotiert ist. Grosse, liegende Falten, mit mehreren Kilometern langem überkipptem Schenkel, werden manchmal als **Faltendecken** (*fold nappes*) bezeichnet.



Symmetrie

Wenn die Achsenebene die Falte in zwei identische Hälften teilt, müssen die Faltenschenkel gleich lang sein; dann ist die Achsenebene eine Symmetrieebene. Die Falte ist **symmetrisch**. Wenn die Achsenebene keine Symmetrieebene ist, sind die Schenkel der Falte ungleich lang, mit unterschiedlichem Fallen. Solche Falten sind **asymmetrisch**.



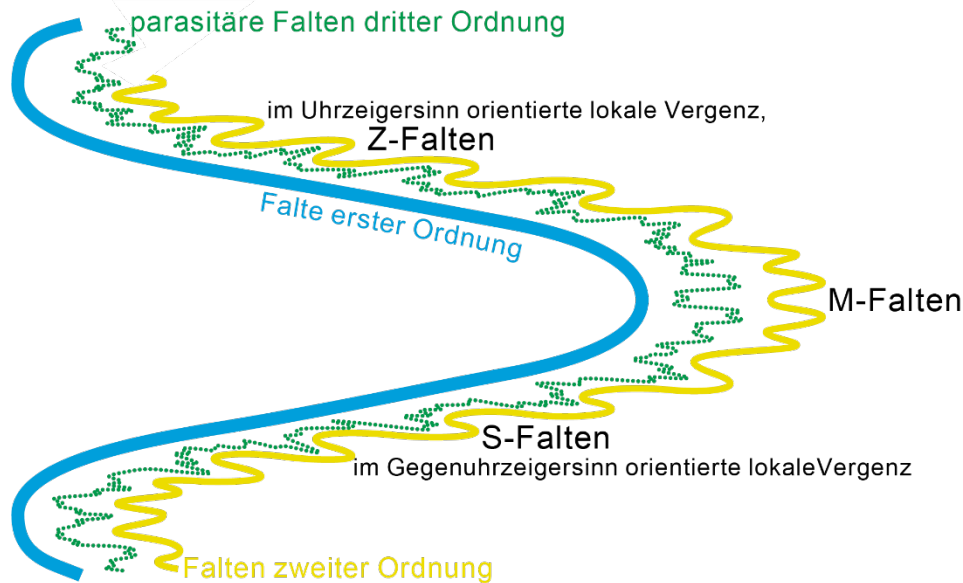
Symmetrische Falten mit geraden Schenkeln und scharfen eckigen Scharnieren, die scheinbar kongruent und parallel sind, tragen den speziellen Namen **Chevronfalten** (*chevron folds*). Asymmetrische Chevronfalten werden auch **Zickzack-Falten** (*zigzag folds*) genannt. **Knickfalten** sind Chevronfalten in geschieferten Gesteinen.

Facing und Vergenz

Die Richtung der Neigung oder des Überkippens von geneigten Falten wird **Vergenz** genannt. Die **wahre Vergenz** oder das **Facing** ist die Jüngungsrichtung entlang der Achsenebene, in Richtung senkrecht zur Faltenachse.

Falten erster und zweiter Ordnung

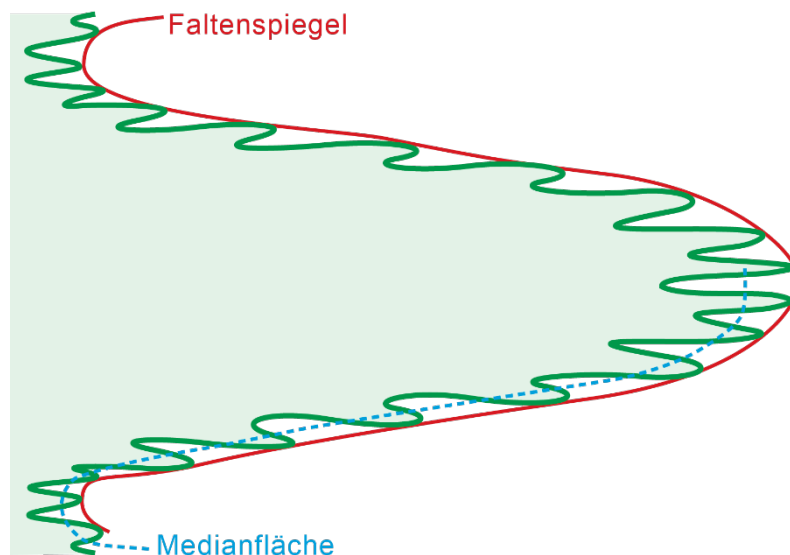
Wo kleinere Falten in den Schenkeln oder im Scharnierbereich einer grösseren Falte vorkommen, werden sie **Parasitär-falten** genannt. Die grössten Falten werden als **Falten erster Ordnung** (*first-order folds*) bezeichnet, die zweitgrössten als **Falten zweiter Ordnung** (*second-order folds*), usw.



Falten erster Ordnung können symmetrisch sein, während Falten zweiter Ordnung asymmetrisch sind. Die Richtung der Asymmetrie ändert sich bei Falten erster Ordnung systematisch von einer Seite der Achsenfläche zur anderen. Dieser systematische Wechsel ist bekannt unter dem Begriff der **lokalen Vergenz**. Die Falten im einen Schenkel haben eine sogenannte lokale **Vergenz im Uhrzeigersinn**, was auch als **Z-Falten** bezeichnet wird, während die Falten des anderen Schenkels eine lokale Vergenz im Gegenuhrzeigersinn aufweisen, welche dann als **S-Falten** bezeichnet werden. Symmetrische **M-Falten** treten meistens im Bereich der Scharnierzone auf. 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.

Faltenspiegel und Medianfläche

Die allgemeine Orientierung einer stark gefalteten Fläche ist durch die Orientierung des **Faltenspiegels** (*enveloping surface*) bestimmt. Dies ist eine gedachte Fläche, die tangential zu den Scharnieren einiger oder aller Antiformen oder Synformen einer verfalteten Schichtfläche ist. Die Fläche, welche die Inflexionslinien verbindet, heisst **Medianfläche**. Welche Falten vom Faltenspiegel berührt werden, hängt vom Massstab der Betrachtung ab: im grossen Massstab entspricht der Faltenspiegel der Orientierung der grossen Gesamtstruktur, im kleinen Massstab bestimmt der Faltenspiegel die allgemeine Orientierung kleinerer Falten höherer Ordnung.



Amplitude und Wellenlänge

Die Distanz im Profil zwischen zwei aufeinander folgenden Antiklinalen (oder Synklinalen) definiert die **Wellenlänge** (*wavelength*). Die Wellenlänge kann aber auch als Distanz zwischen dem einen und dem übernächsten Wendepunkt gemessen werden. Die **Amplitude** (*amplitude*) wird gemessen, indem man entlang der Achsenebene die Hälfte der Distanz vom Scharnier der Antiklinalen zur Umhüllenden der zwei angrenzenden Synklinalenschnierrn misst (oder umgekehrt). Mit anderen Worten, die Distanz entlang der Achsenebene von der Medianfläche zum Faltenscharnier. Amplitude und Wellenlänge bestimmen die **Grösse** (*size*) einer einzelnen Falte. Sie beziehen sich auf die Terminologie, die benutzt wird, um sinusförmige Kurven zu beschreiben. Eine Fläche kann durch einen Faltenzug **periodisch** oder **nicht-periodisch** verfaltet sein. Bei disharmonischer Faltung variieren Wellenlänge und Amplitude der Falte von Schicht zu Schicht.

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.

Konjugierte Falten

In Gebieten mit asymmetrischen Knickfalten können Achsenebenen mit zwei Richtungen vorkommen, sodass die Knickbänder sich schneiden. Solche Strukturen sind bekannt als **konjugierte Knickfalten** (*conjugate kinks*) oder konjugierte Knickbänder. Der allgemeinere Ausdruck der **konjugierten Falten** (*conjugate folds*) wird verwendet, um ein beliebiges Paar von scheinbar zusammenhängenden Falten zu beschreiben, deren Achsenflächen mit grossem Winkel zueinander geneigt sind (dies bedingt entgegengesetzt gerichtete Vergenz). Solche Falten enden meistens in einer eckigen Falte (mit anderer Orientierung), dort, wo die beiden Achsenflächen zusammentreffen. Dieser Punkt befindet sich meistens in einer inkompetenten Schicht. Spezielle konjugierte Falten haben eine Form wie die drei Seiten eines Rechtecks: eine flache Scharnierzone und steile Schenkel. Man nennt sie **Kofferfalten** (*box-folds*).

In einigen Faltengruppen, mit sub-parallelen Scharnieren, können die Achsenebenen mehrere verschiedene Orientierungen haben. Solche Strukturen sind **polyklinale** Falten.

Faltenzüge

Betrachten wir ein geschichtetes Gestein, das geschert wird. In einer Schicht, die von den angrenzenden Schichten abgeschert wird, können so mehrere nebeneinander liegende Falten entstehen. Die angrenzenden Gesteinsschichten bleiben mehr oder weniger unverfaltet. Wenn solche **Faltenzüge** (*fold trains*) eine systematische Vergenz aufweisen, kann aufgrund der Asymmetrie ein relativer Schersinn zwischen den angrenzenden Gesteinsschichten bestimmt werden. In diesem Fall wird der Faltenzug auch als **Schleppfalte** (*drag fold*) bezeichnet. Man deutet damit an, dass ein Geschwindigkeitsgradient quer über den Gesteinsstapel die dazwischen liegende Schicht verfaltete. Dabei entstehen typischerweise nicht zylindrische, asymmetrische und disharmonische Falten. Gravitationskräfte, die auf plastisch verformbare Schichten wirken, können zur Bildung von **Faltenkaskaden** (*cascades of folds*) führen.

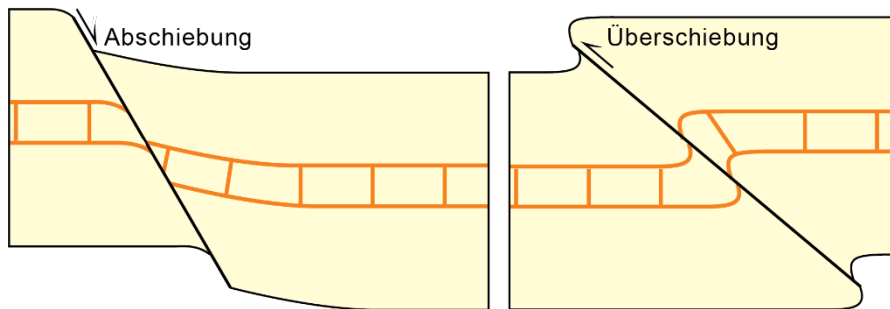
Verbindungen zwischen Falten und Störungen

Schleppfalten

Aufgrund der Reibung entlang einer Störungsfläche können Gesteinsschichten, die an eine Störung grenzen, in die Bewegungsrichtung des gegenüberliegenden Blocks konvex verbogen werden. Diese kleinen Verbiegungen werden **Schleppfalten** (*drag folds*) genannt. Man nimmt dabei an, dass zuerst die Störungsfläche angelegt wird und sich erst später - mit der Relativbewegung der beiden Blöcke - die Gesteinsschichten verfallen. Die Verwendung von Schleppfalten als Indikator für den Bewegungssinn kann zu falschen Resultaten führen, da **inverse Schleppfalten** (*reverse drag folds*) ein häufiges Phänomen sind. Dieses Verbiegen in entgegengesetzter Richtung zum Bewegungssinn tritt oft bei listrischen Abschiebungen auf, bei denen Falten im Hangenden konkav zur Gleitrichtung

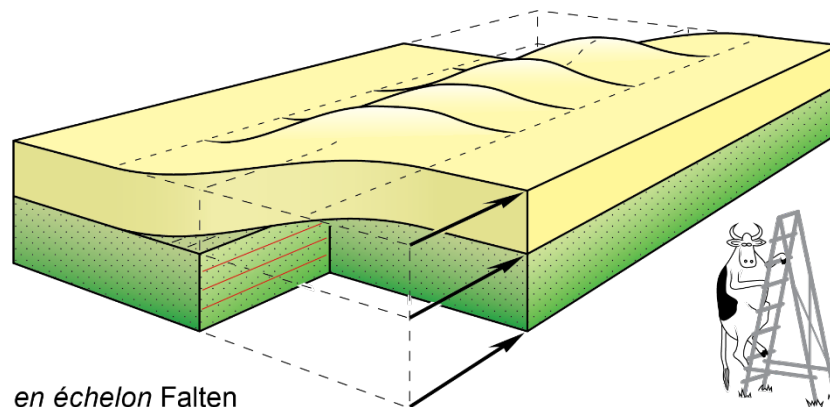
sind. Inverse Schleppfalten haben nichts gemeinsam mit wahrer Schleppung, sind aber von letzterer schwierig zu unterscheiden, speziell dann, wenn sie getrennt vorkommen. Hinzu kommt noch, dass die Orientierung solcher Schleppfalten häufig nicht durch die Bewegungsrichtung kontrolliert wird, sondern vielmehr durch die Intersektion zwischen Schichtung und Bruchfläche. Verbogene Schichtflächen sollten deshalb mit grösster Vorsicht als Bewegungsindikatoren auf Störungen benutzt werden. In einem grösseren regionalen Massstab betrachtet, spricht man bei solchen Falten und Überschiebungen von einem **Falten- und Überschiebungsgürtel** (*fold and thrust belt*).

Schleppfalten entlang Verwerfungsflächen



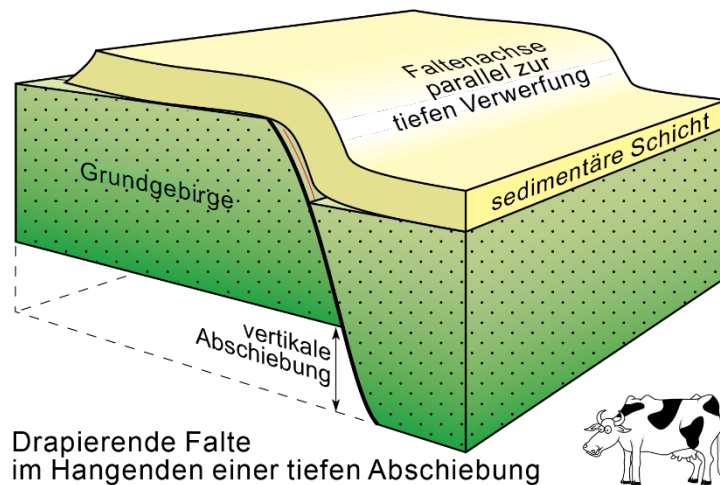
En échelon Falten

In einigen nicht zylindrisch gefalteten Flächen treten relativ kurze, zweiseitig abtauchende Falten mit steiler Achsenebene auf. Sie sind räumlich so arrangiert, dass Kulminationen und Depressionen aufeinanderfolgender Falten entlang einer Linie liegen, die einen spitzen Winkel zu den parallelen Faltenachsen bildet. Bei solchen abgestuften, konsequent überlappenden Falten spricht man von einer **en échelon**-Anordnung. Falls man annimmt, dass die Achsenebenen senkrecht zur Verkürzungsrichtung liegen, so erlaubt die räumliche Anordnung der en échelon-Falten, die mögliche Störung, zu der sie gehören, zu finden. Solche en échelon-Falten kommen häufig im Gestein über Horizontalverschiebungen des Grundgebirges vor, dort, wo das Deckgebirge nicht zerbrochen wurde. Eine en échelon-Anordnung weist auf einen relativen Schersinn hin.



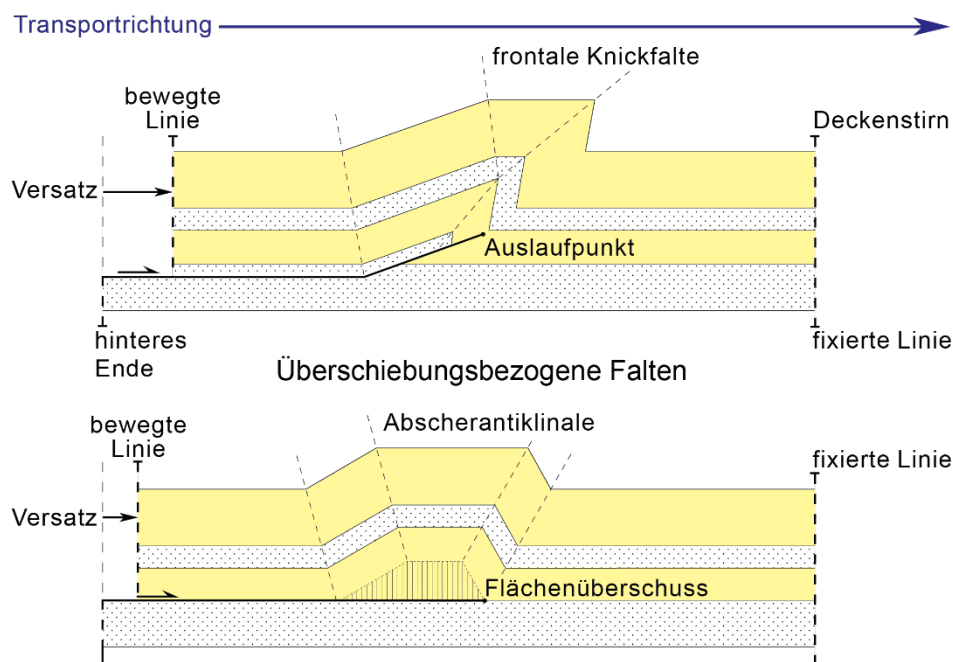
Drape folds - forced folds

Drape folds sind Umbiegungen in sedimentären Schichten, die sich damit passiv einer tiefer liegenden Struktur anpassen. Eine Falte, welche durch differenzielle Kompaktion entstanden ist, ist ein Beispiel für eine *drape fold*. Ein anderes Beispiel sind die Sedimentschichten, welche Störungsabsätze an der Grenzfläche Grundgebirge-Sediment nachzeichnen. Falten, deren Form durch eine tiefer liegende, ebenfalls verfaltete Gesteinsschicht aufgedrängt wurde, werden **forced folds** genannt. Drape- und forced-Faltung benötigen beide kompressions- und extensionsinduzierte relative Bewegungen von Grundgebirgsblöcken entlang von steilen Störungen.



Überschiebungsbezogene Falten

Einige Arten von Schlepptaltung sind besonders schön entlang Überschiebungsflächen ausgebildet. Die Propagation, Verlängerung oder Erweiterung einer Rampenüberschiebung in das darüber liegende unverformte Gestein führt zur Entwicklung einer sogenannten **frontalen Knickfalte** (*fault-propagation fold*).

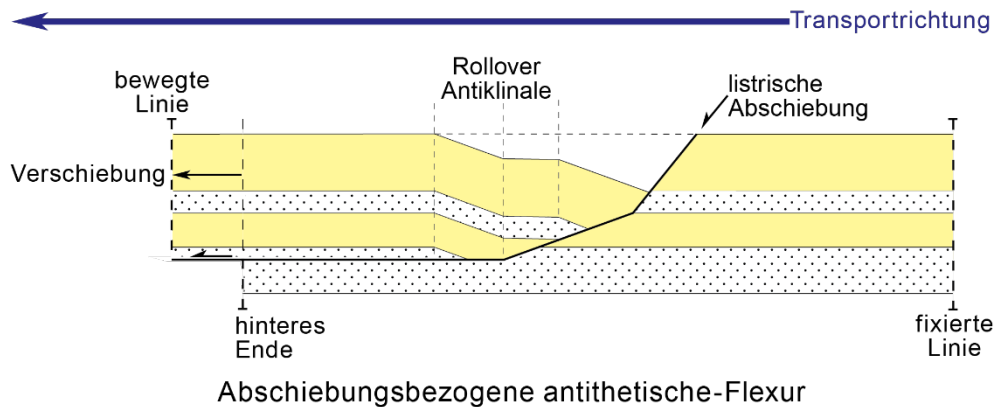


Wachstumsfalten (*growth folds*) entwickeln sich in sedimentären Schichten gleichzeitig mit ihrer Ablagerung. Antiformstrukturen wachsen gewöhnlich über Rampen oder Duplexzonen; dies führt zu **antiformalen Imbrikationen** (*antiformal stacks*).

In einem grösseren, regionalen Massstab spricht man bei solchen Falten und Überschiebungen von einem **Falten- und Überschiebungsgürtel** (*fold-and-thrust belt*).

Abschiebungsbezogene Faltenstrukturen

Bei listrischen Abschiebungen produziert die Kippung des Hangenden zum Hauptbruch hin eine halbe Antiform, die sogenannte **antithetische Flexur** (*rollover anticline*). Die halbe Antiform spiegelt die notwendige Verformung, um das Hangende der gekrümmten Störungsfläche anzupassen, wider.



Plattentektonik und Faltung

Da Falten allgemein mit Kompression verbunden sind, kommen sie vorzugsweise an subduzierenden oder kollidierenden konvergenten Plattengrenzen vor. In Subduktionszonen werden lose Sedimente, die zwischen konvergenten Plattengrenzen eingeschlossen wurden, intensiv komprimiert und oft zu komplexen Mustern verfaultet. Dies geschieht sowohl innerhalb des ozeanischen Trogas als auch im Gebiet zwischen Trog und wachsendem Vulkanbogen. Kontinentale Plattenkollision produziert den am meisten verbreiteten Faltenyp. Mit zu viel Auftrieb, um subduziert zu werden, wird die kontinentale Lithosphäre nach oben gedrückt und spektakulär verfaultet. Komprimierte Sedimente an den Rändern solcher Platten erzeugen solch grosse Gebirgsgürtel wie die Alpen und den Himalaja. Dome und Becken können innerhalb der Kontinente und Platten vorkommen. Dies bewog einige Geologen zur Annahme, dass diese nicht nur durch die seitlichen Kräfte in Verbindung mit den Plattenbewegungen erzeugt wurden. Es kann sein, dass einige dieser Strukturen aus vertikalen Kräften resultieren, die in Verbindung mit Variationen in der Krustendichte stehen. Zum Beispiel entstehen Dome dort, wo Material mit niedrigerer Dichte, so wie Salz oder aufsteigendes Magma, zur Oberfläche wandert und dabei die flachliegenden Sedimentschichten nach oben drückt.

Faltung: Geometrie und Verformungsverteilung

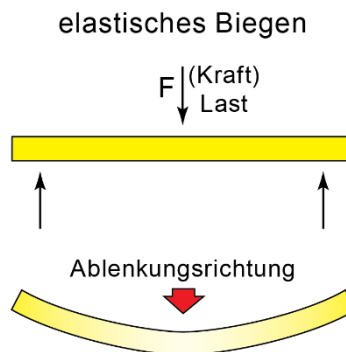
Falten in Gesteinen treten durch verschiedene Prozesse auf; die drei wichtigsten sind Biegung, Stauchung und das Fliessen. Die wichtigste Unterscheidung zwischen den vereinfachten Modellen, die die Entwicklung von Falten zu erklären versuchen, besteht darin, ob eine Schicht aktiv auf eine zu ihr parallel angelegte kompressive Spannung reagiert oder ob sie passiv, das heisst lediglich auf eine ausserhalb der Schicht stattfindende Bewegung und dadurch erzwungene Formänderung, reagiert. Experimente über **passive** Faltung werden mit einem Stapel Modellierungspaste gemacht. Die Grenzen der einzelnen Lagen werden dabei verfaultet, ohne dass irgendein Kompetenzkontrast und ohne dass irgendeine Kraft quer und/oder parallel zu den Lagengrenzen wirkt. In der Geologie hat der aus verschiedenen Schichten zusammengesetzte Lagenbau mechanische Eigenschaften, darum auch die Tendenz zu **aktiver** Verformung während der Deformation.

Biegung

Biegung (*bending*) wird bewirkt durch Kräfte, die an Schichten angelegt sind und auf diese einwirken. Die Schichten können, müssen aber nicht einen Kompetenzkontrast haben. Eine Schicht, die der Biegung unterliegt, verhält sich wie ein elastischer Balken, der an beiden Enden gestützt und in der Mitte belastet wird. Zum Beispiel ein Lesezeichen, das an beiden Enden horizontal auf einem Buch aufliegt. Wenn nun irgendein Gewicht auf die Mitte des Lesezeichens gelegt wird, verbiegt dieses sich nach unten. Diese Verformung findet gewöhnlicherweise auch bei einem überladenen oder zu schwachen Büchergestell statt.

Die Biegung führt zur Entstehung von sehr schwachen Falten. Biegung und damit zusammenhängende Faltenbildung sind im Lithosphärenbereich weit verbreitet. In Kratonen kann die Vertikalspannung steil zur ursprünglich horizontalen Schichtung liegen und so breite Dome und Becken, Wölbungen und Bögen produzieren. Verbiegung der Lithosphärenplatte geschieht auch an

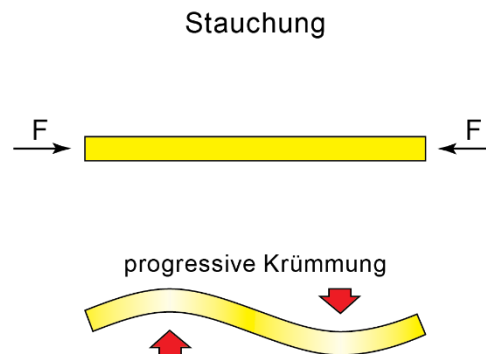
Subduktionszonen und angrenzend an ozeanische Rücken, bei kleineren Ansammlungen von vulkanischen Gesteinen in Ozeanen (z.B. Guyots und grosse Vulkane), und bei grösseren Eis- oder Sedimentauflasten (isostatischer Ausgleich). Ein weiteres Beispiel für Biegefallen sind die Bögen im Deckgestein über einem intrudierenden Pluton.



Stauchung

Stauchung (*buckling*) erfordert, dass die Gesteine eine **mechanische Anisotropie**, normalerweise eine Schichtung, besitzen und ist verbunden mit der **Biegeinstabilität** einer einzelnen Lage oder eines Lagenbaus unter seitlicher, d.h. lagenparalleler Kompression. Darum ist eine Stauchfalte das Resultat der Verkürzung einer einzelnen/mehrerer kompetenter Lagen, die ihre Dicke durchgehend beibehalten. Experimentelle Stauchfalten sind meist symmetrisch und kaum asymmetrisch.

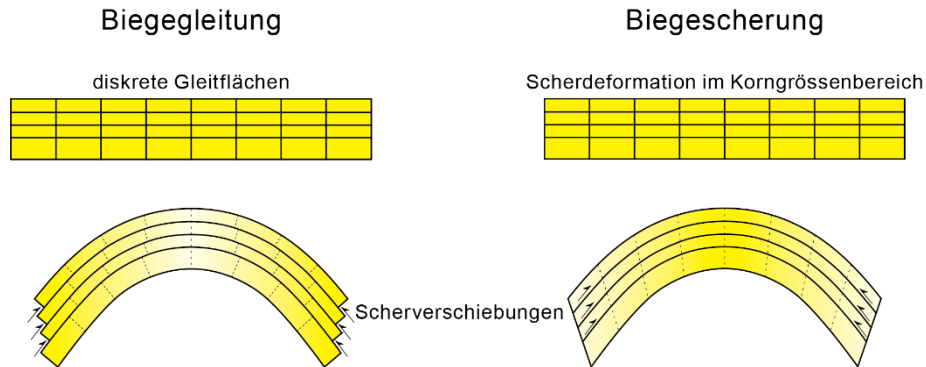
Als Beispiel kann man ein Blatt Papier oder ein Stück Teppich auf den Tisch legen und vorsichtig die beiden Seiten aufeinander zu stossen. Bei geringer Stosskraft bleibt das Blatt flach. Bei zunehmender Kraft sieht man, dass es sich plötzlich verbiegt. Dieser schnelle Übergang von flach zu gebogen (*buckled*) bei einer bestimmten Krafteinwirkung geschieht wegen einer **Instabilität**.



Die Verformung innerhalb der verfalteten Schicht wird durch tangential, schicht-parallele Streckung des äusseren Bogens, und durch ebensolche Verkürzung im inneren Bogen aufgenommen. Die Bereiche mit Streckung und Verkürzung werden durch eine immaterielle Fläche getrennt, welche ohne Verformung ist. Diese Fläche wird gewöhnlich **neutrale Fläche** (*neutral surface*) genannt. Die Auswirkungen der schichtparallelen Verformung sind auf der konvexen Seite der neutralen Fläche einer kompetenten Schicht (*extrados* = äusserer Bogenbereich) Rissbildung und auf der konkaven Seite der neutralen Fläche (*intrados* = innerer Bogenbereich) Bildung von kleineren Falten oder Überschiebungen. Da die Krümmung im Bereich des Scharniers maximal ist und gegen die Wendepunkte hin zu null abnimmt, nimmt auch der absolute Wert der tangentialen longitudinalen Verformung vom Scharnier zum Wendepunkt ab. Die tangential Verformung nimmt aber auch gegen die neutrale Fläche hin ab.

Biegegleitung

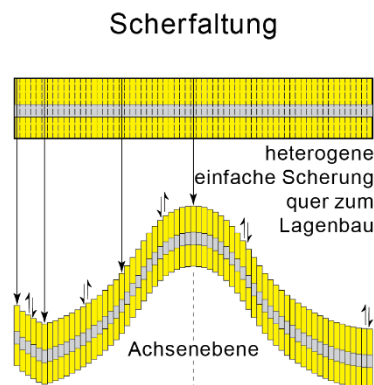
Die Bildung von konzentrischen oder parallelen Falten kann zu schichtparallelen Scherverschiebungen in Richtung Antiform- oder Synformachse führen. Dieser Prozess heisst **Biegegleitung** (*flexural slip*), wenn die Gleitflächen diskret sind, oder **Biegescherung** (*flexural flow*), wenn die Scherdeformation im Korngrössenbereich stattfindet. Biegescherung weist keine diskreten Gleitflächen auf.



Der Betrag der Scherung vergrössert sich von 0° im Scharnier zu den Wendepunkten hin. Der Schersinn kehrt am Scharnier um. Ein grundsätzliches Merkmal dieses Modells ist, dass die gefalteten Schichten nicht zerbrochen werden. Diese Art der Faltung ist charakteristisch für hochkompetente Schichten, die durch Ebenen dünner, schwacher Zonen getrennt sind.

Scherfaltung

Einfache Scherung auf dicht aufeinander folgenden Ebenen parallel zur Achsenebene und schräg zur gefalteten Schicht führt zu idealen kongruenten Falten. Man nennt diesen Mechanismus **Scher-**(*shear*) oder **Gleitfaltung** (*slip folding*). Das Verformungsmuster ist charakterisiert durch eine divergente Verteilung der langen Hauptachsen der Verformungsellipsoide, die vom Zentrum oder Kern der Falte gegen aussen hin divergieren. Diese Art der Verformung impliziert ein äusserst inkompetentes Verhalten der gefalteten Schichten.



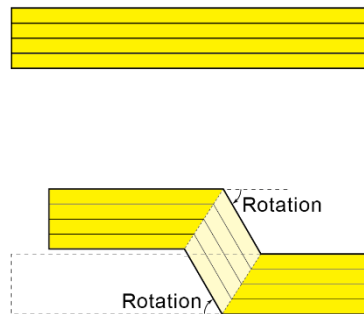
Dieser Prozess findet in Fliessfalten statt und tritt während des Fliessens eines Materials wie Lava, Salz oder Eis auf. Keine mechanische Anisotropie ist notwendig, nur passive Markenflächen können das Fliessmuster innerhalb des Materials aufdecken.

Knickung

Die Geometrie der Knick- und Chevronfalten wird durch die Rotation eines Stapels dünner Schichten gesteuert, welche zwischen zwei benachbarten Knickbandgrenzen (Knick-Achsenebenen) planar

bleiben. Rasche Änderungen in der Orientierung treten nur entlang von Knickbandgrenzen auf. Auf den Schenkeln findet Biegegleitung statt.

Knickung durch Körperrotation

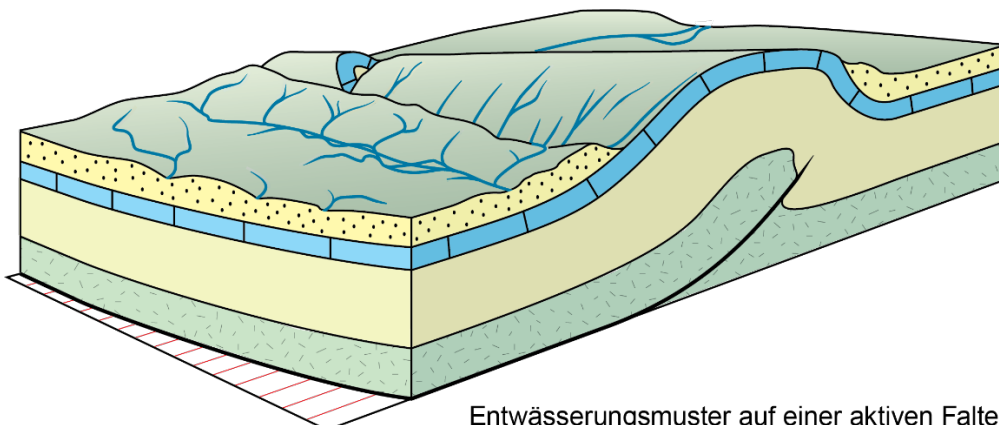


Es gibt mehrere Modelle. Einige Modelle besagen, dass die Knickbandgrenzen in undeformiertes Material hinein migrieren. Die anderen Modelle folgern, dass die Knickbandgrenzen die fixen Grenzen einer Scherzone sind.

Geomorphologische Kriterien für Faltung

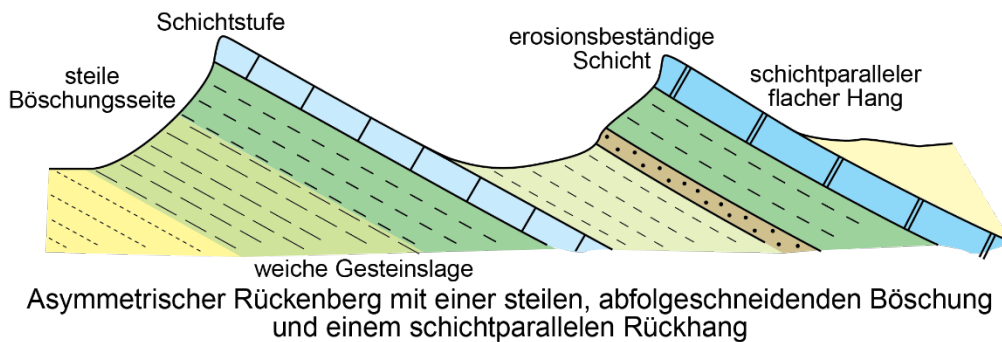
In modernen Faltungsgebieten ist die Auswirkung der Faltung auf die Oberfläche verzerrt und die Beziehung zwischen Entwässerungs- und geologischer Geschichte ist komplex, weil auch das regionale Klima und die Erosionsfähigkeit des Oberflächenmaterials eine Rolle spielen. Die Landschaft entwickelt sich, während tektonisch produzierte Steigungen durch Erosion und Sedimentation verändert werden und sich das Entwässerungssystem dem anhaltenden Wachstum der aktiven Strukturen anpasst. Der einfachste Fall ist die Kippung, die Abtragung eines steileren Tals und Aggradation in einem flacheren Tal verursacht. Die Geomorphologie gefalteter Gebiete ist als Ganzes das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von drei Steuerungsfaktoren: (1) die dreidimensionale Form der Falten, die die Erdoberfläche beeinflussen, (2) die tektonischen Prozesse durch die Verformungsgeschwindigkeit und (3) die Erosionsprozesse durch die differentielle Erosion der Gesteine, die durch Klima, Gesteinsart und Strukturschwäche beeinflusst wird. Das Gleichgewicht zwischen Verformungs- und Erosionsraten hat eine entscheidende Bedeutung.

* Wenn die Verformungsgeschwindigkeit grösser als die Erosionsrate ist, widerspiegelt die Topografie die strukturellen Formen. Die Antiklinalen sind aufgewölbte Gebiete, die einen Kamm bilden und die Synklinalen sind Senkungen, die lange Vertiefungen formen. Deshalb bilden gefaltete Gebirgsgürtel eine Abfolge von Rücken und Tälern, die dem strukturellen Trend der Falten folgen. In Synklinaltälern folgen die Flüsse erster Ordnung der Längsachse der Falte, während die Flüsse zweiter Ordnung bei Antiklinalen seitlich auf den Flanken hinunter fließen. Währenddessen wird im Allgemeinen Alluvium in den Synklinalen sedimentiert. Der Lauf der Flüsse ist Folge der Oberflächenneigung.



Entwässerungsmuster auf einer aktiven Falte

* Wenn Erosion schneller als Deformation ist, dann modifiziert die Erosion die Strukturformen nachhaltig und die Landschaft passt sich dem Gesteinswiderstand gegen Erosion an. Das Strom-Muster ist im Anschluss an die Strukturbildung. Die selektive Erosion entfernt die weichen Gesteinslagen, um die widerstandsfähigen Lagen hervorstehen zu lassen. Schlussendlich lassen die erodierten Falten parallele Ketten von **Rückenbergen** (*hogbacks*) übrig, die asymmetrische Querschnittsrücken entlang geneigten, beständigen Schichten der Schenkel sind; die Hügel haben einen Hang parallel zur Schichtfläche, der flacher als die Böschungsseite einfällt. Der Scheitel ist im Allgemeinen schmal. Die topografische Asymmetrie spiegelt sich auf beiden Seiten der Faltenachse.



Entwässerungen von den verlängerten Hochländern

Entwässerungsnetze auf linearen (zylindrischen) Bergen zeigen eine bestimmte Organisation an, indem die Abstände zwischen den Hauptquerflüssen (zweiter Ordnung) durchschnittlich ungefähr der Hälfte der Gebirgsbreite (Abstand von der Gebirgsfrontseite zur Hauptentwässerung) entsprechen, unabhängig vom Klima und von der Tektonik. Der Abstand variiert innerhalb eines kleinen Bereiches um einen Mittelwert von 2.1:

$$\text{Breite des Gebirges} = 2.1 \text{ Abstand der Flüsse}$$

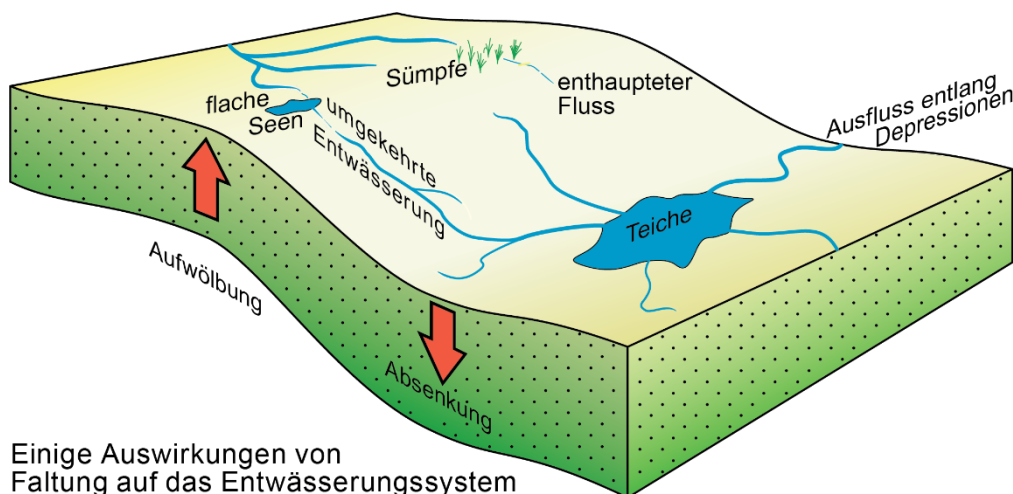
Aktive Faltung verändert das Entwässerungssystem und verformt Terrassenreihen.

Ableitung

Wachsende Falten produzieren wichtige Verzerrungen der vorhandenen Entwässerungsmuster. Flüsse werden von ihrem ursprünglichen Ort und aus ihrer ursprünglichen Richtung seitlich weg von der sich hebenden Region versetzt. Ein plötzlicher Wechsel von einem Flusskanal zu einem nächsten wird **Abriss** (*avulsion*) genannt.

Umleitung

Dort, wo die erosive Energie von Flüssen schwach ist oder die Deformation zu schnell ist, wird das Entwässerungssystem durch die Aufwölbung unterbrochen oder umgeleitet.

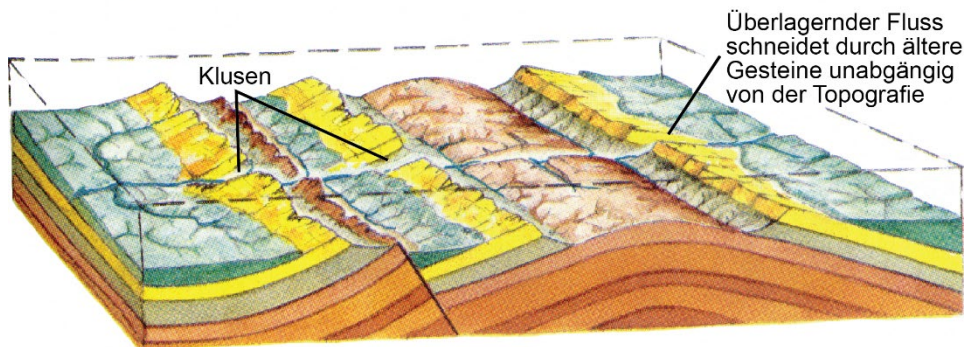
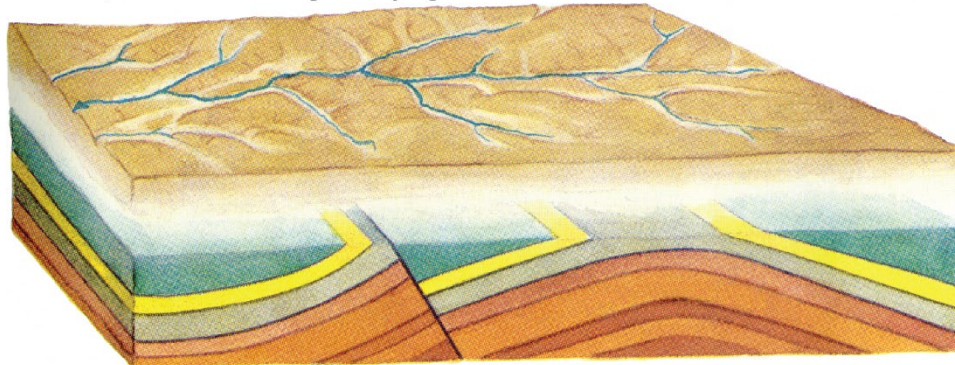


Die Hebung von Antiklinalen schneidet den ursprünglichen Fluss ab, oder kann sogar lokal die Fließrichtung des Oberlaufes umdrehen. Eine **Wasserscheide** (*drainage divide*) entsteht entlang des Scheitels einer entstehenden Falte. Teiche entwickeln sich in den nach unten gebogenen Synklinalen und Überfließen kann zur Bildung eines neuen Tales entlang der Depressionsachse führen. Flüsse folgen den Synklinalen, welche beidseitig durch Rücken von Antiklinalen getrennt werden (die wachsende Antiklinale bildet eine Art Staudamm). Durch die komplizierte Wechselwirkung zwischen den neuen und alten, umgeleiteten Flussmustern entstehen lange Täler parallel zur Schichtung.

Antezedenz

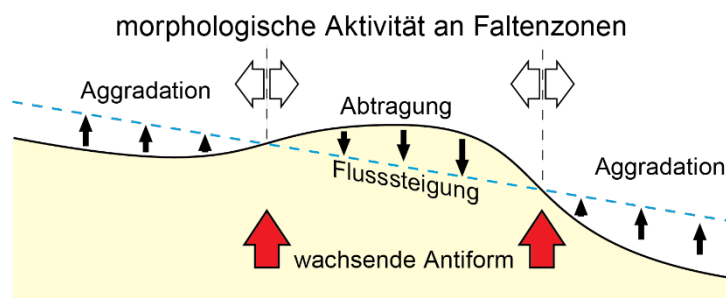
Wenn sich die Flüsse kräftig einschneiden oder die Deformation relativ zur Hebung langsam ist, wird der Fluss während der Aufwölbung seinen Verlauf beibehalten. Ein solcher Fluss wird ein **antezedenter Fluss** (*antecedent stream*) genannt, weil er schon vor der Entstehung des Antiklinalrückens anwesend war. Der Hauptfluss schneidet eine Schlucht durch den Rücken der wachsenden Antiform (**Degradation**) so schnell wie die Rücken durch Wachstum der Antiklinale gebildet werden.

Flusslauf, der sich in flachliegenden jungen Gesteinen bildet



nach Chernicoff et al. (1995) *An Introduction to Physical Geology*

Dieser Prozess führt zu steilen Schluchten, zu sogenannten **Quertälern** oder **Klusen** (*cluses*). Die Verringerung der Steigung verursacht Absenkung und Absetzung (Versandung) auf beiden Seiten der Erhebung (**Aggradation**).



Häufig entwickeln die Flüsse, die von einer Schlucht auftauchen, Nebenarme (d.h. sie spalten sich in viele fächerförmige Flussbette auf, während Ablagerung induziert wird). Andererseits laufen Nebenflüsse zusammen und verbinden sich zu Flüssen, die Kanten durchbrechen. Die schmalen Täler, die die Flanken der Rücken hinauf und senkrecht zur Faltenachse wachsen, können den Scheitel erreichen und ab erodieren und die „durchbrochene“ Antiklinale schliesslich durchschneiden.

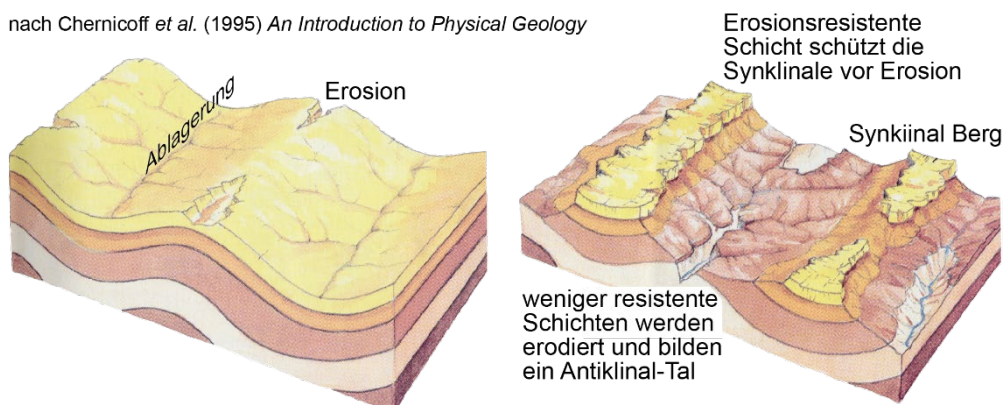
Spalier-Muster

Kurze, steile Nebenflüsse fliessen die Kammhänge senkrecht zum Hauptstromtal hinab und bilden dabei ein Muster, das Ähnlichkeiten zu den parallelen Latten eines Gartenzaunes hat. Die alten Faltenscharniere zeigen charakteristische Zickzackmuster von Aufschlüssen, die abwechselnd aus parallelen, erosionsbeständigen und weichen Schichten bestehen. Die Hügelketten konvergieren in Richtung der Spitze der abtauchenden Antiklinale und divergieren weg von den synklinalen Spitzen.

Topografischer Ausdruck der gefalteten Schichten

In sedimentären Gesteinen kontrollieren die Schichten stark die Verwitterung und Erosion. Ein ausgezeichnetes Beispiel ist der Jura. Wenn der Rücken einer Antiklinale einen weichen Kern hat, wird die Antiklinalachse erodiert und so ein **Antiklinaltal** (Höhental, *anticlinal valley*) bilden. Antiklinaltäler sind vergrössert und vertieft, wobei die Antiklinale entlang ihrer gesamten Länge aufgebrochen sein kann. Nach einer langen Periode der Erosion kann die Topografie sich umkehren, dann mit den Achsen der Antiklinalen in den Tälern und den Rücken entlang der Synklinalachsen.

nach Chernicoff et al. (1995) *An Introduction to Physical Geology*



Nach tiefer Erosion bilden leicht erodierbare Schichten, lineare Täler und widerstandsfähige Schichten lineare Kämme, die zu einer **Mulden-und-Sättel-Topografie** (*valley and ridge topography*) führen.

Flussmuster auf Domen und Becken

Durch die Erhebung eines Domes fließen die Flüsse seitlich in alle vier Himmelsrichtungen an den Rändern des Domes hinab. Sie entwickeln ein **Radialmuster**. Andererseits laufen Flüsse in Richtung zum Kern eines Beckens zusammen und bilden ein **zentripetales** Muster.

Konzentrische Entwässerungen um Gleisdome sind Verwitterung an Steilstufen zugeschrieben worden. Andere gebogene und ringförmige Muster hängen mit Meteoriteneinschlägen zusammen.

Zusammenfassung

Faltung ist ein Phänomen, das üblicherweise bei einer Verkürzung auftritt. Die drei wesentlichen physikalischen Mechanismen, die für die Faltung verantwortlich gemacht werden können, sind: Stauchung, wahrscheinlich aufgrund einer primär geometrischen (mechanischen) Singularität oder Unregelmässigkeit, Biegung und Verstärkung. Aber die vielen verschiedenen Formen und Grössen von Falten spiegeln grundsätzlich verschiedene Rheologien wider, je nach den physikalischen (Temperatur, Druck, etc.) und geometrischen (Schichtdicke) Parametern.

Die folgenden Faktoren sollten bei der Analyse jeder Faltenbildung berücksichtigt werden:

- Die rheologischen Eigenschaften des sich deformierenden Materials

- Die mechanische Anisotropie der Gesteinsmasse

- Das Spannungsfeld, das auf das Gestein einwirkt, unter Einbeziehung der Körperkräfte

- Der Einfluss jeder Heterogenität

- Die Randbedingungen

Änderungen im Flusslauf liefern Beweise für aktive Faltung. Hauptströme und Nebenflüsse werden entsprechend der Orientierung und der Symmetrie der wachsenden Faltenysteme geordnet.

Langfristige Erosion der gefalteten Bereiche reflektiert auch die Verteilung der sedimentären Schichten entsprechend ihrem Widerstand gegen Erosion.