© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Mechanische Probleme der Gebirgsbildung.

Von **Walter Schmidt**, Leoben.

(Mit 1 Tafel [III] und 2 Textfiguren.)

Mit der Arbeit beabsichtigte der Verfasser, Geologen, denen die der Technik geläufigen Gesichtspunkte nicht vertraut sind, eine Anleitung zum Studium der mechanischen Seite der Tektonik zu geben. Er sah sich daher genötigt, in den ersten Kapiteln eine kurze Darstellung dieser Anschauungsweisen zu geben, so daß Neues erst in den letzten Kapiteln zu suchen ist.

Das Grundwort des Titels sagt schon aus, daß das Resultat der Arbeit „Probleme" sind, deren wichtigste der Verfasser in der Zusammenstellung in apodiktischer Form aussprach, um sie zur Diskussion zu stellen. Er glaubt, daß unter diesen Problemen einige sind, die nicht bloß das Interesse der Geologie, sondern auch das der Technologie erregen werden.

Der Verfasser bittet, etwaige Unstimmigkeiten im Stoff und Mängel der Form der Arbeit mit der Unruhe der jetzigen Zeit und den Schwierigkeiten, mit denen er bei der Fertigstellung der Arbeit zu kämpfen hatte, zu entschuldigen.

*

Wenn wir uns eine Übersicht über die Geschicke eines geologischen Körpers machen wollen, so müssen wir zunächst untersuchen, inwieweit uns seine Erlebnisse überhaupt zur Erkenntnis gelangen können, daher Gegenstand direkter geologischer Forschung bilden können.

Nehmen wir nun als einfachen Fall ein Gestein her, das sich unter ähnlichen Verhältnissen gebildet hat, unter denen wir es jetzt beobachten, so wird es im Laufe seiner Geschichte eine große Reihe von Umwandlungen durchgemacht haben, aber nicht alle werden an ihm mehr sichtbar sein, ein Teil seiner neu erworbenen Eigenschaften wird bei der Rückkehr in das Ausgangsstadium wieder rückgängig geworden sein.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Es sind daher in unserem Falle nur die nicht rückläufigen Eigenschaften, die zu unserer Erkenntnis gelangen.

Diese unter dem Begriff nicht rückläufige Eigenschaften zusammengefaßten können nun wieder in zwei Gruppen zerlegt werden, solche, die direkt nicht umkehrbar sind, weil bei ihrer Bildung ein Teil der umgesetzten Energie in eine Form verwandelt wurde, die sich aus dem System entfernte, wie z. B. bei der Wärme. Aber nicht bloß Dissipation von Energie kann einen Vorgang nicht umkehrbar machen, ganz ähnlich kann auch Dissipation von Stoffen wirken. Wenn bei einer Umsetzung z. B. ein Teil in flüssiger oder gasförmiger Form erscheint, ist seine Entfernung aus dem System sehr leicht möglich, ein Rückkehren in den Ausgangszustand ist dann nicht mehr möglich.

Es können aber auch die Spuren anderer Vorgänge, trotzdem sie schon weit zurückliegen, noch nicht verwischt sein, das sind solche, deren Rückkehr der großen inneren Trägheit halber außerordentlich langsam erfolgt. Die Anzahl solcher Erscheinungen ist eine außerordentlich große, es genügt, darauf hinzuweisen, daß die große Masse der kristallinen Gesteine fast vollständig diesem Typus angehört, daß wir eigentlich statt eines Gneises vielleicht einen sandigen Lehm zu finden hätten. Daß es wirklich die innere Trägheit ist, die diese Umwandlung verzögerte, sieht man daraus, daß in dem Augenblicke, wo die Verwitterung die Reibung aufhebt, und auch etwaige durch Dissipation verloren gegangene Stoffe ersetzt, die Rückkehr eigentlich eine unerwartet rasche ist.

Diese Überlegungen gelten für Körper, deren Ausgangszustand mit den Bedingungen, unter denen sie zur Beobachtung kommen, zusammenfällt, also unter Voraussetzung des Aktualitätsgesetzes etwa für Sedimente. Es gibt jedoch eine ganze Reihe Gesteine, für die das nicht zutrifft, die Tiefengesteine. An diesen können auch umkehrbare Prozesse direkt zur Erkenntnis kommen. Doch läßt sich das Verhalten dieser durch eine ideale Fortsetzung des Prozesses bis zur Rückkehr in die Ausgangsbedingungen leicht übersehen.

Eine Analyse, inwieweit Vorgänge umkehrbar sind oder nicht, wird daher für den Geologen immerhin von Interesse sein, da solche, deren reine Umkehrbarkeit erkannt ist, fast

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

vollkommen aus seinem Beobachtungsmaterial ausscheiden dürften.

Von diesem Gesichtspunkte können die Eigenschaften eines Körpers in zwei Kategorien geschieden werden, solche der Form und solche des Stoffes. Während in bezug auf den Stoff zahlreiche umkehrbare Vorgänge möglich sind, sind Veränderungen der Form in den meisten Fällen nicht umkehrbar. Es führt dies in manchen Fällen dazu, daß an und für sich umkehrbare Veränderungen des stofflichen Bestandes, die gleichzeitig mit Formänderungen verbunden waren, aus den letzteren zur unmittelbaren Erkenntnis gelangen. Dies ist ja die Bedeutung der Para- und Pseudomorphosen, Reliktstrukturen usw.

Wir wollen uns nun in dieser Arbeit auf die mechanischen Kräfte beschränken.

Auch in diesen können wir zwei ganz analoge Kategorien unterscheiden, solche, die die stofflichen Eigenschaften in weiterem Sinne beeinflussen und solche, die Veränderungen der Form hervorbringen. Beide Kategorien treten nur selten voneinander getrennt auf, doch ist die Scheidung ihrer Wirkungen meist sehr leicht möglich.

Wir nennen die beiden Kategorien Normal- und Scherkräfte. Um ihre Wirkungen zu untersuchen, ist es gut, Fälle zu betrachten, an denen die eine dieser Kategorien allein vorkommt. So ein Fall ist zum Beispiel bei hydrostatischer Beanspruchung verwirklicht. Hier gibt es keine Scherkräfte. Nun zeigt es sich, daß die Wirkungen solcher Normalkräfte, insoweit sie Druckkräfte sind, wahrscheinlich überhaupt keine nichtumkehrbare, plastische Veränderung, welche bei Normalkräften eine Volumsänderung sein müßte, hervorbringen können. Experimentell ist dies noch nicht erforscht, jedoch zeigt die Zuversicht, mit der wir das spezifische Gewicht zur Identifizierung von Mineralien heranziehen, gleichgültig welcher Vorgeschichte dasselbe angehört, daß wir vollkommen das Gefühl haben, daß das Volumen eines Minerals nicht rein mechanisch bleibend verändert werden kann.

Auch für die analogen reinen Zugbeanspruchungen gilt wohl Ähnliches. Nur ist bei der Schwierigkeit, rein hydrostatische Zugbeanspruchung zu erzeugen, die experimentelle Untersuchung nicht leicht. Es besteht aber ein Gegensatz

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

gegenüber der Druckbeanspruchung darin, daß bei fortwachsendem Zug eine Grenze erreicht wird, an welcher nicht umkehrbare Vorgänge, allerdings Änderungen der Form und nicht des Volumens beim Zerreißen eintritt. Doch wird dies später zu besprechen sein.

Die, so sagen wir, als Volumenergie aufgespeicherte Arbeitsmenge wandelt sich leicht wieder auf demselben Wege zurück, und zwar ist diese Rückverwandlung eine fast augenblickliche, innere Reibung ist hier kaum im Spiel.

Es sei ausdrücklich hier darauf hingewiesen, daß man diese Erscheinungen rein nur in den oben angegebenen Fällen sieht. Versuche an der Festigkeitsmaschine sind dagegen sehr komplizierte Prozesse, bei denen neben diesen Volumsänderungen immer noch Formveränderungen, Gleitungen, wie man aus den Einschnürungserscheinungen usw. sieht, vorkommen.

Wegen der Raschheit der Rückverwandlung werden wir also nur selten Gelegenheit haben, solche aufgespeicherte Volumenergie an der Erdoberfläche selbst zu beobachten, eher noch bei Tunnelbauten. Dort sehen wir nämlich das Gestein in einem Zustand, der vom Ausgangszustand noch mehr oder weniger abweicht, der Kreislauf ist noch nicht geschlossen, deshalb können wir auch umkehrbare Prozesse beobachten.

Neben dieser rein mechanischen Art der Aufspeicherung der Volumsenergie gibt es noch eine zweite, die auf chemischem Weg. Es betrifft dies die Neubildung von Mineralien, zum Beispiel solcher von kleinerem, spezifischem Volumen bei erhöhtem Druck, wie sie zur Erklärung der Entstehung der kristallinen Schiefer von Becke und Grubenmann, von Hise herangezogen worden ist. Auch dieser Vorgang ist, soweit nicht durch Stoffdissipation Teile aus dem System entfernt worden sind, umkehrbar. Nur ist diese Rückkehr im Gegensatz zu den früheren Phänomenen eine außerordentlich langsame, die innere Reibung ist sehr groß, bedarf meist eines Auslösevorganges zur Überwindung. Als solche können Formänderungsvorgänge zum Beispiel bei Diaphoriten wirken.

Wegen dieser oft außerordentlich großen Trägheit bekommen wir auf diese Weise aufgespeicherte Volumsenergie außerordentlcih häufig zu sehen. (Es sei erwähnt, daß es auf Umwegen auch möglich ist, rein elastisch potentielle Energie an der Erdoberfläche aufbewahrt zu finden. Dies ist zum

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Beispiel dann der Fall, wenn in einem Komplex sich der eine Teil rein mechanisch, der andere Teil durch Mineralneubildung an ein geringeres Volum anpaßt. Bei der Rückkehr an die Erdoberfläche behält der letztere sein jetzt zu geringes Volumen bei und hindert ersteren sich auszudehnen, ein Verhalten, ganz der Entstehung der Gußspannungen analog. Die Bergschläge an der Erdoberfläche, die allerdings selten sind, dürften vielleicht so zu erklären sein.)

Sander meint, daß die Dimensionsänderungen, die mit den besprochenen Volumsänderungen zusammenhängen, von tektonischer Bedeutung sein können. Es wird aber schwierig sein, diesen Einfluß auf die Tektonik, neben all den sicher vorhandenen anderen auch nur einigermaßen richtig einzuschätzen, zumal da wir wohl über die Form, nicht aber über die Dimensionen des Ausgangszustandes uns einigermaßen zutreffende Ansichten bilden können. Doch glaube ich kaum, daß diese Volumsänderungen sehr groß gewesen sein dürften.

So sehen wir, daß wohl der Petrograph, nicht aber der Tektoniker, mit den Normalkräften und damit mit den Äußerungen der Volumsenergie zu tun haben wird. Umso mehr interessieren letzteren aber die der zweiten Kategorie angehörigen Prozesse, die Gleitungen (Schiebungen) und die diese hervorrufenden Kraftkomponenten, Scherkräfte. Denn diese haben, wie oben gesagt, die leichte Erkennbarkeit voraus, da sich die Ausgangsform leicht rekonstruieren läßt, dann sind sie aber, und das ist grundlegend, fast zur Gänze nicht umkehrbar. Die bei ihnen umgesetzte Arbeit verwandelt sich nämlich fast zur Gänze in Wärme, also gerichtete Bewegung des Gleitens in die denkbar ungeordnete, durch die Wahrscheinlichkeit beherrschte Bewegung der Moleküle, eine Rückkehr in die geordnete Bewegung wäre daher eine vollkommene Unwahrscheinlichkeit. Darum sind es die Gleitvorgänge, welche die bleibenden Deformationen der Körper hervorbringen, mit Ausnahme der Zerreißungen, die auch nicht umkehrbar sind. Doch sind solche Zugspannungen, die bleibende Deformationen hervorrufen könnten, in der Tektonik nur selten zu erwarten, da für die Beanspruchungen, mit denen man es in der Geologie zu tun hat, die Überlagerung durch eine mächtige allseitige Druckbeanspruchung wohl charakteristisch ist.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Es muß aber doch bemerkt werden, daß nicht sämtliche durch Gleitung hervorgerufene Deformationen plastische sind, daß ein Teil derselben immer elastischen Charakter trägt.

Daß es die Gleitvorgänge hauptsächlich sind, welche die wichtigsten bleibenden Deformationen hervorbringen, ist besonders in der Geologie noch nicht genugsam gewürdigt, obwohl ihre Wichtigkeit, besonders von amerikanischen Forschern, unter denen sich Becker über das Problem am schärfsten ausspricht, betont worden ist.

Wenn wir oben von gesonderten Normalkräften und Scherkräften gesprochen haben, so muß gesagt werden, daß diese beiden nur die fingierten Komponenten der mechanischen Beanspruchung des Körpers sind, die wir eigentlich nur nach den getrennten Effekten der Volums- und Gestaltsveränderungen und den damit nach verschiedenen Seiten erfolgenden Energieumsetzungen, Volumsenergie einerseits, Reibungsenergie anderseits, getrennt vorhanden denken. Es empfiehlt sich jedoch, um weitere Erkenntnisse zu ermöglichen, diese Trennung in Komponenten aufrecht zu erhalten und zu untersuchen, in welchem Verhältnis die einzelnen Kräfte zueinander stehen müssen; nur müssen wir, um das durchzuführen, eine Voraussetzung machen und das ist die, daß in dem Körper Gleichgewicht herrscht. Nun ist diese Bedingung gerade für uns unangenehm, da ja eigentlich etwas vor sich gehen soll. Doch werden wir sehen, wie weit sich die geologischen Bedingungen von dem Gleichgewichtszustand entfernen können.

Spannungsverteilung am Körperelement.

Wenn wir zunächst ein einzelnes Massenteilchen untersuchen, so wirken auf dasselbe als Folge der Beanspruchung von allen Seiten Kräfte, die durch die Festigkeit des Körpers oder durch Reibung übertragen werden. Sie sind mit den äußeren Beanspruchungen variabel, doch läßt sich aus der Forderung des Gleichgewichtes eine weitgehende Gesetzmäßigkeit in ihrer Anordnung ableiten, die im folgenden kurz gebracht werden soll.

Über die Art der Ableitung vergleiche Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik, III.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Denken wir nämlich unser zu untersuchendes Teilchen durch beliebige Ebenen herausgeschnitten, so müssen wir, um dasselbe wieder in den früheren Zustand zu bringen, an diesen Ebenen Kräfte angreifen lassen. Dieselben Kräfte müssen auch im Körper an diesem Teilchen angegriffen haben. Eine solche an einer Begrenzungsebene angreifende Kraft kann man nun in zwei Teile zerlegen, einen, der normal auf die Ebene wirkt, einen, der in der Ebene liegt; letzterer ist mit unserem Begriff Scherkraft identisch, ersteren haben wir schon oben als Normalkraft benannt.

Die Scherkraft würde ein Gleiten der benachbarten Teile entlang der Fläche bewirken, wenn ihr nicht durch andere Kräfte das Gleichgewicht gehalten würde, sie wäre also die Ursache der Formveränderungen, die Normalkraft würde die Teile einander nähern oder voneinander entfernen, sie würde also Volumsveränderungen erzeugen.

Nun waltet zwischen allen den verschiedenen solchen Ebenen folgende Gesetzmäßigkeit: immer sind drei Ebenen auffindbar, die scherkraftlos sind. An ihnen greifen nur Normalkräfte an, von denen zwei die Extreme derselben an den Teilchen darstellen. Diese drei Ebenen und damit auch diese drei als Hauptkräfte bezeichneten Normalkräfte stehen aufeinander normal. In den anderen dazwischenliegenden Ebenen haben wir sowohl Normal- als auch Scherkräfte, und zwar verhalten sich die zu den Hauptachsen des Spannungszustandes symmetrischen Flächen auch in den Kräften symmetrisch. Die Größe dieser an den einzelnen Flächen angreifenden Kräfte ist eine Funktion der Größe der Hauptkräfte und des Winkels der betrachteten Ebene mit den Hauptachsen, was am klarsten vielleicht aus einer von Mohr gegebenen Darstellung ersehen werden kann (Fig. 1). Hier ist dieselbe für ein Bündel von Flächen, die den Winkel zwischen der Fläche der größten und der kleinsten Hauptkraft ausfüllen, gegeben. Die Ordinaten stellen die Normalkräfte dar, die Abszissen Scherkräfte. Dann werden die angreifenden Kräfte an irgendeiner dieser Flächen durch einen Punkt eines Halbkreises gegeben; und zwar stellt der halbe Zentriwinkel zwischen diesem Punkte und der Abszissenachse den Winkel zwischen der benachbarten Ebene und der einen Hauptachse des Spannungszustandes dar. Wir sehen daraus, daß in den beiden um 90^0 divergierenden Haupt-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

ebenen die Scherkraft gleich Null ist, die Normalkraft dort ihre Extreme hat, daß in der Ebene, die mit den Hauptachsen 45^0 einschließt, die Scherkraft ein Maximum hat, ohne daß im allgemeinen die Normalkraft Null ist. Auch über die Größen-

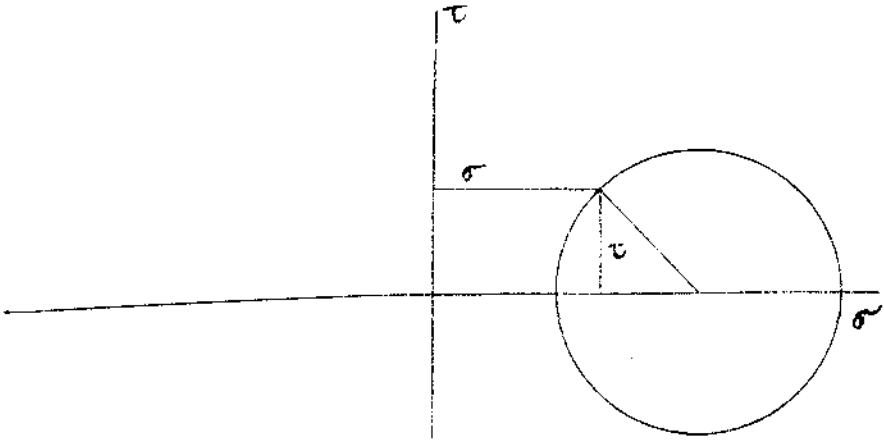

Fig. 1

zusammenhänge gibt uns die Darstellung Aufschluß. Kennt man die Größe der extremen Hauptkräfte, so ist sie sehr einfach zu konstruieren. Man trägt jene auf der Abszissenachse auf und zieht durch diese Punkte einen Halbkreis. Dabei ist Druck nach der einen, Zug nach der anderen Seite hin anzulegen. Unter den unendlich vielen Fällen ragen einzelne ausgezeichnete hervor. Sind zum Beispiel die zwei Extremwerte einander gleich, so schrumpft der Kreis zu einem Punkt zusammen; wir haben daher in keiner der Flächen eine Scherkraft: hydrostatischer Spannungszustand. Ein anderer Fall ist der, daß die beiden extremen Hauptspannungen gleich groß, aber entgegengesetzten Vorzeichens sind. Dann ist das Diagramm ein Kreis mit dem Koordinatenanfangspunkt als Mittelpunkt. Dann haben wir in der 45^0-Ebene die maximale Scherkraft gleich einer der beiden Hauptkräfte, und zugleich die zugehörige Normalkraft gleich Null.

Im allgemeinen ersehen wir aus dem Diagramm, daß die maximale Scherkraft proportional ist der Differenz der beiden Hauptkräfte, unabhängig von ihrem Absolutwerte, während die dazugehörigen Normalkräfte auch durch die Absolutwerte beeinflußt werden.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Die Spannungen an den zwei auf einer der übrigen Hauptebenen normal stehenden Ebenenbüschel werden durch je einen anderen Halbkreis beschrieben. Diese drei Kreise berühren sich gegenseitig paarweise in der Abszissenachse. Die übrigen möglichen Flächen werden durch Punkte des zwischen diesen Halbkreisen liegenden Flächenzwickels dargestellt. Doch hat für unsere Zwecke wohl nur der die Extremwerte enthaltende größte Halbkreis Interesse.

Innere Spannungen.

Dies sind qualitative Angaben über das Verhalten der an einem Massenteilchen angreifenden Kräfte, wenn der Bedingung des Gleichgewichtes genügt werden soll. Nun ist es aber noch nötig, darzulegen, wie bei den vielen Fällen immer sich die zur Erreichung des Gleichgewichtes nötige Kraftverteilung einstellt. Als willkürlich veränderliche Größen sind die äußeren Kräfte anzusehen. Nun zeigt es sich, daß im Augenblick ihres Angreifens das Gleichgewicht noch nicht vorhanden ist, es erfolgen Beschleunigungen und infolge ihres verschieden zeitlichen Eintretens Lagenänderungen zwischen den einzelnen Teilchen. Nun treten als Folgeerscheinung dieser „Deformationen" von ihnen nach bestimmten Funktionen abhängige Kräfte auf, welche weiteren Deformationen entgegenwirken. Durch das Anwachsen dieser Spannungen mit der Deformation kann innerhalb gewisser Grenzen sich die zum Gleichgewicht nötige Kraftverteilung von selbst einstellen. Im folgenden kommen nun Anschauungen über die Gesetze zwischen den Deformationen und den zugehörigen Spannungen, und zwar werden diese wieder in die zwei Kategorien der Normal- und Scherspannungen getrennt.

Einer zentrischen Annäherung oder Entfernung zweier Moleküle entsprechen Normalkräfte. Bildlich können wir ihr Wirken dadurch erläutern, daß wir annehmen, daß zwischen den Molekülen zweierlei Kräfte wirken, anziehende, die wir als primäre Eigenschaft der Materie uns vorstellen können, abstoßende, die wohl die Folge der Wärmeschwingungen sind. Beide dürften mit dem Abstand der Moleküle abnehmen, doch so, daß die anziehenden Kräfte bei großen Abständen überwiegen, die abstoßenden bei kleinen. Im unbeanspruchten Zustand ist die Entfernung der Moleküle dann gleich der Ab-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

szisse des Durchschneidungspunktes beider Kurven. Eine außerdem an einem der beiden Moleküle angreifende Kraft können wir nun sinngemäß zu einer der beiden Kurven addiert denken; dadurch wird die Kreuzungsstelle in einem oder anderem Sinne verschoben.

Wenn die Zugkraft eine gewisse Grenze überschreitet, kann sogar der Fall eintreten, daß die Kurve der abstoßenden Kräfte zur Gänze über der der anziehenden zu liegen kommt. Dann kann eine Gleichgewichtsstellung überhaupt nicht mehr vorkommen, der Körper zerreißt.

(Es soll da noch erwähnt werden, daß ein ganz analoger Prozeß auch durch Erhöhung der Temperatur bewirkt wird, so daß der Gedanke naheliegt, daß der Vorgang des reinen Zerreißens etwa mit dem Verdampfen sehr nahe verwandt sei, ein Verdampfen, das allerdings nur in der Zugrichtung erfolge.)

Während außerhalb des normalen Schnittpunktes der Kurven ein gewisser Maximalabstand zwischen beiden Kurven nicht überschritten werden kann, deshalb nur eine Zugspannung begrenzter Größe aufgebracht werden kann, scheint es, daß innerhalb desselben die Linie der abstoßenden Kräfte beliebig hoch über die der anziehenden ansteigt, insofern nämlich die Annäherung der Moleküle mit Rücksicht auf ihre Größe denkbar ist, das heißt, einer Normaldruckkraft kann auf jeden Fall das Gleichgewicht gehalten werden. Es sind also Druckdeformationen auf jeden Fall umkehrbar, Zugdeformationen nur bis zu einer bestimmten Grenze.

Die Teile der beiden Kurven in der Nähe des normalen Schnittpunktes können mit einiger Annäherung als Gerade aufgefaßt werden. Das heißt, mit einiger Annäherung können für nicht zu große Deformationen die Spannungen als den Deformationen proportional angesehen werden. Dies ist der auf die Normalspannungen bezügliche Teil des Proportionalitätsgesetzes (Hookesches Gesetz).

Durch den engen eindeutigen Zusammenhang zwischen Deformation und Spannung kennzeichnet sich die Umkehrbarkeit der Deformation, die bei Druck wohl unbeschränkt, bei Zug eine gewisse Strecke weit erhalten ist, um dann ganz ohne Übergang einer nicht umkehrbaren Platz zu machen, was, wie

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

oben erwähnt, wohl auf einen Wechsel im Aggregatzustand zurückzuführen sein dürfte.

Anders ist es jedoch mit den durch Verschiebung von Molekülen senkrecht auf ihre Zentrale entstehenden Spannungen, also den Scherkräften. Es ist da nicht so leicht, ein Bild zu verschaffen. Wenn darum im folgenden der Versuch dazu gemacht werden soll, so geschieht das nur deshalb, um einen möglichen Zusammenhang zwischen den Scherspannungen und den früher besprochenen zu beleuchten.

Nehmen wir eine Gleitfläche her, so stehen einem Molekül diesseits derselben, eine ganze Menge jenseits gegenüber, mit denen es je nach der Zentraldistanz, wie oben erwähnt, durch Zug- oder Druckkräfte verbunden ist. Fällen wir von dem Moleküle eine Normale auf die Gleitfläche, so werden diese Kräfte annähernd symmetrisch um diese verteilt sein, solange noch kein Gleiten eingetreten ist. Dann wirkt aber auch noch keine Spannung entlang der Fläche. Wie aber eine Verschiebung stattfindet, wird die Symmetrie gestört, die Verbindungen zurück werden verlängert, die Zugspannungen dadurch erhöht, die betroffenen Moleküle selbst aus ihrer Lage etwas mitgenommen; gegen voraus sind aber nicht entsprechend viel neue Zugverbindungen angeknüpft worden. Eben in diesem teilweisen Mitgehen der schon vorhandenen Verbindungen liegt der Grund des Asymmetrischwerdens der Kraftverteilung. Die Folge der Asymmetrie ist eine Kraft, die in der Fläche der Bewegung entgegenwirkt. Hört die äußere, die Verschiebung erzwingende Kraft auf, so wird die Bewegung in verkehrtem Sinne vor sich gehen, bis wieder die symmetrische Verteilung erreicht ist. Diese Deformation wäre also umkehrbar.

Geht sie jedoch weiter, so wird der Zustand eintreten, daß die Entfernung nach den am weitesten zurückliegenden Molekülen zu groß wird, die Verbindungen werden reißen, die Moleküle werden frei, und da sie vorher aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt waren, werden sie mit Beschleunigung in dieselbe zurückkehren, wo sie dann eine schwingende Bewegung ausführen, Wärmeschwingung. Läßt jetzt die äußere Kraft nach, so wird wieder eine rückkehrende Bewegung des einen Teiles eintreten, bis die Spannungsverteilung zwischen den Molekülen eine symmetrische ist; doch da jetzt eine

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Anzahl der rückwärtigen Verbindungen fehlen, wird dieser symmetrische Zustand schon früher erreicht sein. Dann besteht keine Scherspannung mehr, aber doch ist eine Deformation gegenüber dem Ausgangszustand vorhanden. Es gibt also dann keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Deformation und Spannung.

Nach Beendigung dieses Vorganges sollte der gegenseitige Zustand wieder ein dem Ausgangszustand ähnlicher sein. Aber schon der Umstand, daß nachher die Festigkeitsverhältnisse oft durchwegs andere sind, zeigt, daß dies sehr oft nicht so der Fall ist. Es spielen eben neben den hier skizzierten Vorgängen meist noch eine Menge anderer mit, die die innere Reibung zur Funktion verschiedener veränderlicher machen. Wenn wir die auf *induktivem* Wege *gewonnenen* Resultate über diese Abhängigkeiten betrachten, so müssen wir aber auch die Methode der Untersuchung einer Kritik unterziehen. Es wurde meist mit Druck- oder Zugversuchen gearbeitet. Die an der Festigkeitsmaschine gewonnenen Werte sind aber meist die Maße sehr komplexer Erscheinungen, aus denen die innere Reibung erst errechnet werden muß. Dies geschieht unter Annahme einer bestimmten Lage der Gleitflächen (vergleiche Ludwik, Elemente der technologischen Mechanik). Ist man nun sicher, daß nur eine einzige Gleitfläche auftritt, so ist dieser Vorgang unbedingt richtig. (Es ist das dann der Fall, wenn die Reibung im Verlauf des Vorganges abnimmt.) Tritt aber das Gegenteil ein, Erhöhung der inneren Reibung, so sind regelmäßig nicht bloß eine, sondern eine ganze Anzahl Gleitflächen an der Bewegung beteiligt, die nacheinander mit dem Gleiten einsetzen. Das Resultat wird dann immer die Festigkeit der jeweils schwächsten ergeben, daher wird das Ansteigen der Reibung zu langsam dargestellt werden. Eine Kontrolle wäre auf die Weise möglich, daß man Körper von verschiedener Dicke, die gleiche Gleitflächen haben (eine Methode, dies zu erreichen, soll später skizziert werden), prüft. Der Wert, dem sich die Resultate für die Dicke Null annähern, dürfte der Richtigkeit am nächsten kommen.

Eine Abhängigkeit ist die von der schon stattgefundenen Deformation, und zwar verhalten sich die Körper da sehr verschieden. Die einen, zum Beispiel manche Metalle, vergrößern ihre innere Reibung bei gewöhnlicher Temperatur

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

unter allen Umständen. (Vergleiche die zitierte Arbeit von Ludwik, ferner zum Beispiel Martens Heyn, Materialienkunde II A.) Es sind das die unter dem Begriff des Kaltreckens bekannten Erscheinungen. Andere hinwiederum zeigen unter gewöhnlichen Umständen ein Sinken der inneren Reibung mit der Deformation; sorgt man aber dafür, daß ein ausreichender Normaldruck auf die Gleitfläche entfällt, so tritt auch die Erhöhung der inneren Reibung ein. Das ist wohl das Verhalten der Gesteine. (Siese Karman, Z. d. V. Deutsch. Ing. 1911, S. 424 ff.)

Dieses Anwachsen der inneren Reibung mit der Deformation ist für die Gleichgewichtsbetrachtungen während der Deformation wichtig.

Dieses Anwachsen ist schwer verständlich, wenn man den Körper als etwas Homogenes betrachtet, da beim Gleiten immer ähnliche Lagen der Moleküle gegeneinander zustande kommen müßten.

Es muß mit der Deformation eine innerliche Umwandlung im Körper vor sich gehen. Karman hat in der angeführten Arbeit gezeigt, daß der Aufbau des Körpers aus einzelnen Kristallen die Grundlage für diese Erscheinung bildet. Er konnte bei seinen Versuchen verschiedene Typen der Deformation unterscheiden, die er intergranuläre und intragranuläre benennt. Bei der ersteren spielen sich die Gleitungen zwischen den einzelnen Kristallen, die keine Deformation erleiden, ab. Es ist das mit einer Zermahlung der randlichen Partien der Körner verbunden, Mörtelstruktur. Sie ist in der Regel mit einer Erniedrigung der inneren Reibung im Verlauf der Deformation verbunden und endet gewöhnlich mit vollständiger Zusammenhanglosigkeit. Nun fand Karman, daß bei erhöhtem Normaldruck die Art der Deformation einer anderen Platz macht, bei der die Bewegung nicht zwischen den einzelnen Kristallen, sondern in ihrem Innern sich abspielt. (Intragranuläre Deformation.) Sie ist unter normalen Umständen mit einer Erhöhung der inneren Reibung verbunden. Diese Erscheinung war auf dem Gebiete der Metallurgie schon länger bekannt, es ist das sogenannte Kaltrecken (vgl. Martens-Heyn, Materialienkunde II A).

Während dieses bei Gesteinen nur unter hohen Normaldrücken auf die Gleitfläche auftritt, ist der Zusammenhang

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

der einzelnen Kristalle bei den Metallen schon an und für sich so stark, daß Deformationen lieber im Inneren der Kristalle auftreten als an deren Grenzfläche.

Zur Erklärung der Erscheinung des Kaltreckens nimmt Karman an, daß die einzelnen Kristalle nur eine beschränkte Anzahl Gleitrichtungen besitzen, ferner muß man etwa noch annehmen, daß die Förderweite einer einzelnen Gleitfläche etwa durch die Umgrenzung des Kristalls beschränkt sei. Zunächst würden nun die für die Bewegung am günstigsten liegenden Gleitflächen herangezogen; wenn diese dann verbraucht wären, die minder günstigen und so weiter, es würde dadurch der Widerstand gegen weitere Deformation immer mehr wachsen.

Es wäre wichtig, zur Kontrolle zu untersuchen, ob in einem homogenen Material, zum Beispiel Glas, keine derartige Kaltreckerscheinung stattfinden kann. Im allgemeinen kann man sagen, daß das Kaltrecken mit Deformation der Kristalle zusammenhängt, umgekehrt auch aus der Art der Deformation auf Erhöhung der Reibung durch dieselbe schließen. Kriterien dafür wären also Fehlen intergranulärer Bewegungen, Mörtelkränze usw., innere Deformation der Individuen (undulöse Auslöschung), gestreckte Form der Individuen. (Lagenquarze Sanders.)

Es ist noch die Frage, ob sich die Reibung in diesem Falle einem Grenzwert nähert oder nicht. Anzunehmen wäre wohl das erstere, da in dem Falle, wenn alle Gleitflächen verbraucht sind, ein weiteres Anwachsen kaum mehr zu erwarten ist. Doch zeigen die Diagramme Karmans eher ein Annähern an ein konstantes Anwachsen.

Es ist aber diese Erscheinung des Kaltreckens, wie schon im Namen liegt, an eine Temperaturbestimmung geknüpft. Die Technologie unterscheidet neben ihm ein Warmrecken bei höheren Temperaturen. Es zeigt sich nämlich, daß die einzelnen deformierten Kristallindividuen das Bestreben haben, eine Gleichgewichtsform wieder zurückzugewinnen. Dieses geht bei höheren Temperaturen rascher vor sich als bei niederen. Wenn man daher ein kaltgerecktes Metall hohen Temperaturen aussetzt, insbesondere, wenn auf dem Anstieg Umwandlungspunkte überschritten werden, wie es zum Beispiel beim Eisen der Fall ist, so zerfallen die früher langgestreckten,

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

innerlich gestörten Kristalle in eine ganze Reihe neuer Individuen, die innerlich in Ordnung sind und die ihrem Material entsprechende angenäherte Umrißform besitzen. (Siehe Martens-Heyn, Materialienkunde II A.) Dieser Vorgang des Kaltreckens und nachfolgenden Glühens wird in der Technologie zur Verkleinerung der Gefügeelemente benützt. Es sei erwähnt, daß durch langdauerndes Glühen sich die Größe der einzelnen Elemente wieder vergrößert, eine ähnliche Erscheinung wie das Anwachsen des Gletscherkornes.

Mit dieser Rückbildung der Kristallform ist auch der Verlust der durch das Kaltrecken erworbenen Eigenschaften verbunden.

Wenn ich nun einen Körper bei einer solchen Temperatur deformiere, daß die Rückbildungsgeschwindigkeit gleich oder größer ist, als die Deformationsgeschwindigkeit, so wird es zu einer inneren Störung überhaupt nicht mehr kommen, es wird daher auch kein Anwachsen der inneren Reibung mit der Deformation zu erkennen sein. Dies ist zum Beispiel beim Warmschmieden der Fall.

Die Temperatur, bei der dieses Rückbilden in größerem Maße erfolgt, hängt sehr weit vom Materiale ab, so daß es Metalle gibt, zum Beispiel Blei, bei welchem die Umbildungstemperatur unter der gewöhnlichen liegt, es gibt also für dieses Metall kein Kaltrecken.

Es liegt nahe, diese Verhältnisse auch auf die Petrographie anzuwenden. Ein Großteil der Erscheinungen, die wir als Kristalloblastese annahmen, als die Neubildung der Individuen unter ruhendem Druck bei entsprechender Temperatur, dürfte auf obige Weise zustande gekommen sein, also bei erheblicherer Durchbewegung. Sie wären also Tektonite, die aber als solche nur schwer mehr erkennbar sind. Doch gibt es immerhin manchmal Möglichkeiten, sie als solche anzusprechen, wenn man zum Beispiel findet, daß in Linsen oder bandförmigen Lagen von fast isometrisch ausgebildetem Quarz die einzelnen Individuen noch eine subparallele Lage innehaben. Es wären diese drei Bewegungsprinzipien eine gute Grundlage zur Systematik der Tektonite, wenn sie nicht an der heterogenen Zusammensetzung der meisten Gesteine scheiterte. In einem Gestein kann zum Beispiel der Quarz deutliche

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Zeichen des Kaltreckens tragen, während Glimmer schon als warmgereckt erscheint.

Die innere Reibung ist ferner noch, und zwar in ganz ausgesprochener Weise, eine Funktion der Zeit, respektive der Geschwindigkeit der Deformation. Bei Flüssigkeiten ist dies schon lange bekannt, man setzt dort gewöhnlich die innere Reibung idealer Flüssigkeiten proportional der Relativgeschwindigkeit der gleitenden Teile. Damit ist auch ausgesprochen, daß diese für die Ruhe gleich Null ist. Dieses Verhalten ist schwer nach unserem oben angeführten Bilde zu erklären, man müßte annehmen, daß die rückwärtigen, fast bis zum Zerreißen angespannten Zugverbindungen mit längerer Dauer dieses Zustandes doch zum Reißen kommen. Vielleicht läßt sich dieses auf folgende Weise erläutern: Wie oben angenommen, bestehen die Molekularkräfte aus einer anziehenden, konstanten Kraft und aus einer dem Stoß der Wärmeschwingungen entsprechenden abstoßenden. Wir werden letztere auch als konstant, dem Mittelwerte entsprechend einführen, müssen uns aber bewußt werden, daß die Wärmeschwingung eine allgemeine, die Impulse daher wechselnde sein werden. Je länger also der Zustand des Angespanntseins währen wird, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit sein, daß eine besonders starke Schwingung die Kette sprengt. Wenn das so ist, dann ist auch zu erwarten, daß bei einem gewöhnlichen Zugversuch die Festigkeit mit der Zeit abnimmt.

Wenn dies für ein einziges Molekülpaar vielleicht auch nicht sehr lange Zeit erfordert, so ist doch zu bedenken, daß bei einem Gleitvorgang eine außerordentlich große Molekulanzahl beteiligt ist, daß viele Verbindungen erst durch das Reißen anderer an die Grenze gelangen, so daß doch erst in größerer Zeit eine Wirkung zu vernehmen ist. (Relaxation Maxwells.)

Dieser Einfluß der Zeit ist in zweierlei Weise erkennbar (vgl. Ludwik, Elemente der Technologischen Mechanik), erstens in einer Herabsetzung der Reibung bei geringer Deformationsgeschwindigkeit. Trägt man nämlich die bei sonst gleichen Bedingungen gefundenen Reibungen als Ordinaten über den zugehörigen Geschwindigkeiten als Abszissen auf, so erhält man eine Kurve, die im allgemeinen gegen die größeren Geschwindigkeiten zu ansteigt. Bei idealen Flüssigkeiten nun

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

würde diese Kurve eine Gerade sein, die durch den Nullpunkt geht.

Je weiter sich nun eine Flüssigkeit vom Begriff der idealen entfernt, desto mehr weicht diese Kurve von einer Geraden ab, nach Ludwik in Annäherung an eine logarithmische Linie. Diese Kurven gehen aber bei Flüssigkeiten immer noch durch den Ursprung. Gehen wir von diesen zähen Flüssigkeiten nun zu festen Körpern über, so bleibt die Funktion immer noch die einer der logarithmischen Linie ähnliche, scheint aber nicht mehr durch den Nullpunkt zu gehen; feste Körper scheinen also eine ausgesprochene Reibung der Ruhe zu haben.

Dieses Ansteigen der Reibung mit der Geschwindigkeit berechtigt einen anzunehmen, daß bei plastischen Deformationen sich mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand zwischen äußeren und inneren Kräften einstellt, was später von Wichtigkeit sein wird.

Eine zweite Erscheinungsform der Abhängigkeit der inneren Reibung von der Zeit ist das sogenannte Nachfließen. Setze ich nämlich einen Körper einer raschen Deformation aus, so wird der elastische Anteil der Deformation relativ sehr groß sein. Halte ich den Körper nun längere Zeit auf diesem Standpunkt, so wird auch dieser Anteil nach obigem langsam durch Lösung überspannter Verbindungen in plastische übergehen, was mit einem Sinken der Spannung verbunden ist. (Bekannt ist zum Beispiel das Schlaffwerden lange angespannter Federn.) Es ist klar, daß Spannungen, die unter der Reibung der Ruhe liegen, keine Fähigkeit mehr haben, durch Umwandlung ihrer Deformation in eine plastische abzuklingen. Aber es zeigen umgekehrt gerade plastische Deformationen, die auf relativ ganz kleine Scherkräfte erfolgten, an, daß bei Gesteinen die Reibung der Ruhe sehr tief liegen kann. So erwähnt van Hise das plastische Durchbiegen von Gruftplatten.

Auf dieses Plastischwerden der Deformationen wirkt natürlich alles ein, was das Zerreißen von Verbindungen begünstigt, insbesondere Erhöhung der Temperatur.

Da wir in der Geologie seit den einzelnen tektonischen Vorgängen schon genugsam Zeit als verflossen annehmen können, so werden schon die meisten Schiebungen in plastische übergegangen sein. Da wir nur die letzteren beobachten

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

können, so sehen wir, daß auch wegen ihrer Fähigkeit, selbst bei geringen Intensitäten, zur Erkenntnis zu kommen, die Gleitungen für die Tektonik sehr wichtig sind.

Die innere Reibung ist ferner noch von dem Normaldruck auf die betreffende Scherfläche abhängig. Dieser ist im allgemeinen auch auf der Fläche der größten Scherspannungen nicht gleich Null. Es zeigt sich nun, daß mit wachsendem Normaldruck auch die innere Reibung steigt, und zwar ist der Zusammenhang zwischen beiden im allgemeinen kein linearer. Karman hat (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure) für Marmor und Sandstein unter Drucken, die geologischen ziemlich nahe kommen dürften, Teile dieser Kurven erhalten; es zeigt sich, daß diese einen parabelförmigen Verlauf haben, auf der Druckseite offen sind, während auf der Zugseite die Kurve als die Abszissenachse senkrecht durchschneidend angenommen wird. (Es frägt sich, was dieser Punkt auf der Abszissenachse zu bedeuten hat. Er sagt, daß ein Körper, der diesem allseitigen Zug ausgesetzt wird, an Gleitung zugrunde geht. Nun ist darin eine Unmöglichkeit enthalten, da es bei allseitig gleicher Beanspruchung ein Gleiten überhaupt nicht gibt. Es könnte ferner vielleicht angenommen werden, daß dieser Punkt dem Zerreißen unter hydrostatischem Zug entspricht. Doch ist bei dem generellen Unterschied zwischen Zug und Gleitung unwahrscheinlich, daß in der Funktion auch dieser Fall enthalten ist.)

Wir haben in dem oben gegebenen Bilde wohl angenommen, daß ein genetischer Zusammenhang zwischen Normal- und Scherspannungen vorhanden sei, insofern erstere in der Resultierenden parallel gerichteter, letztere in einer Resultierenden konvergierender axial zwischen Molekülen wirkender Kräfte bestünden. Es wäre aber zu schwierig, hier einen quantitativen Zusammenhang zwischen den Festigkeiten der einen und der anderen Art suchen zu wollen, da dieser wegen der verschiedenen Molekülanordnungen bei verschiedenen Materialien sehr verschieden ausfallen wird. Deshalb, und weil die energetischen Verhältnisse beider Beanspruchungsarten derart verschieden sind, wurden sie hier so streng getrennt behandelt.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Wir teilen nach dem Verhältnis zwischen der Zug- und der Gleitfestigkeit die Körper in zwei Kategorien, in spröde und geschmeidige ein.

Bei einer allgemeinen Beanspruchung wird nämlich immer neben Druck und Scherung auch Zug vorhanden sein. Die Art, wie er sich plastisch deformiert, hängt nun unter anderem auch davon ab, welche der beiden Festigkeiten früher überschritten wird. Liegt nun die Zugfestigkeit des Körpers gegenüber der Scherfestigkeit tief, dann wird eine Trennung durch Zerreißen wahrscheinlich sein. Im anderen Falle wird die plastische Deformation durch Gleiten vor sich gehen, das in der Regel nicht mit erheblichen Festigkeitsveränderungen oder Trennungen verbunden ist. Erstere Körper nennt man spröd, letztere geschmeidig. Es hängt das also vom Begriff der Festigkeitsgrenzen ab. Nun haben wir oben gesehen, daß man von einer Festigkeit gegenüber Gleitung schwer reden kann, da diese in weitem Maße veränderlich ist. Man wird sich daher oft in die Lage versetzt sehen, einen Körper je nach den Umständen, zum Beispiel Geschwindigkeit der Deformation, zu der einen oder der anderen Gruppe versetzen zu müssen. Am augenfälligsten ist dies bei einer Reihe von zähen Flüssigkeiten, zum Beispiel Harz, Glas usw. der Fall, die auf rasche Deformationen mit schönen, muschelig ausgebildeten Zugrissen reagieren, während sie langsamen Deformationen durch Gleiten nachgeben. Sie verhalten sich gegen stoßende Beanspruchung als spröde, langsam aufgebrachter gegenüber als geschmeidig. Ähnliche Fälle gibt es aber auch in großer Zahl unter den kristallinischen Körpern, es sei nur auf das Eis verwiesen.

Spannungsverteilung im Körper.

Bis jetzt haben wir die Spannungsverteilung an einem Körperdifferential allein betrachtet, und haben eine Reihe von Beziehungen zwischen Richtung und Spannung erkannt. Gehen wir von diesem Teilchen auf ein benachbartes über, so werden wir sehen, daß der Spannungszustand sich hier nach Richtung und Größe geändert hat. Um nun die Bewegungserscheinungen im ganzen Körper studieren zu können, müssen wir auch die Gesetze der Spannungsverteilung über den ganzen Körper untersuchen.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Die Anordnung der Spannungsverhältnisse über den ganzen Körper hängt einmal von den äußeren Kräften ab. Nun ist diese Abhängigkeit aber keineswegs ausreichend, um den Spannungszustand eindeutig zu beschreiben. Dies sieht man schon aus folgendem: Lege ich durch einen irgendwie beanspruchten Körper einen Schnitt, so zerschneide ich dadurch eine große Reihe Kräfte, die vorher den an einem der beiden Teile angreifenden äußeren Kräften das Gleichgewicht gehalten haben. Den Einfluß der äußeren Kräfte kann ich für einen bestimmten Punkt, zum Beispiel in der Schnittfläche, durch eine resultierende Kraft und ein resultierendes Drehmoment beschreiben. Einen gleichen entgegengesetzten Einfluß müssen auch die inneren Kräfte aufweisen, damit die Forderung des Gleichgewichtes befriedigt wird. Nun kann ich mir die inneren Kräfte in unendlich viel Modifikationen so angebracht denken, daß das geforderte Moment und die geforderte Einzelkraft aufgebracht wird; es ist daher die Kenntnis der äußeren Kräfte nicht genügend, um den Spannungszustand eines Körpers eindeutig zu beschreiben. Am deutlichsten ist das zum Beispiel an der Berechnungsmethode der gebogenen Balken zu ersehen. Dort hat der Querschnitt neben einer meist als Scherkraft auftretenden Einzelkraft noch ein biegendes Moment aufzubringen. Um nun die Verteilung der Spannungen über den Schnitt ermitteln zu können, muß man die für die meisten Fälle plausible Annahme machen, daß die einzelnen Querschnitte nach der Biegung eben bleiben, ferner, daß die Spannungen der Längenänderung proportional sind. Es sind also Bestimmungen der Deformation, die noch herangezogen werden. Diese sind nun zwar wieder Funktionen der äußeren Kräfte, aber erstens weiß man meist nicht welche, ohne daß man die Spannungen kennt, man bewegt sich da in einem Kreise; anderseits sind diese Funktionen nicht einmal eindeutig, wie man am besten aus dem Beispiel der Knickung ersehen kann. Wenn ein Stab axial auf Druck beansprucht wird, so sind zwei Fälle möglich: Nehmen wir als Bezugspunkt den Schwerpunkt der Fläche an. Erstens der Schwerpunkt bleibt in der Kraftrichtung, dann haben die äußeren Kräfte kein Moment, auch die inneren brauchen keines zu haben, die Einzelkraft muß durch über die ganze Schnittfläche verstreute Normalkräfte aufgebracht werden. Annahme: Querschnitte bleiben eben, Einzel-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

kräfte gleichmäßig über die Fläche verteilt, ob mit Recht, ist natürlich die Frage.

Zweitens, der Schwerpunkt bleibt nicht in der Kraftrichtung, die äußeren Kräfte haben ein biegendes Moment in bezug auf ihn, auch die inneren müssen das gleiche aufbringen, außerdem noch die der Resultierenden entsprechenden Druckkräfte, also ein dem vorhergehenden durchaus unähnlicher Spannungszustand. Beide Spannungszustände sind möglich, es läßt sich allerdings mit Einführung neuer Gleichungen aussagen, daß der eine oder der andere wahrscheinlicher ist, doch ist gerade für die Tektonik dieser Weg kaum betretbar, da es dabei immer auf die elastischen Teile der Deformationen ankommt, die dem Geologen unbekannt sind, weshalb er bei jedem Versuch mathematisch ein Problem zu erforschen, an chronischem Gleichungsmangel leidet.

Ein Sonderfall dieser Knickung ist der von Smoluchowski eingehend behandelte, der in der Geologie außerordentlich oft auftritt, der Fall einer Platte, die in ihrer Ebene zusammengepreßt wird und gleichzeitig in einem elastischen Medium eingebettet ist. Die Platte wird ähnlich wie früher ausgebogen; in diesem Augenblick erfährt sie aber auch von ihrer Einbettung Drücke, die sie wieder in die ebene Lage zurückzubringen suchen. Smoluchowski konnte dartun, daß unter solchen Verhältnissen die Achse der Platte in der Sinuslinie eine Gleichgewichtsform findet, und zwar konnte er die Grenze der Pressung von der an dies stattfindet, die Länge der einzelnen Wellen usw. in Abhängigkeit von den Größen der Platte, des Materials, der Einbettung usw. darstellen. (Siehe Smoluchowski, Bull. d. l. ac. sc. Cracovie 1909.) Ist nun die elastische Deformation der Platte eine periodische, so sind es auch die Spannungen in derselben, es werden auch die plastischen Deformationen periodische sein. Nun finden wir gerade in der Geologie außerordentlich häufig Deformationen, die sich im Raum periodisch wiederholen, man denke nur an die vielfachen Falten- oder Schuppenwiederholungen. Für diese bildet gerade die Kenntnis dieser Knickvorgänge eine befriedigende Erklärung. (W. Schmidt, Verhandlungen der k. k. Geol. Reichs-Anst. 1914. 11.)

Wenn wir die Spannungsverteilungen innerhalb eines Körpers auch nur selten in direkten Zusammenhang mit den

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

äußeren Kräften bringen können, so können wir doch allgemeine Gesetze über die Form dieser Spannungsverteilung bringen, ähnlich wie wir es für die Spannungen an einem Körperelement getan haben.

Die Darstellung dieses allgemeinen Spannungszustandes ist ziemlich schwierig, da wir ihn für jeden Punkt geben müssen, also etwa für jeden Punkt die Richtung der drei Hauptspannungen und ihre Größe. Für die Geologie wird die Sache dadurch einfacher, als wir über die Größe nur relative Angaben machen können, diese Hauptspannung sei Druck, jene Zug, oder diese sei größer, jene kleiner. Leichter glauben wir in der Geologie die Richtungen der Hauptkräfte erkennen zu können. Deshalb empfiehlt sich gerade bei unserer Betrachtung die Verwendung der „Trajektorien" als Darstellungsform. Denkt man für jeden Punkt des Körpers die Richtungen der Hauptkräfte eingetragen, so kann man sich Linienscharen gezogen denken, die an jedem Punkte die Richtungen der dort herrschenden Hauptkräfte haben. Da es an jedem Punkte drei Hauptkräfte gibt, sind drei solcher Scharen möglich. Es werden diese Trajektorien räumliche Kurven sein, die sich immer unter rechten Winkeln schneiden. (Gewöhnlich werden sie aber mit einiger Vernachlässigung als ebene Kurven aufgefaßt und daher mit Vernachlässigung einer Schar in einer Ebene dargestellt.) Die Richtung dieser Kurven wird immer bestimmt sein, außer in einem Fall, wenn nämlich der Spannungszustand ein hydrostatischer ist; dies gilt auch für zwei dieser Hauptspannungen, wenn diese einander gleich sind, so ist in ihrer Ebene an dieser Stelle die Richtung der Trajektorien unbestimmt.

Bei den einfachen Verhältnissen, wie man sie in der Technik meistens zu behandeln hat, werden nach der Art des Angreifens der äußeren Kräfte eine Anzahl Beanspruchungstypen unterschieden, so axialer Druck oder Zug, Biegung, Torsion und die daraus zusammengesetzten Beanspruchungen. Es liegt nahe, diese Typen auch hier anzuwenden. Der Axialbeanspruchung entspricht eine Anordnung der Trajektorien derart, daß die durch einen beliebigen Schnitt getroffenen Kräfte kein Drehmoment ergeben. Der einfachste Fall ist der des homogenen Kraftfeldes, die Trajektorien sind durch den ganzen Körper hindurch gleichgerichtet, die Kräfte der

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

selben Richtung sind überall gleich groß. (Es ist besonders in der Geologie bei der Betrachtung kleinerer Verhältnisse, so Texturen usw., angängig, die in Betracht kommenden Kraftfelder als homogene anzusehen.)

Es ist aber auch der Fall möglich, daß die durch den Schnitt bloßgelegten Kräfte wohl in ihrer Gesamtheit kein Moment geben, aber doch nicht den Bedingungen des homogenen Kraftfeldes entsprechen. Dann kann man immer auf der Fläche des Schnittes Gebiete abgrenzen, in denen Momente erzeugt werden, die sich aber gegenseitig aufheben. Dieser Fall dürfte z. B. bei den Zerreißversuchen von Gesteinen auftreten. Dort werden wegen der Art der Einspannung der Probekörper die Randpartien stärker gezogen als die Kernpartien, das Ganze ist aber bilateral symmetrisch, kann also als Ganzes kein Moment ergeben.

In der Geologie ist es nun schwer, die Grenzen eines Körpers strikte anzugeben, bis wohin der Schnitt eigentlich geführt werden muß. Deshalb finden sich diese Fälle meist unter die folgenden eingereiht, wo also der Körper enger begrenzt ist.

Andere einfache Schnitte sind die, in denen sich die an der einen Seite des Schnittes angreifenden Kräfte zu einem Drehmoment zusammensetzen lassen, und zwar kann dieses Drehmoment entweder senkrecht zur Schnittfläche stehen, reine Biegung, oder in ihr liegen, reine Torsion. Bei letzterer würden die Trajektorien eine Schraubenform besitzen. Sie dürfte aber wohl für die Geologie am wenigsten Bedeutung haben.

Natürlich können jetzt neben diesen reinen Typen noch Kombinationen vorkommen: Die Kräfte am Schnitt sind zum Beispiel zu einem auf dem Schnitt normal stehenden Drehmoment und einer Einzelkraft zusammensetzbar, Druck und Biegung usw. bis zu den kompliziertesten Fällen.

Der Fall der Biegung muß noch auf die Form der Trajektorien hin besprochen werden.

Es ist vielleicht am besten, wenn man ihren Verlauf an einfachen technischen Beispielen darstellt, so an dem eines der Biegung unterworfenen Balkens. In ihm können wir einen gezogenen von einem gedrückten unterscheiden, die voneinander durch die sogenannte neutrale Faser getrennt werden. In den beiden Randpartien sind die Trajektorien einander sub-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

parallel orientiert, doch haben die der Lage einander entsprechenden entgegengesetztes Vorzeichen. So ist auf der Zugseite die der Begrenzung parallele eine Zugkraft, auf der Druckseite eine Druckkraft. Zwischen diesen beiden Zuständen muß in den mittleren Teilen ein stetiger Übergang vorhanden sein. Dieser kann nun in zweierlei Art und Weise erfolgen. Die eine Art ist die, die zum Beispiel an einem eingemauerten Balken auftritt, allgemeiner an einem Objekt, bei dem die Größe des biegenden Momentes entlang der neutralen Faser sich ändert. Dort erleiden die einzelnen Trajektorien in ihrem Verlauf eine Ablenkung gegen die neutrale Faser zu unter stetiger Abnahme ihres Absolutwertes, durchschneiden sie unter 45^0, treten auf die andere Seite hinüber und bilden dort die zweite auf den dort herrschenden absolut größten Hauptspannungen normal stehende Trajektorienschar, enden dann normal auf die Außenbegrenzung. In der neutralen Faser sind beide Trajektorienscharen immer gleich groß, aber von verschiedenem Vorzeichen. (Der Zustand ist also dort der der reinen Scherbeanspruchung.)

Die andere Form ist gegeben durch das Beispiel einer Waggonachse zwischen den Rädern, wo also das biegende Moment für die in Betracht zu ziehende Strecke konstant ist. (Durch zwei Kräftepaare beansprucht.)

Dort sind die Trajektorien überall einander parallel, der Übergang von der Druck- zur Zugseite erfolgt nicht durch Krümmung, Richtungsänderung derselben, sondern durch Änderung ihrer Intensität. Die parallel der neutralen Faser verlaufenden Zugtrajektionen der einen Seite nehmen an absolutem Wert gegen diese zu immer mehr ab, in ihr sind sie gleich Null, um jenseits derselben in gleicher Richtung als Druckspannungen wieder aufzutreten. Hier ist also die neutrale Faser wirklich spannungsfrei.

Dieser Fall ist an und für sich in der Geologie nicht sehr häufig, häufiger dürfte aber der sein, welcher sich ergibt, wenn sich über eine der Gebirgsbildung angehörige Biegung ein aus dem Gesteinsgewicht stammender allseitiger Druck lagert. An der Richtung der Trajektorien wird dadurch nichts geändert, wohl aber an deren Intensität, so daß zum Beispiel ein Zug direkt fehlen kann. Die frühere neutrale Faser ist jetzt nicht mehr spannungsfrei, doch ist der Spannungszustand

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

dort ein hydrostatischer. Ist der darübergelagerte Spannungszustand kein hydrostatischer, aber homogen, so können die Trajektorien sowohl der Größe als auch der Richtung nach von dem obigen Typus abweichen; damit wird auch die neutrale Faser, wenn man sie noch so nennen darf, aus ihrer Lage verschoben. Wenn aber der darüber gelagerte Spannungszustand nicht größer als von gleicher Größenordnung ist, wie der extreme durch die Biegung erzeugte, so wird sich doch im Körper eine Zone finden, in der hydrostatische Spannung herrscht.

Dieses Auftreten von plattenförmigen Räumen, wenn wir das ins Räumliche übertragen, mit hydrostatischem Spannungszustand, hat für das folgende Bedeutung. Da wegen des Mangels an Scherspannungen dort keine Gleitflächen auftreten, dürften sie für diese Art der Deformation unüberschreitbare Grenzen darstellen.

Es sei nochmals gesagt, daß, wenn wir diese Fälle Biegung benennen, es nur auf Grund der analogen Form des Trajektorienverlaufes geschieht, daß die Art, wie diese Beanspruchung von den äußeren Kräften hervorgerufen wird, sehr von unseren herkömmlichen Vorstellungen von Biegung abweichen kann.

Solche Fälle dürften aber sehr oft vorkommen, immer dort, wo in zwei benachbarten Räumen mit subparallelem Trajektorienverlauf ein Wechsel in der relativen Größe der beiden Scharen vorkommt. Ein klassisches Beispiel hiefür ist die Hypothese vom level of no strain, der Grenze zwischen einem Raum, wo die horizontale Trajektorie ein Maximum und einem, wo sie ein Minimum darstellt.

Spannungszustand und plastische Deformation.

Wir haben die Verteilung der Spannungen in einem Körper, an dem äußere sich das Gleichgewicht haltende Kräfte angreifen, kennen gelernt, sahen, daß diese an einem Körperelement gewissen Gesetzen gehorchen, konnten auch für ihre Gesamtanordnung Typen aufstellen.

Wenn nun die äußeren Kräfte wachsen, kommen wir einmal an eine Grenze, wo die inneren Kräfte nicht mehr genug wachsen können, um das Gleichgewicht aufrecht zu erhalten, es tritt bleibende Deformation ein.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Nach dem oben Gesagten können nun diese bleibenden Deformationen entweder durch Zerreißen oder durch Gleiten vor sich gehen. Für die Zwecke der Geologie kommen aber Zugkräfte kaum in Betracht, außer für die obersten Schichten der Erdkruste, da wir doch jedem tektonischen Spannungszustand einen dem Gewicht der Gesteine entstammenden hydrostatischen übergelagert haben. Deshalb finden wir in der Natur auch so selten mit obigen Ausnahmen die so charakteristischen Zerreißungsklüfte. Es sind also besonders Gleitungen, welche die Deformationen der Geologie hervorrufen und unsere nächste Aufgabe wird es sein, die Gesetze kennen zu lernen, nach welchen diese in einem beanspruchten Körper auftreten. Die herrschenden Anschauungen hierüber haben als Basis die Vorstellung über die Spannungsverteilung am Körperelement. Wir fanden, daß die Scherkräfte in den verschiedenen durch dasselbe gelegten Ebenen verschiedene Werte haben, von Null in den Hauptebenen bis zu einem maximalen Werte in Ebenen, welche durch die mittlere Hauptspannung gehen und mit dem extremen Winkel von 45^0 einschließen, ferner, daß zwei zu den Hauptspannungen symmetrische Ebenen gleiche Scherspannung besitzen.

Das Auftreten von Gleitungen soll nun nach den jetzt herrschenden Ansichten im wesentlichen von der Größe der Scherspannungen abhängen, dann noch in irgendeiner Funktion, die noch nicht bekannt ist, von der Größe der zugehörigen Normalspannung, so daß im wesentlichen die in der Nähe der Flächen maximaler Scherspannung gelegenen Ebenen, also solche aus der Schar derer, die durch die mittlere Hauptspannung gehen, als Gleitflächen in Betracht kommen. (Eine Übersicht über diese Theorien siehe Karman, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1911.)

Damit ist auch bei der Symmetrie der Scherspannungen ausgesprochen, daß immer zwei Gleitflächen zur Entwicklung kommen, die miteinander Winkel von angenähert 90^0 bilden.

Die Untersuchungen an der Festigkeitsmaschine scheinen diese Anschauungen zu bestätigen, wir erhalten bei der gebräuchlichen Form der Probekörper wirklich Gleitflächen der verlangten Lage und Symmetrie.

Untersuchen wir aber andere Deformationen, so erhalten wir ein wesentlich anderes Bild. Die Symmetrie der Gleit-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

flächen fehlt, sehr oft ist nur eine vorhanden; wenn aber wirklich einmal zwei annähernd gleichwertige auftreten, so ist doch der Winkel zwischen beiden fast durchwegs ein anderer als ihn die oben gemachten Schlüsse verlangen. Auch der dann gemachte Einwurf, daß die Gleitflächen durch die Deformation selbst eine derartige Drehung erfahren haben, trifft in den meisten Fällen nicht das Richtige, da diese Verdrehungen meist andere sein müßten, als sich aus der allgemeinen Dimensionsänderung erschließen läßt.

Die Fälle hierüber sind so häufig, daß wir die Asymmetrie der Gleitflächen direkt als Regel aufstellen können.

In der Technologie finden wir sie fast überall bestätigt, wo deutliche Gleitflächen auftreten, sehr schön zum Beispiel an den Spänen, die durch Werkzeugmaschinen erhalten werden.

Ein anderes sehr wichtiges Beispiel ist der normale Torsionsversuch. Ein Zylinder eines geschmeidigen Materiales wird dabei durch Gleitflächen deformiert, die normal auf die Erzeugende des Zylinders stehen, also parallel der Ebene der Drehmomente. Analysieren wir nun den Spannungszustand eines Körperelementes an der Mantelfläche, so finden wir in der oben angegebenen Ebene wirklich eine maximale Scherkraft; dies bedingt nun nach den oben angegebenen Gesetzen eine gleich große in der normal dazu gelegenen, durch die Erzeugende gehenden Ebene, und im Winkel von 45^0 dazu gleich große Normalkräfte, eine Zug- und eine Druckkraft. (Es sei bemerkt, daß bei spröden Körpern die Deformation sehr oft durch diese Zugkraft hervorgerufen wird, der Stab bekommt dann einen Riß, der ein Stück einer Schraubenlinie bildet.) Von diesen beiden gleichwertigen Scherflächen kommt nun immer nur die eine oben angegebene zur Wirkung. Immerhin ist es noch eine Fläche maximaler Scherkraft. Noch krasser ist aber das folgende Beispiel, ein Fluß mit stationärer Strömung, wichtig deshalb, weil viele Probleme der Tektonik ganz ähnliche Verhältnisse aufweisen. Ist seine Geschwindigkeit eine konstante, so haben wir einen Gleichgewichtsfall. Der Spannungszustand ergibt sich dann für einen Elementarkörper durch folgende Überlegung. Eine horizontale Ebene muß eine Hauptebene darstellen, an ihr kann als an einer Niveaufläche durch Gleiten keine Arbeit geleistet werden. Eine andere Hauptebene muß dann vertikal, und zwar aus Symmetrie-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

gründen in der Flußachse liegend angenommen werden, die dritte normal zu beiden. Maximale Scherflächen würden also mit der Vertikalen einen Winkel von 45^0 einschließen. In Wirklichkeit tritt nun keine von diesen als Gleitfläche auf, sondern ein System, das mit der horizontalen Hauptebene einen außerordentlich kleinen Winkel einschließt, das nämlich parallel ist zum Grunde des Flußbettes.

Die Frage der Symmetrie ist auch für die Tektonik von Wichtigkeit, da die Frage der Berechtigung der Annahme eines einseitigen Gebirgsbaues im wesentlichen davon abhängt, ob nicht bei einer Beanspruchung zwei einander gleichwertige Gleitflächensysteme auftreten müssen, was allerdings von den Gegnern der Ansicht in die etwas unpassende Form gekleidet wurde: Druck und Gegendruck sind einander gleich. Nach den oben gegebenen Beispielen dürfte sich die Sache wohl selbst erledigen, doch bleibt immerhin eine Untersuchung noch erwünscht.

Das Abweichen der Tatsachen von den von der Theorie geforderten Verhältnissen ist schon verschiedentlich aufgefallen, insbesondere Becker bemüht sich, die beiden in Einklang zu bringen, was aber nach meiner Meinung als mißlungen zu bezeichnen ist, insoweit es mir gelungen ist, in die schwer geschriebenen Arbeiten einzudringen. Besonders ist es die Vorstellung des rotational strain, welcher das alleinige Auftreten einer einzigen deutlichen Gleitfläche erklären soll. Sie besagt, daß eigentlich doch die beiden auftreten, von denen eine aber in ihrer Lage bleibt, daher deutlich ausgeprägt wird, während die andere infolge der Änderung des Winkels zwischen beiden immer ihre Lage wechselt. Das bedingt aber eine genau gegebene Rotation des Spannungszustandes mit der halben Winkelgeschwindigkeit des Wanderns der zweiten Gleitfläche. Dies ist aber eine höchst unwahrscheinliche Annahme, da der Spannungszustand eine Folge der äußeren Kräfte ist, die für uns die Rolle der unabhängigen Variablen spielen. Ein gesetzmäßiges Wandern derselben anzunehmen, ist eine zu starke Zumutung.

Diese Versuche, die Forderung nach Symmetrie aufrecht zu halten, sind meiner Ansicht nach verfehlt, der Fehler in den ganzen Überlegungen liegt, scheint es, darin, daß immer von dem Körperelement ausgegangen wurde, ohne zu berücksichtigen,

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

daß die Gleitfläche durch den ganzen Körper durchsetzen muß. Zieht man dies in Betracht, so verschwindet diese Art von Symmetrie sofort. Denkt man sich nämlich in einem Körperpunkt die beiden gleichwertigen maximalen Scherflächen gezogen und verlängert jede der beiden so, daß sie an jedem Punkt die Lage derselben hat, zieht man also die 45^0-Trajektorien zu den Hauptspannungstrajektorien, so sieht man, daß sie einander ganz ungleichwertig sind, da sie ja, mit Ausnahme des oben genannten, verschiedene Punkte mit verschiedenen Spannungszuständen enthalten.

Und doch kann man nicht bloß von diesen, sondern von jeder Fläche, die den Körper durchschneidet, zum mindesten in einem anderen Sinne sagen, daß sie einander gleichwertig sind, jede der Flächen trennt den Körper in zwei Teile, von denen jeder im Gleichgewicht ist, wenn man sich die an der Fläche angreifenden inneren Kräfte mit angreifend denkt. An jeder dieser Flächen würde Gleiten eintreten, wenigstens für ein sehr kleines Stück, wenn an der Fläche eine noch so geringe Scherkraft dazugefügt gedacht wird. Für eine unendlich kleine Deformation sind also alle Flächen gleichwertig.

Denken wir uns die Deformation eingeleitet, nehmen wir zunächst an, daß eine der äußeren Kräfte um ein Differential wachse, letztere Annahme deshalb, damit wir die Verhältnisse noch als Gleichgewichtsfall betrachten können, so wird Deformation durch Gleiten eintreten, und zwar zunächst wahrscheinlich an allen möglichen Flächen. Hat aber diese Deformation einigermaßen bedeutendere Größen als Differentiale erlangt, so verschwindet die Gleichwertigkeit der Gleitflächen, und zwar wegen der Verlegung des Angriffspunktes der äußeren Kräfte.

Im allgemeinen ändert eine Kraft ihre Größe mit der Verschiebung ihres Angriffspunktes in der Kraftrichtung. Diese Änderung kann je nach der Ursache der Kraft nach verschiedenen Gesetzen vor sich gehen. Nach diesen können wir die Kräfte in zwei Kategorien teilen, in arbeitsfähige oder aktive und in nicht arbeitsfähige (eigentlich soll es heißen wenig arbeitsfähige) oder Reaktionskräfte. Erstere ändern ihre Größe nur wenig mit der Verlegung ihres Angriffspunktes, Beispiele dafür sind besonders die Fernkräfte, letztere sehr stark, und

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

zwar so, daß einer Verlegung des Angriffspunktes gegen die Kraftrichtung eine Steigerung der Kraft entspricht. Typische Beispiele für Reaktionskräfte sind elastische Kräfte.

Diese zwei Kategorien von Kräften sind nun nicht streng gegeneinander abgetrennt, es finden sich Übergänge, so ist die elastische Kraft einer Feder derart wenig vom Weg abhängig, daß sie vielfach in der Rolle einer aktiven Kraft verwendet wird.

Eine eigenartige Stellung nehmen dazu die Scherkräfte ein. Während sie unterhalb der Festigkeitsgrenze Reaktionskräfte darstellen, ändern sie ihren Charakter oberhalb derselben in dem Sinne, daß wenigstens gegen sie Arbeit in mehr oder weniger unbeschränktem Maße geleistet werden kann, daß sie in diesem Sinne als aktive Kräfte gelten können, wenn sie auch selbst nicht imstande sind, Arbeit zu leisten.

Im allgemeinen werden nun an einem Körper sowohl Reaktionskräfte als auch aktive Kräfte, besonders wenn weitergehende Deformationen zustande kommen sollen, angreifen, und diese Unterschiede bringen auch derartige Unterschiede in der Wertigkeit der Gleitflächen hervor, daß das Resultat meist ein asymmetrisches ist.

Denkt man sich nämlich den durch irgendeine Fläche abgetrennten Teil des Körpers mit allen daran angreifenden äußeren und inneren Kräften, läßt eine (aktive) Kraft davon um eine virtuelle Größe, wie oben gesagt, wachsen, so tritt Verschiebung an der Fläche ein, dadurch verändern sich im allgemeinen die Reaktionskräfte an dem Teil in dem Sinne, daß dem Überschuß der einen Kraft entgegengewirkt wird; in sehr vielen Fällen kann dadurch das Gleichgewicht wieder hergestellt werden, die Gleitung hört auf.

Es kann aber auch anders sein, die Fläche kann eine derartige Lage haben, daß bei der Gleitung gegen keine der Reaktionskräfte Wege zurückgelegt werden, für diese Fläche bleibt also der Kraftüberschuß erhalten, die Bewegung dauert an. Auf diese Art und Weise wird eine Auslese unter den Gleitflächen getroffen, von denen im allgemeinen nur einige wenige aktiv erhalten werden, je mehr der betreffende Körper von Reaktionskräften umstellt ist. Der einfachste Fall ist der, bei dem nur eine Lage einer solchen Fläche möglich ist, der Fall der reinen Scherung. Er kennzeichnet sich dadurch,

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

daß Dimensionen parallel der Gleitfläche nicht geändert werden, gleicherweise wird der Abstand zweier zu der Gleitfläche paralleler Ebenen nicht geändert. Zu diesem Typus gehört auch das oben gegebene Beispiel der Bewegung des Wassers in einem Flusse. Aktive Kraft ist die Schwerkraft. Eine zum Flußgrunde schräg gelegene Fläche schneidet einen Körper ab, an dem neben der Schwerkraft noch Reaktionskräfte des Untergrundes angreifen, eine Bewegung geht daher rasch zu Ende. Nur eine zum Grunde parallele Ebene hat die Eigenschaft, daß gegen keine Reaktionskraft Weg zurückgelegt wird (die Reibungen sind hier nach dem oberen als aktive Kraft anzusehen), diese Fläche bleibt aktiv.

Ganz ähnlich ist auch der Einfluß der Höhe eines Probekörpers auf das Ergebnis des Druckversuches in der Festigkeitsmaschine zu beurteilen. Ist diese groß, so führen die 45^0-Ebenen ins Freie, können daher zu Gleitflächen werden, ist sie jedoch gering, so führen sie an die Backen der Presse und die dort auftretenden Reaktionskräfte setzen der Deformation rasch ein Ziel. An ihrer Stelle treten Flächen auf, die wieder ins Freie führen, die diesmal aber flacher sind. Nun sind aber bei Belastungen, die bei langen Probekörpern schon Gleitungen wie oben hervorbringen, die Scherkräfte an ihnen noch nicht bis zur Festigkeitsgrenze gewachsen, verhalten sich also als Reaktionskräfte, die Gleitbewegung kann noch nicht auftreten, erst bis die äußeren Kräfte so gewachsen sind, daß diese Festigkeit überstiegen ist. Der Körper erscheint also bedeutend fester.

Es sei nebenbei noch erwähnt, daß bei diesen Druckversuchen eine künstliche Symmetrie der äußeren Kräfte angestrebt wird, dies ist auch die Ursache, daß die Gleitflächen symmetrisch auftreten und der Anlaß zu der eingangs erwähnten Ansicht, daß Gleitflächen mit der lokalen Anordnung der maximalen Scherflächen in ursächlichem Zusammenhang stehen, welcher Ansicht hier bewußt entgegengetreten werden soll. Es wäre wegen dieser prinzipiellen Entscheidung wichtig, Druckversuche mit absichtlich hergestellter Asymmetrie vorzunehmen, zum Beispiel zwischen schräg geschnittenen Backen, um so mehr als durch Verringerung der Dicke des Probekörpers die Gleitflächenrichtung sehr genau einge-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

schlossen und der wahre Gang der Reibung, wie oben erwähnt, genau bestimmt werden könnte.

Über die Form der Gleitflächen läßt sich nur dann etwas Genaueres aussagen, wenn die Deformation nur durch eine Gleitfläche erfolgt. Ist die Gleitbewegung als Translation darstellbar, so muß die Fläche, wenn kein Abheben erfolgen soll, ein allgemeiner Zylinder mit der Bewegungsrichtung in der Erzeugenden sein, ist sie eine Rotation, so muß die Fläche eine allgemeine Rotationsfläche darstellen. Ist sie nun, wie es wahrscheinlich sein wird, als Kombination aus beiden darstellbar, so bleibt als einzige beiden Kategorien gemeinsame Fläche die Ebene übrig. Dies erklärt wohl die große Häufigkeit der Ebenen als Gleitflächen. Unter Umständen sind aber auch Rotationen mit großem Radius die Regel, ich meine damit die listrischen Flächen. Denkt man zum Beispiel einen Körper von allen Seiten mit Ausnahme einer von Reaktionskräften umstellt, an der freien Seite schräg eine aktive Kraft angreifend; die günstigste Gleitfläche ist dann die, die den Körper so in zwei Teile zerlegt, daß an dem einen außer der aktiven Kraft keine andere, gegen die bei der Bewegung Arbeit geleistet werden muß, angreift, in unserem Falle also eine Fläche, die von der freien Fläche ausgehend, in den Körper eindringt und wieder in die freie Fläche mündet, also die für die listrische Fläche charaketristische Schaufelform besitzt. Ähnliche Flächen bedingen auch die Bildung der Flatschen, schalenförmig begrenzter Teile an Verwerfungen.

Die oben gegebene Bedingung, daß bei der Bewegung kein Abheben, keine Bildung von Hohlräumen stattfinden darf, läßt sich bei einigermaßen großen Außenbeanspruchungen als geltend aufstellen, denn für die Bildung eines Hohlraumes müßte gegen die äußeren Kräfte Arbeit geleistet werden, was diese Bewegungsform unwahrscheinlich machen würde. In Übereinstimmung damit steht die Erfahrung, daß Flächen, welche einigermaßen bedeutenden tektonischen Bewegungen entstammen, keine Lagerstätten führen, weil sich an ihnen keine Hohlräume bildeten; solche treten nur bei Verwerfern auf, relativ geringfügigeren Erscheinungen mit geringerer Allgemeinbeanspruchung.

Es ist oben gezeigt worden, daß solche Gleitflächen den Körper so zu zerlegen suchen, daß der eine Teil womöglich

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

keine gegenwirkende Reaktionskraft enthält, sie vermeiden es, in ein Widerlager einzuschneiden. Es ist nun in der Tektonik meist schwer, ein Widerlager zu erkennen, meist fungieren Gesteinsgrenzen mit Änderung der Festigkeit als solche. Auf einen Raum, der durch seine Beanspruchung als solches wirkt, sei hier noch besonders hingewiesen, es ist das sogenannte level of no strain, eine Zone hydrostatischer Spannung, deren Entstehungsbedingungen in einem früheren Abschnitt gegeben wurden. In ihm sind die Scherspannungen gleich Null, einer Gleitdeformation gegenüber verhalten sie sich daher als Reaktionskräfte. Die Gleitflächen weichen also diesen Räumen aus. Da nun ein solches level of no strain in der Regel horizontal liegen wird, so ist damit wohl auch die meist flache Lagerung der tektonischen Flächen oder ihre Verflachung mit der Tiefe zu erklären.

Wir haben immer einen isotropen Körper vorausgesetzt. Das Verhalten eines anisotropen ergibt sich eigentlich nach dem Vorausgehenden von selbst, seine Strukturflächen werden die Gleitflächen nach sich ziehen, eine Erfahrung, die schon oft gemacht wurde.

Wir haben gesehen, daß zu Beginn der Bewegung wahrscheinlich sehr viel Gleitflächen aktiv sein werden, aus denen dann eine Auswahl getroffen wird. Diese muß nicht immer auf eine einzige Fläche hinauskommen, es können auch mehrere übrig bleiben, insbesondere trifft man relativ häufig den Fall zweier allerdings ungleichwertiger Gleitflächen. Die geometrische Wirkungsweise der Deformation wird dadurch geändert, die Dimensionen parallel der Gleitfläche und der Abstand zweier zur Gleitfläche paralleler Ebenen bleibt nicht mehr ungeändert.

Die eine dieser Dimensionen erhält eine Verlängerung, die andere eine Verkürzung, je nach dem Bewegungssinn und dem Winkel beider Gleitungen. In der Technik nennt man derartige Vorgänge Streckung oder Stauchung, je nachdem die wachsende Dimension der Länge oder der Dicke des Körpers entspricht. Bei der Stauchung wird meist die Mehrflächigkeit durch künstlich bewerkstelligte Symmetrie der äußeren Kräfte erzielt.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Diese Vorgänge sind in der Tektonik meist als Auswalzung bekannt, wobei besonders auf die Verkürzung der Mächtigkeiten Gewicht gelegt wird.

Die sogenannte Stauchung der Geologie ist jedoch ein anderer Vorgang.

Unter Umständen, wenn nämlich der ganze Umfang des Körpers mit Reaktionskräften besetzt ist, kann es vorkommen, daß jede beim Wachsen einer aktiven Kraft entstehende Bewegung bald wieder unterdrückt wird, weitere Bewegung wird erst beim Weiterwachsen der aktiven Kraft stattfinden. Gleichzeitig werden auch die aktiven Gleitflächen rasch wechseln. Diese Verworrenheit des Bewegungsbildes ist für diese Art Deformation charakteristisch. Dem technologischen Stauchen entspricht sie nicht, eher dem Schmieden in ein Gesenk.

Diese Ableitung basiert auf der Annahme eines langsamen Wachsens einer aktiven Kraft. Es wäre jetzt zu untersuchen, wie die Verhältnisse bei einem rascheren Anwachsen, bei einer stoßweisen Beanspruchung, sich verhalten würden. Jedenfalls kann da die Auslese der einzelnen Gleitflächen nicht so rasch nachkommen, es ist daher wahrscheinlich, daß mindestens für den Beginn der Bewegung diese einen weitaus komplizierteren Charakter haben wird. Im übrigen können wir aber wohl in der Geologie annehmen, daß die Beanspruchungen nicht gar rasch auftreten, wenigstens soviel wir aus der Art der äußeren Kräfte urteilen können.

Die Auswahl der Gleitflächen, von der wir oben gesprochen haben, ist nun keine streng eindeutige, die Flächen werden nur ihrer Richtung nach klassifiziert, ihr Ort aber bleibt innerhalb größerer oder kleinerer Gebiete frei. Wo die Bewegung eintritt, hängt dann wahrscheinlich von Inhomogenitäten des Körpers ab. Es können aber auch zahlreiche bis unzählige Ebenen, die alle gleiche Richtung haben, statt der einen Fläche zur Entwicklung kommen. In diesem Sinne kann man ein- und mehrflächige Deformation unterscheiden, als deren Extremfall die sogenannte Differentialbewegung dasteht. Diese Typen sind derart scharf in ihrem Auftreten voneinander getrennt, daß sie auch ursächlich voneinander verschieden sein müssen. Karman hat nun (Zeitschrift des Ver. Deutsch. Ing. 1911, S. 224 ff.) diesen Unterschied befriedigend geklärt. Er zeigte, daß in den Fällen, wo sich die

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Reibung im Verlauf der Deformation vermindert, die Deformation auf einzelne Flächen beschränkt bleibt, wo sie sich aber vermehrt, Differentialbewegung auftritt. Es ist das aus dem Vorausgegangenen auch leicht verständlich; wächst die Reibung mit der Bewegung, so wird die Wahrscheinlichkeit für die Gleitung an dieser Fläche vermindert, eine parallel dazu zeigt viel günstigere Verhältnisse, die Bewegung springt also sofort auf diese über. Sie wäre also auch der Zeit nach differentiell. Doch scheint im Verlaufe der Bewegung diese Eigenschaft zu schwinden, wenigstens nach gleichen Erscheinungen bei plastischen Körpern zu schließen, und dann gleichzeitig an den verschiedenen Flächen Differentiale des Weges zurückgelegt zu werden.

Diese Bewegungsform ist aber in der Regel auch differentiell der Dimension normal auf die Bewegungsfläche nach, die Gleitflächen liegen unmittelbar nebeneinander, schließen zwischen sich nur Platten von differentieller Dicke ein, so daß eine vor der Deformation stetige Kurve, die die Gleitrichtung schneidet, auch nach der Deformation stetigen Charakter behält.

Diese Differentialbewegung ist nun etwas in Gebieten größerer Allgemeinbeanspruchung außerordentlich Häufiges.

Es ist die Bewegung entweder im ganzen Raum in der Richtung normal auf die Gleitfläche gleichmäßig verteilt, oft aber, besonders wenn die Bewegung geringeres Ausmaß hat, finden wir im Körper plattenförmige Räume, die differentiell durchbewegt sind mit solchen abwechselnd, in denen keine solche Bewegung stattgefunden hat. In den durchbewegten Zonen sehen wir, daß die größte Bewegung in der Mitte stattgefunden hat, dies geht aus der Art und Weise hervor, wie zur Bewegungsrichtung schräg liegende Linien durch sie deformiert werden. Flexuren sind das beste Beispiel hiefür, der Verfasser hat ferner (Verhandlungen der k. k. Geol. Reichs-Anst. 1913) sich bemüht, zu zeigen, daß auf diese Weise auch liegende Falten entstehen können. Es sei hier festgestellt, daß eine identische Ansicht schon früher von V. Hise A. Treatise on metamorphism ausgesprochen wurde, welche Arbeit mir aber damals nicht zugänglich war.

Die Gesetze dieser Verteilung der Diffentialbewegung sind aber deduktiv nicht geklärt, es scheint, daß in der Mitte

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

dieser Platten die Fläche liegt, an der die Bewegung zuerst einsetzte, und daß sie von da aus nach beiden Seiten auswanderte.

Solcher Platten können nun in einem Gestein eine große Anzahl in paralleler Lagerung entstehen, bei lang währender Bewegung scheinen sie miteinander zu verschmelzen und daraus der Zustand gleichmäßiger Bewegungsverteilung zu entstehen.

Bei so gleichmäßig verteilter Differentialgeschwindigkeit ist der Bewegungszustand außerordentlich dem einer strömenden Flüssigkeit ähnlich. Der Vergleich ist auch schon genügend oft gemacht worden. Es wäre nun interessant, die Analogie weiterzuführen und andere bei Flüssigkeiten wohlbekannte Erscheinungen auch bei diesem Deformationstypus zu suchen.

Wir unterscheiden bei Flüssigkeiten zwei Typen der Bewegung, wirbelfreie und Wirbelströmung. Für geringe Differentialgeschwindigkeiten stimmt der Bewegungszustand mit dem oben für Gesteine angegebenen Typus überein, die Bewegungen der einzelnen Punkte sind über den ganzen Raum einander ähnlich. Wächst jedoch die Differentialgeschwindigkeit über eine gewisse Grenze, so wird diese Bewegungsform labil, an ihre Stelle tritt eine andere, inhomogene. Neben Räumen, in denen die Bewegung in ähnlicher Weise weitergeht, treten andere auf, Wirbel, in denen eine rotierende Bewegung herrscht, deren Sinn durch den Sinn der Differentialbewegung bestimmt wird. Ein Wirbel hat im allgemeinen eine beschränkte Lebensdauer, er löst sich auf, an seine Stelle tritt ein anderer usw. Bei einer solchen Bewegung sind die Wege der einzelnen Punkte außerordentlich mannigfaltige, zeigen Durchkreuzungen, was bei wirbelfreier nur wenig der Fall ist. Bei einer idealen Wirbelbewegung sollte zwischen Wirbel und Umgebung direkt eine Unstetigkeit eintreten, sollten Verbände ganz gelöst werden; praktisch ist das ja nicht der Fall, aber die Verbände werden außerordentlich gestreckt.

Ein geologischer Fall, in dem ich eine ähnliche Bewegungsform voraussetzen möchte, ist einmal die Mylonitbildung, insofern als man als Mylonit ein Gestein versteht, in welchem eine mechanische weitgehende Durchmischung stattgefunden hat. Es könnte eine solche Bewegung auch in einem einheitlichen Gestein vor sich gehen, jedoch sind

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

wir da meist außerstande, die Durchmischung festzustellen. Trat die Bewegung jedoch an der Grenze zweier Gesteine auf, wie es ja aus tektonischen Gründen meist der Fall ist, so können wir die Resultate leicht verfolgen.

Um welche Dimensionen es isch hier handelt, sieht man am Beispiel der sogenannten Reibungsrauhwacke der Radstädter Tauern. Dort haben wir ein kataklastisches Gestein an einer ausgesprochenen Bewegungsfläche zwischen Quarzit einerseits, Juramarmor anderseits. Bis zu Dimensionen von mehreren hundert Metern sind nun die als solche noch gut kennbaren Bruchstücke vermischt. Sie müssen daher sich kreuzende Bahnen zurückgelegt haben. Die Mischung ist dabei manchmal sehr gleichmäßig. Wie schwierig es ist, gleichmäßige Mischung zweier Körper zu erlangen, ist der Technik wohlbekannt, und es ist bezeichnend, daß dazu meist wirbelähnliche Vorgänge herangezogen werden.

Diese Art Mischung von Körpern, die keinen osmotischen Druck gegeneinander aufweisen, ist nun von dem Vorgang einer Lösung grundverschieden; eigentlich bleibt die Grenze zwischen den beiden Körpern immer erhalten, sie wird nur durch die Bewegungsvorgänge immer komplizierter, was man am besten zwischen Rauch und Luft konstatieren kann. Nun kann eine solche Grenze zwar auch durch gewöhnliche ungleich verteilte Differentialbewegung einigermaßen kompliziert werden, die Grenze wird dadurch zu einer Zickzacklinie, deren einzelne Zacken manchmal sehr lange ausgezogen werden können (vergl. zum Beispiel die Flyschzacken in den Malmkalk unter den Tschingelhörnern am Segnespaß), immerhin werden aber die räumlichen Zusammenhänge noch leicht feststellbar sein. Bei der Wirbelbewegung werden aber Lamellen der beiden Räume ineinandergewickelt und dabei so ausgedünnt, daß man ihre Getrenntheit nicht mehr zu erkennen imstande ist, und das ist die Charakteristik der Mylonite. Die Wirbelbewegung erfordert ein gewisses Mindestmaß an Differentialgeschwindigkeit. Auch damit stimmt das geologische Auftreten der Mylonite überein, wir finden sie dort, wo ein großes Maß von Bewegung sich in einen geringen Raum zusammengedrängt hat, also besonders an Überschiebungsflächen, wo die beiden Körper selbst nicht besonders durchbewegt wurden.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Eine andere Form, die ich auf derartige Wirbelbildungen zurückführen möchte, sind die Falten mit beschränktem Raum. Es muß dazu der Begriff des Raumes einer Deformation genauer definiert werden. Gewöhnlich betrachten wir das Resultat einer Deformation, zum Beispiel einer Faltung, nur an der Form einer einzigen Schicht, der Falte. Es haben aber meist eine ganze Anzahl von Schichten an derselben Deformation teilgenommen, Den Raum nun, innerhalb dessen die Schichten eine analoge Deformation angenommen haben, bezeichnen wir als Raum dieser Deformation. Die Form der einzelnen braucht keine kongruente zu sein, es muß nur durch den stetigen Übergang der einen in die andere dargetan werden, daß alle die Funktion desselben Vorganges sind. So stellt sich der Raum der gewöhnlichen liegenden Falten in der Regel im Schnitt als von zwei parallelen Geraden begrenzt dar, die parallel mit der Richtung der erzeugenden Gleitflächen sind. Er ist also in der Richtung der Sattel- und Muldenachsen unbeschränkt. Das Gleiche gilt auch für andere Falten, Knickfalten zum Beispiel.

Es gibt aber einen Typus Falten, der von dieser Regel abweicht, ihr Raum erscheint im Schnitt kreisförmig begrenzt, ihre Sattel- und Muldenachse hat keine größere Dimension als die Wellenlänge. Dabei ist die Intensität der Falten im Zentrum des Raumes am stärksten, nimmt gegen außen ab. (Fig. 2.) Was diesen Faltentyp besonders auszeichnet, ist

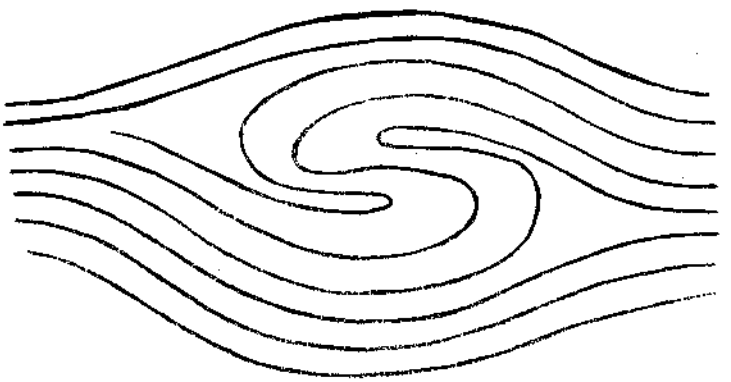

Fig. 2

ferner, daß die Mittelschenkel größere Mächtigkeiten haben, als Hangend- und Liegendschenkel.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Solche Falten finden sich nun gar nicht selten, besonders in Glimmerschiefern. Es ist fast immer eine große Anzahl solcher von meist geringer, manchmal fast mikroskopischer Dimension über den Raum verteilt, die Flächen dazwischen zeigen das gewöhnliche Bewegungsbild. Sämtliche dieser Falten haben gleichen Faltungssinn.[1])

Wir haben also folgendes Bewegungsbild: In einem Raume mit gewöhnlicher Bewegungsstruktur grenzen sich Räume ab, deren Bewegung eine Rotation gewesen sein muß. Die Analogie mit der Wirbelströmung ergibt sich daraus von selbst. Bemerkenswert ist nur, daß diese Rotation rasch wieder aufgehört haben muß, da solche Falten, die selbst in ihrem Zentrum mehr als eine halbe Umdrehung gemacht haben, selten sind.

Deformation in kristallin aufgebauten Körpern.

Die Körper der Geologie wie die der Technik sind nicht homogen, sondern aus einzelnen Kristallen aufgebaut. Wir müssen sehen, wie sich die Gleitdeformation mit diesem Aufbau abfindet. Nun ist der größte Teil dieser Erscheinungen schon in einem früheren Kapitel bei den inneren Spannungen genügend behandelt, wir lernten da die Begriffe Kalt- und Warmrecken, inter- und intragranuläre Deformation kennen. Es erübrigt uns nur noch, einige Nachträge zu bringen, besonders über den Vorgang der intragranulären Kaltdeformation durch Differentialbewegung.

Über diese stetige Deformation einzelner Kristalle gibt es einige Hypothesen, welche aber meines Erachtens noch einer Ergänzung bedürfen. Nach den geltenden Ansichten gibt es in einem Kristall zweierlei Möglichkeiten der Formänderung, nämlich Translationen (Gleitungen Mügge) und Umspringen in die Zwillingsstellungen. (Tamann, Metallographie.) Ersteres ist ein Gleiten nach kristallographisch festgelegten Richtungen, das derart erfolgt, daß als Resultat wieder ein ungestörtes Raumgitter auftritt. Die einzelnen Wegdifferentiale auf derselben Fläche würden also ruckweise von Gleichgewichtsstellung zu Gleichgewichtsstellung vor sich

[1]) Ein Spezialfall dieses Typs soll in einer späteren Arbeit besprochen werden.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

gehen. Es sei bemerkt, daß dieser Gleitungsform der Petrograph ziemlich ratlos gegenübersteht, er sieht eben nichts, optisch unterscheidet sich der Kristall nicht von einem undeformierten und aus seinen Umrissen läßt sich aus Unkenntnis der Ausgangsform kein Schluß ziehen.

Das zweite Prinzip, das des Umspringens in die Zwillingsstellung, ist sehr bekannt. Kalzit und Kupfer sind sehr gute Beispiele hiefür. Auch dieses zeitigt ungestörte Raumgitter.

Diese beiden Prinzipien sollen nach Tamann zur Erklärung der Kristalldeformation ausreichen. Demgegenüber muß aber festgestellt werden (es ist dies schon in Martens-Heyn, Materialienkunde für den Maschinenbau II A, geschehen), daß weitaus der größte Teil der Deformationen auf Gleitungen ganz anderer Art beruhen, bei denen die Raumgitter selbst gestört werden.

Daß diese Erkenntnis so lange nicht durchdrang, ist wohl darauf zurückzuführen, daß in der Metallographie, von welcher Seite diese Studien hauptsächlich getrieben wurden, die Untersuchung des Raumgitters etwas sehr Schwieriges ist, dem Petrographen, dem zu diesem Zwecke der so außerordentlich empfindliche optische Apparat zur Verfügung steht, ist das Bild eines undulös auslöschenden Quarzes, eines verbogenen Glimmers oder Kalzites etwas ganz Alltägliches. Diese deformierten Kristalle zeigen nun im wesentlichen noch immer eine stetige Änderung der Orientierung, wir müssen deshalb annehmen, daß die einzelnen Gleitdifferentiale im Gegensatz zu der von Tamann angegebenen Ansicht auch für das Mikroskop unkennbar geringe Dicke besitzen, also vielleicht doch von der Dimension der Moleküle nicht weit abstehen.

Ob die Gleitflächen in diesem Falle kristallographisch festgelegt sind, ist nicht zu entscheiden. Es ist aber wahrscheinlich, da die innere Reibung nach der wechselnden Molekuldichte der einzelnen Flächen im Kristall wahrscheinlich einen mit dem Azimut fast unstetigen Gang haben dürften.

Es ist klar, daß die Kenntnis der verschiedenen Deformationstypen und ihrer Abhängigkeit von Beanspruchung und Temperatur außerordentlich wertvolle Angaben über die Entstehungsbedingungen der Form eines Gesteines geben, und es wäre unsere Aufgabe, das Verhalten der einzelnen Mineralien

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

daraufhin zu untersuchen. Der Verfasser hat Studien in dieser Richtung begonnen, die Resultate sind aber noch nicht genügend weit gediehen. Es ist aber nicht zu verkennen, daß auch diese Bestimmungsmethoden unter der großen Schwierigkeit der theoretischen Geologie leiden, der gleichzeitigen Abhängigkeit von zwei Variablen, Druck und Temperatur, so daß man immer im Zweifel ist, welcher der beiden Größen eine Erscheinung besonders zuzuschreiben ist.

Abbildung von Gleitflächen.

Die tektonische Analyse eines Gebirgsbaues umfaßt im wesentlichen drei Aufgaben, die eigentlich auch eine zeitliche Aufeinanderfolge der Arbeiten bedingen sollen. Die erste ist die rein geometrische Beschreibung der Gegenstände, die in den Interessekreis fallen; die zweite ist die kinetische Darstellung, wie diese Formen aus den Ausgangsformen, die nach dem Aktualitätsgesetz angenommen werden, entstanden sein können, die dritte hätte die dynamische Erklärung der Vorgänge zu geben. Unsere deduktiven Untersuchungen haben nun die Absicht, Anleitungen über die Behandlung der zweiten und dritten Aufgabe zu geben, und zwar haben wir für die Kinematik ein positives Resultat zu verzeichnen, die Erkenntnis, daß es Gleitflächen sind, welche die für die Tektonik in Betracht kommenden Deformationen erzeugen. Das Resultat für die Dynamik ist aber vorwiegend negativ, insofern als wir erkannten, daß zwischen Gleitflächen und den Spannungszuständen kein so einfacher Zusammenhang besteht, daß wir mit seiner Hilfe uns über die Kräfteverhältnisse orientieren können.

Aber auch der rein kinematische Teil der Tektonik hat noch seine Schwierigkeiten, die besonders darin liegen, daß wir nur den Endzustand kennen, der Anfangszustand ist hypothetisch, unsere Annahmen darüber gewiß mit manchen Fehlern behaftet. Der Tektonik eigentümlich ist ferner, daß wir über die Zwischenstadien, gerade die, in welchen sich die Veränderungen abgespielt haben, so gut wie gar keine Angaben haben. So interessiert es uns, insbesondere über die Lage und Anordnung der Gleitflächen Angaben zu erhalten, dann über Bewegungssinn, Verschiebungsweite und Ge-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

schwindigkeit, wenn auch die letzteren beiden meist Gegenstand frommer Wünsche bleiben werden.

Versuche, Angaben über die Lage der Gleitflächen aus rein geometrischen Angaben über Anfangs- und Endzustand zu erhalten, wurden häufig gemacht. Bei den Versuchen über Tektonik, insbesonders Beckers, spielt zum Beispiel das Deformationsellipsoid eine große Rolle. (Experiments on schistosity and slaty cleavage. Bull. 241. U. S. Survey.) Denkt man in einem Körper vor der Deformation eine Kugel abgegrenzt, so entsteht aus ihr durch eine Differentialdeformation ein dreiachsiges Ellipsoid, wenn der Kugeldurchmesser so klein ist, daß die Bewegung in ihrem Bereich als homogen angesehen werden kann.

Nun meinte man, aus der Lage der Hauptachsen dieser Ellipsoide die Art der Deformation erkennen zu können, beging aber dabei wohl einen Fehler. Es ist nämlich der Zusammenhang zwischen Endform und Bewegungsart kein eindeutiger, ich kann auf dieselbe Form auf unendlich viel Weisen gelangen, zum Beispiel durch je zwei beliebig gegeneinander gelegene Gleitflächenscharen; sind diese gegeben, so hat man dadurch sofort auch Angaben über Sinn und Größe der Bewegung. Man sieht auch in allen den Fällen, wo dieser Weg eingeschlagen wurde, daß darin meist der Dynamik entstammende Hypothesen über die Lage der Gleitflächen benützt wurden, die Resultate daraus sind daher mit den Fehlern dieser Hypothesen behaftet. Es ist oben der Nachweis versucht worden, daß der Zusammenhang zwischen Spannung und Deformation kein so einfacher ist, daß solche Schlüsse praktisch mit Sicherheit zu ziehen sind, deshalb muß diese Methode immer Mißtrauen erwecken, und es wird sich empfehlen, zuerst die Gleitflächen festzustellen und die Deformation dann nur zur Bestimmung der Dimensionen der Bewegung zu verwerten.

In einer großen Reihe von Fällen verwenden wir nun doch die Erkenntnis des Bestehens von Deformationsellipsoiden allerdings unter Zuziehung noch anderer Tatsachen zur direkten Bestimmung der Lage von Gleitflächen. Allerdings schließen wir da aus ihnen nur, daß dort eine Deformation besonderer Art stattgefunden haben muß, daß in einem Raum, wo die Ellipsoide eine abweichende Form haben, auch die Deformation anders geartet gewesen sein muß. Die Lage der Gleit-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

flächen aber bestimmen wir aus der Form der Grenzen dieser durch den Bewegungszustand unterschiedenen Räume. Die Gleitflächen, die den Unterschied dieser beiden Räume hervorrufen, müssen der Grenzfläche parallel laufen, da eine Gleitfläche theoretisch unbegrenzt sein muß, das heißt entweder ins Freie führen, oder in sich geschlossen sein muß. Es wurde oben erwähnt, daß die Differentialbewegung sehr oft nicht gleichmäßig im Raume verteilt ist, daß Platten stärkerer Durchbewegung mit solchen wechseln, in denen sie schwächer ist oder sogar fehlt. Wir hätten da ein System von Gleitflächen vor uns, das den Begrenzungen dieser Platten parallel verläuft. Dieser Schluß wird sehr oft gemacht, am klarsten sind die Verhältnisse dann, wenn der durchbewegte Raum gegen die Umgebung unendlich schmal ist, wenn wir also keine Differential-, sondern eine unstetige Bewegungsverteilung haben (Brüche).

So wertvoll diese Methode auch ist, so oft wir sie anwenden, so versagt sie doch in sehr vielen Fällen, besonders dann, wenn die Bewegung zu gleichförmig im Raume verteilt ist, oder wo einzelne Bewegungsrichtungen andere derart überwiegen, daß deren gradueller Wechsel uns nicht mehr erkennbar ist.

Es ist insbesondere das Gebiet der kristallinen Schiefer, in dem diese Schwierigkeiten auftreten, mit denen ein jeder zu kämpfen hat, der in solchen Gebieten arbeitet. Es erwächst daraus die Frage, ob die Gleitflächen sich nicht in noch anderen Beziehungen als in so rein geometrischen, wie bis jetzt besprochen, etwa in physikalischen, chemischen, solchen der Stoff- und Energieverteilung im Körper abbilden. Daß dies möglich ist, sieht man an dem Beispiel, daß in Metallen größere Gleitflächen durch Anätzen deutlich gemacht werden können. (Siehe zum Beispiel das Bild des gestauchten Eisenzylinders in Martens-Heyn, Materialienkunde II A). Nun sind gerade kristalline Schiefer durch das Auftreten von Flächen gekennzeichnet, die die Stoffverteilung und die Kristalllage beherrschen, und es taucht die Frage auf, ob nicht diese Flächen direkt als abgebildete Gleitflächen zu betrachten sind. Für diese Hypothese gibt es eine Reihe von Anhaltspunkten; es ist einmal auffällig, daß sehr oft die Schieferung gerade die Lage hat, die die Gleitflächen, die wir auf andere

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Weise erschlossen haben, besitzen müßten. Dieser Zusammenhang ist nun zunächst ein rein äußerlicher, er kann auch so gedeutet werden, daß die Schieferung etwas Primäres ist, die Gleitflächen dann wegen der Anisotropie die betreffende Lage gewonnen haben. Doch deuten sehr oft verschiedene Erscheinungen darauf hin, daß die Mineralbildung noch während oder nach der Deformation fortgedauert hat, daß also die zeitliche Aufeinanderfolge diesen Schluß nicht immer zuläßt.

Wichtiger ist jedoch das Argument vieler kristalliner Schiefer, die in die Gruppe der Diaphorite fallen, bei denen wir wissen, daß der Habitus des Gesteins wirklich auf die Durchbewegung zurückzuführen ist, und bei denen wir sehen, daß die Schieferungsflächen wirklich Gleitfächen sind. Besonders charakteristisch sind da die Gangtonschiefer, wir sehen die Schieferung parallel der Gangfläche und wissen auch, daß die Bewegung parallel zur Gangfläche erfolgte.

Es soll damit aber nicht gesagt werden, daß die Schieferung nicht auch eine Funktion anderer Bedingungen sein kann, zum Beispiel lithogenetischer, insofern als sedimentogene Anisotropien eine gewisse Lage der Gleitflächen begünstigen können. Es muß auch nicht jede Gleitfläche texturell abgebildet werden; da ja die Ausbildung einer Schieferung Arbeit bindet, werden im allgemeinen nur Flächensysteme größerer Förderweite zur Abbildung kommen.

Es ist klar, daß diese Erklärungsweise der kristallinen Schiefer hier nicht zum ersten Male vorgeschlagen wird, sie ist schon mehrere Male aufgetreten. Ihren prägnantesten Ausdruck fand sie in den Arbeiten Beckers, ferner in neuerer Zeit in petrographischen Arbeiten Sanders. Wenn diese Ansicht zur Zeit nicht von vielen Petrographen geteilt wird, so rührt dies davon her, daß jetzt eine andere Hypothese ziemlich allgemeine Zustimmung errungen hat, die, daß Schieferung im wesentlichen die Abbildung von Hauptspannungen sei. Aus dem Vorausgegangenen ist der prinzipielle Unterschied beider Anschauungen unmittelbar klar. Die Anschauung findet sich hauptsächlich von Becke (Struktur und Mineralbestand der kristallinen Schiefer), Grubenmann (Kristalline Schiefer), van Hise (Treatise on Metamorphism), Leith (Rock cleavage. Bull. U. S. Geol. Survey. 239) vertreten.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Wenn in dem Kampf dieser beiden Hypothesen die letztere bis jetzt das Übergewicht über die erstere erlangt hat, so rührt dies nicht zum geringen Teil auch davon her, daß es gelang, mit Hilfe des Rieckeschen Prinzips auch deduktiv eine ansprechende Erklärung der schwierigeren Fälle der der Schieferung, solcher, bei denen die Schieferung durch Neukristallisation erfolgt, zu geben. Nur wird in der allgemein üblichen Form der Ansicht mehr in das Rieckesche Prinzip hineingelegt, als drinnen ist. Es soll nämlich die Dimensionsabnahme in der Richtung des größten Hauptdruckes, ihr Wachsen in der des geringsten direkt durch Lösungsvorgänge erklären. Nun spricht das Prinzip wohl aus, daß die Löslichkeit eines Körpers wächst, wenn er einem Zwang unterworfen ist, in diesem Falle einer Beanspruchung (gleichgültig ob Zug oder Druck), seine Löslichkeit ist aber damit nicht als Vektor dargestellt, nicht als von der Richtung abhängig. Es kann nicht gefolgert werden, daß ein Kristall in der Richtung des größten Druckes sich löse, in der eines kleineren gleichzeitig wachse. Wie wenig zutreffend diese Ansicht ist, sieht man auch daraus, daß für den Fall, als eine Zugspannung auftritt, das Prinzip eine Dimensionsabnahme erfordern würde, während wir in konsequenter Weiterbildung das größte Wachstum in dieser Richtung erwarten würden.

Die Schöpfer der Hypothese haben sich allerdings in der Anwendung des Prinzips vorsichtiger gefaßt. Sie haben in dem Kristallkomplex keine homogene, sondern eine punktweise Drucküberragung angenommen, die Beanspruchungen der Kristalle sind also in verschiedenen Teilen verschieden groß. Dann erfolgt allerdings ein Weglösen in den am meisten beanspruchten Stellen (nicht Richtungen), wodurch eine gewisse Annäherung an Paralleltextur hervorgebracht wird. Jedoch muß man beachten, daß durch eben diesen Vorgang auch die Drucküberragung sich immer mehr einer homogenen nähert und sie schon erreicht, wenn die Formänderungen die Größe der elastischen noch nicht überschritten haben. Es erscheint also auch diese Anwendung als nicht recht befriedigend.

Die Theorie der Hauptspannungsabbildung durch die Schieferung hat bis jetzt ihr Feld hauptsächlich auf dem Gebiete der Kristallisationsschieferung gefunden, während die

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Hypothese der Gleitflächenabbildung bis jetzt fast nur für klastische Schieferung, Kaltrecken, einigen Anklang, besonders durch die Arbeiten Sanders, gewonnen hat. Es ist dadurch ein unangenehmer Zwiespalt in die tektonische Bedeutung der Schieferung hineingelegt worden, da man sie einmal als Hauptebenen, dann wieder als Gleitflächen betrachten sollte, je nach dem Charakter der Deformation.

Für klastische Deformation ist es leicht, sich eine Vorstellung über den Vorgang der Abbildung der Gleitflächen zu machen. Haben wir Differentialbewegung nach einer Gleitflächenschar, so wird sich die große Achse des Deformationsellipsoides, die größte Dimension der einzelnen Kristallkörner immer mehr parallel zur Gleitfläche richten; allerdings sollte die Annäherung eine asymptotische sein, sie nie ganz erreichen, doch wird bei einer halbwegs weitgehenden Bewegung der Unterschied nicht mehr merkbar sein.

So läßt sich für Kaltrecken der Vorgang der Schieferung leicht plausibel machen. Doch sei hier bemerkt, daß man nur selten ein kaltgerecktes Gestein findet, in dem nicht schon einzelne Mineralien Warmreckung zeigen, und doch ordnen sie sich der allgemeinen Schieferung ein. Dies ist mit ein Grund zur Ausdehnung der Ansicht von der Gleitflächenabbildung durch die Schieferung auch auf die warmgereckten Gesteine, die Kristallisationsschieferung. Die Erklärung dieses Vorganges ist aber bedeutend schwieriger. Die bisherigen Versuche dazu bewegten sich meist in ähnlichen kinematischen Vorstellungen wie bei den kaltgereckten Schiefern, meist mit Drehung des Kristallisationskeimes, wodurch dann das Weiterwachsen schon von selbst zur Gleitfläche orientiert erfolgte. Doch befriedigt dieser Erklärungsversuch in den meisten Fällen nur wenig, weil der Zusammenhang zwischen Gleitfläche und Kristallorientierung damit nur ein sehr unorganischer würde.

Wünschenswert wäre, wenn gezeigt werden könnte, daß die Kristalle in einer gewissen Orientierung zur Gleitfäche mehr im Gleichgewicht wären als anders gelagert, wünschenswert auch deshalb, weil man dann wüßte, daß die Kristalle dieser Lage zustreben, gleichgültig, welchen Weg sie dazu einschlagen. Ob man sich jetzt diese Umlagerung auf dem Umweg einer Lösung vorstellt, oder durch reine Molekülwanderung, bleibt dem persönlichen Ermessen überlassen. Wenn

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

man die Umlagerungen in Metallen in Abwesenheit von Lösungsmitteln kennt, wird man gern der zweiten Anschauung zustimmen; wenn aber hier die erstere Darstellung gewählt ist, geschieht dies deshalb, weil sie größere Anschaulichkeit zuläßt.

Wenn wir das Gleichgewicht eines Kristalls gegenüber einer Gleitfläche feststellen wollen, dürfen wir nicht die gewöhnlichen Zustandsgleichungen verwenden, in die außer den chemischen Eigenschaften des Körpers noch Temperatur und Druck eintreten, denn diese bedingen Volumsenergien und werden durch die Gleitung nicht beeinflußt. Geändert wird die Form, wir müssen also Formenergien in die Gleichung aufnehmen.

Als solche Formenergie kommt insbesonders die Oberflächenenergie in Betracht. (Im folgenden immer abgekürzt als O-e.)

Die O-e. eines Kristalles, der als Bestandteil einer Gesteinsmasse gedacht ist, erfährt nun durch eine ihn durchsetzende Gleitfläche eine Vergrößerung insofern, als seine Oberfläche wächst; sie wächst nämlich um zwei Segmente, die in der Gleitfläche liegen und bei der Bewegung nach außen kommen. Der Kristall wird dadurch gegen einen undeformierten ins Unrecht gesetzt, zum Beispiel wird seine Löslichkeit größer, in dem Maße, als eine O-e. zugenommen hat.

Nun ist dieser Zuwachs nicht bloß von der Größe der Bewegung abhängig, sondern auch von der Lage der Fläche zum Kristall.

Die spezifische O-e. ist in einem Kristall nämlich nicht konstant, auch keine stetige Funktion der Lage des betreffenden Oberflächenstückes, sondern ändert ihre Größe direkt sprunghaft mit dem Azimut der betreffenden Fläche, hat Minima für die Kristallflächen selbst, während die zwischenliegenden Flächen mit ungleich höheren spezifischen O-e. behaftet sind.

Die Größen der spezifischen O-e. und ihre Unterschiede für verschiedene Lagen der Fläche sind natürlich für verschiedene Mineralien verschieden. Im allgemeinen aber kann man sagen, daß die Flächen, die als häufigste Kristallflächen auftreten, solche mit einem Minimum an O-e. sind, und unter diesen dürften wieder die Spaltflächen als Flächen größter Netzdichte die extremsten Minima darstellen. So

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

scheinen zum Beispiel die Basisflächen der glimmerartigen Mineralien solche ausgesprochene Minima darzustellen, während bei anderen Mineralien der Unterschied zwischen Maximum und Minimum nicht gar so bedeutend sein dürfte, ein Verdacht, der besonders für den Quarz auszusprechen sein dürfte.

Ein Studium der verschiedenen Mineralien nach dieser Richtung dürfte höchst wichtige Resultate ergeben.

Nach dem Gesagten wird also die Störung des Gleichgewichtes verschieden sein, je nachdem die Gleitfläche mit einer möglichen Kristallfläche zusammenfällt oder nicht. Nun wird ja in einem differentiell durchbewegten Gestein ein jeder Kristall deformiert. Der osmotische Druck in der Lösung wird aber innerhalb des Diffusionsbereiches durch den stabilsten Kristall bestimmt, durch den, dessen O-e. am wenigsten gestiegen ist, das ist also der, für den die Gleitfläche am besten mit einer primitiven Fläche zusammenfällt. Die anderen fallen der Auflösung anheim. Das Bild mit diesen Vorgängen in der Lösung kann natürlich noch weiter ausgebaut werden, auch für Bildung neuer Kristalle; notwendig ist aber, wie schon oben gesagt, der ganze Mechanismus des Lösungsmittels nicht. Jedenfalls ergibt sich daraus die für die Schieferung geforderte, zu den Gleitflächen orientierte Lage der Kristalle.

Es tritt aber noch die Frage auf, ob die Gleitvorgänge auch Einfluß auf die Art der im Gestein auftretenden Phasen ausüben können. Die Frage ist im allgemeinen zu verneinen. Der Einfluß der Volumsenergie ist in dieser Beziehung meist so überwiegend, daß der der Formenergie kaum in Frage kommt.

Der Mineralbestand eines Gesteines wird also im wesentlichen sich der Theorie der Tiefenstufen fügen. Es sind aber Fälle denkbar, wo auch Formenergie sich in chemische umwandelt. Wenn z. B. ein gewisser Stoffbestand in zwei Phasen auftreten kann, deren Volumsenergien sich nur wenig unterscheiden, so kann unter Umständen das Vorkommen von zur Gleitung geeigneten Kristallflächen bei der einen den Ausschlag dahin geben, daß sich bei Deformation diese ausbildet, wenn sie auch in Ruhe die etwas labilere sein sollte. Es ist die Frage, ob nicht die Serizitbildung aus Tongesteinen bei Bewegung auf diese Weise zu erklären wäre.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Groß ist natürlich der Einfluß der Deformation dann, wenn sie im gleichen Sinne wie die Änderung der Volumsenergie gegen die innere Reibung arbeitet, in den Diaphthoriten. Hier spielt sie aber die Rolle einer auslösenden Energie, und es wäre daher vergeblich, ihr Äquivalent in der chemischen Energie zu suchen.

Durch die Gleitflächen wird nicht nur die Textur der Gesteine bedingt, sondern auch die Stoffverteilung. Es ist eine nicht genug gewürdigte Erscheinung der meisten kristallinen Schiefer, daß ihre Bestandteile auch räumlich oft sehr streng getrennt sind. So sind die meisten Glimmerschiefer aus einer großen Anzahl unter sich annähernd gleichdimensionierter planparalleler Platten aufgebaut, deren eine fast nur aus Quarz, daneben Feldspate usw. besteht, während in den anderen der ganze Glimmerreichtum sich gesammelt hat. Diese Erscheinung ist mit der Abbildung der Hauptspannung nicht zu bewältigen, für Abbildung der Gleitflächen ergibt er sich ziemlich ungezwungen. Auch bei allgemeiner Differentialbewegung wird die Geschwindigkeitsverteilung keine ganz homogene sein, sondern entsprechend den Inhomogenitäten des Körpers auch primär einem raschen Wechsel unterworfen sein. Mineralien nun, die keine Flächen besonders geringer O-e. haben, werden sich hauptsächlich in den minder durchbewegten Platten ansiedeln, während andere, die wegen des Vorhandenseins von zu Gleitflächen geeigneten Kristallflächen sich auch in durchbewegten Räumen relativ wohl befinden, in diese verdrängt werden, wie zum Beispiel die Glimmer.

In diesem Falle wird die Erscheinung noch dadurch gefördert, daß wegen der Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften der einzelnen Lagen der Unterschied in der Geschwindigkeitsverteilung nur noch vergrößert wird. Die oft augenfällige Gleichheit der Mächtigkeiten der so entstandenen Platten läßt sich vielleicht dadurch erklären, daß jede solche Schicht einem für die betreffende Differentialgeschwindigkeit in Betracht kommenden Diffusionsbereich entspricht, es wäre also damit auch eine Angabe über die Größe des letzteren gegeben.

Eine Bestätigung dieser Vorgänge finden wir auch in den Produkten der Hüttentechnik, die starker Differentialbewegung

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

ausgesetzt waren, zum Beispiel Walzeisen. Wir finden dort die sogenannte Zeilenstruktur, welche mit den Erscheinungen, die oben besprochen sind, wesentlich ident sind. (Siehe die Mikrophotogramme, Taf. III.) Im Eisen erfolgt im Temperaturbereich des Walzvorganges die Ausbildung neuer Modifikationen. Aus dem bei höheren Temperaturen stabilen γ-Eisen-Eisenkarbid-Mischkristall scheidet sich bei sinkender Temperatur Ferrit aus, das Diagramm hat ganz ähnliche Charaktere, wie das des Auskristallisierens zweier nicht mischbarer Phasen aus einer Lösung. Auch hier wird zuletzt eine Art eutektischen Punktes erreicht, bei dem dann Perlit, das Eutektoid zwischen Ferrit und Cementit, dem Eisenkarbid, sich bildet. (Dunkle Aggregate im Bilde.) Betont sei, daß alle diese Vorgänge im festen Zustand auftreten. Nun sieht man in den Bildern, daß die Ferritkristalle und die Perlitinseln in Platten räumlich getrennt sind; während der Walzung, als also nur Ferrit und der oben erwähnte Mischkristall vorhanden waren, verhielten sie sich beide der Durchbewegung gegenüber derart verschieden, daß sie verschiedene Räume aufsuchten. (Vergl. hierüber auch die Bilder in den diesbezüglichen Arbeiten Oberhoffers, Stahl und Eisen, 1913, wo allerdings eine andere Hypothese hierüber aufgestellt wird.)

Welcher der beiden Bestandteile in dem Falle die Räume größerer Durchbewegung einnahm, ist schwierig zu entscheiden, ich meine der Mischkristall, denn man findet Schlacken, die auch die durchbewegteren Räume aufsuchen dürften, fast immer in den Perlitzügen, die aus den Resten der Mischkristalle hervorgegangen sind.

So läßt sich die Erscheinung der Schieferung durch Gleitflächen befriedigend erklären. Schwierigkeiten macht hingegen die Erklärung der Erscheinungen, die wir unter dem Namen Stress zusammenfassen. Die Schwierigkeit liegt aber scheinbar auch darin, daß sich unter einheitlicher Erscheinungsform genetisch verschiedene Tatsachen finden. Wir verstehen unter Stresserscheinungen im Gegensatz zu Schieferung nicht die Parallelstellung gleicher Flächen, sondern gleicher Kristallrichtungen. Sehr häufig nimmt man auch Parallellagerung der Hauptdimensionen der Kristallkörner ohne Übereinstimmung der kristallographischen Richtungen als Stresserscheinung. Auch im tektonischen Auftreten scheint es mehrere Gruppen

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

zu geben, die eine hat die Hauptdimensionen in der Bewegungsrichtung, also im wesentlichen nicht weit vom Fallen der Schichten abweichend, während die anderen die größte Erstreckung in der Richtung des Schichtstreichens haben und meist normal auf die anderweitig erschlossene Bewegungsrichtung stehen dürften. Letztere Erscheinung dürfte meiner Erfahrung nach bei weitem die größere Bedeutung haben. Diese beiden Erscheinungen dürften nun auch nach dem Deformationstypus verschieden sein, indem die erste Form Kaltreckungsvorgängen entspricht, also klastischen Schiefern angehören dürfte. Die in der Bewegungsrichtung liegende Hauptdimension der Kristalle entspricht der größten Achse des Deformationsellipsoides, die sich im Verlaufe der Bewegung immer mehr der Gleitfläche in der Bewegungsrichtung nähert.

Schwieriger jedoch, aber auch wichtiger, scheint mir die Erklärung des anderen Typus zu sein, der meinen Erfahrungen nach den Bau des größten Teiles der kristallinen Schiefer der Alpen beherrscht, der Stress mit ausgesprochener O—W-Richtung. Im Gegensatz zum früheren finden wir hier nicht bloß parallele Orientierung der größten Dimensionen, sondern auch von Kristallrichtungen, ferner nicht bloß klastische Schieferung, sondern auch Kristalloblastese. Nun ist unsere Aufgabe die, zu zeigen, wie durch einen Deformationsvorgang eine solche Orientierung durch Kristallwachstum zustande kommen kann. Mit dem einfachen Mechanismus, der uns für die Erklärung der Schieferung genügte, kommen wir hier nicht aus, da innerhalb einer Kristallfläche die O-e. kein Vektor ist, in den verschiedenen Azimuten in derselben nicht verschiedene Werte hat. Die Lösung der Schwierigkeit ist vielleicht auf folgendem Wege möglich. Meinen Erfahrungen nach tritt diese Art Stress immer in Fällen auf, wo der Bewegungszustand nicht bloß von einer, sondern von mehreren sich schneidenden Gleitflächen beherrscht wird, also in Fällen, die wir oben als Auswalzung bezeichnet haben; die Stressrichtung hält in dem Falle die Schnittlinien beider Flächen ein. Insoweit die Ansicht berechtigt ist, daß die Bewegungsrichtung mit der Fallrichtung übereinstimmt (eine Ansicht, die für die Tektonik einige Berechtigung haben dürfte), steht alsdann die Stressrichtung normal auf die Bewegungsrichtung.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Bei zwei sich schneidenden Gleitflächen wird es nun einem Kristall nicht möglich sein, in jede derselben eine seiner Flächen hineinzulegen, er wird sich zunächst damit begnügen müssen, seine Fläche geringster O-e. in die Gleitfläche größerer Arbeitsleistung hineinzulegen. Das Abfinden mit der anderen Bewegung kann man sich nun auf folgende Weise vorstellen: Es ist die Ansicht vielleicht berechtigt, daß bei Mineralien mit wohl ausgebildeter Prismenzone nicht bloß die derselben angehörenden Kristallflächen die geringste O-e. besitzen, sondern auch die derselben Zone angehörenden irrationalen Flächen geringere haben, als anders gelagerte, weil sie wenigstens in einer Richtung die große Flächendichte der rationalen Flächen der Zone haben. Der Kristall wird deswegen gut tun, in die zweite Gleitfläche mindestens eine beliebige Fläche der Hauptzone hineinzulegen, seine Hauptachse also parallel zum Schnitt beider Gleitflächen.

Es sind diese Anschauungen über Stress noch durch etwas wenig Untersuchungen belegbar, sie werden aber doch vielleicht zu einer gewissen Vorsicht in der tektonischen Auswertung der Stresserscheinungen raten, da man Gefahr laufen kann, die Verschiebungsrichtungen um 90^0 fehlerhaft zu erschließen. Es sei erwähnt, daß auch bei unstetiger Deformation ähnliche Probleme auftreten können. Man ist bei der Ausrichtung von Verwerfern gewohnt, Harnischstriemen als Anzeichen der Bewegungsrichtung zu behandeln. Es sind mir aber Fälle bekannt, wo eine ganz ähnliche Striemung durch einen sehr spitzen Schnitt zweier Gleitflächensysteme hervorgebracht wurde, wo obiger Schluß also zu einem groben Fehler führen würde. Es wäre vielleicht interessant, von diesem Gesichtspunkte die von Ampferer beschriebenen Gleitflächen in den nördlichen Kalkalpen mit O—W verlaufender Striemung zu betrachten.

Wie oben erwähnt, ist die Entstehung von Schieferung an eine bestimmte Arbeitsleistung der Gleitung geknüpft, gleicherweise wird es auch für den Stress gelten. So können wir häufig ein zweites Gleitflächensystem erkennen, welches zu keiner Unorientierung geführt hat.

Die Frage der Korrelation zwischen Gefüge- und tektonischen Vorgängen ist insbesondere in letzter Zeit in den Arbeiten Sanders aufgeworfen worden. In diesem Sinne können wir

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

unsere Hypothese wohl so fassen, daß wir sagen, daß Schieferung, also Orientierungsgefüge, mit Gleitvorgängen korrelat sind, daß aber der Satz sich nicht unbedingt umkehren läßt.

Anschließend daran soll noch die Frage besprochen werden, ob auch Dimensionsgefüge und Gesteinsdimension einander korrelat sind. Es ist zum Beispiel bei Stresserscheinungen die Ansicht naheliegend, daß der Parallellagerung der Hauptdimensionen der Kristalle auch ein Wachsen der Dimension des Gesteines in derselben Richtung entspricht. Es ist aber da notwendig, auf die Bewegungen der einzelnen Moleküle einzugehen, und da ergibt sich ein grundlegender Unterschied zwischen kalt- und warmgereckten Gesteinen. Bei den ersteren besitzen die Moleküle nur die Bewegung, die aus der Deformation entspringt, dort kann also obige Korrelation aufgestellt werden. Bei warmgereckten Gesteinen besitzt aber das Molekül noch die in den Diffusionsvorgängen oder Rekristallisationsvorgängen erkennbare Bewegungsmöglichkeit von endlicher Größe, die also unzweifelhaft bedeutender ist, als der bei einer Differentialbewegung auf dasselbe entfallende Bewegungsanteil. Deshalb wird hier ein auf obige Korrelation basierter Schluß unbedingt zu Fehlern führen, ist also nicht zulässig.

Zusammenfassung.

Die Resultate dieser vorwiegend deduktiven Studie lassen sich in folgende Thesen zusammenfassen:

Die für die Tektonik in Betracht kommenden Deformationen sind vorwiegend Gleitungen.

Zwischen der Bildung der Gleitflächen und der Lage der Flächen größter Scherkraft besteht kein unmittelbarer Zusammenhang, deshalb ist auch die Forderung nach Symmetrie der Gleitflächen unberechtigt.

Die Anordnung der Gleitflächen ist im wesentlichen von der Arbeitsfähigkeit der äußeren Kräfte abhängig.

Für gewisse tektonische Bildungen kommen auch wirbelähnliche Bewegungsvorgänge in Betracht.

Es ist unmöglich, nur aus der Kenntnis der geometrischen Ausgangs- und Endform Schlüsse auf die Lage der Gleitflächen zu ziehen.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Schieferung ist Abbildung der Gleitflächen.

Stress in kalt- und warmdeformierten Gesteinen ist prinzipiell verschieden.

Letzterer ist Abbildung des Schnittes von Gleitflächen.

Nicht jede Gleitfläche muß texturell abgebildet werden.

Kaltdeformation der Mineralkomponenten hat ein tektonisches Korrelat, Warmdeformation nicht.

Leoben, Februar 1915.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

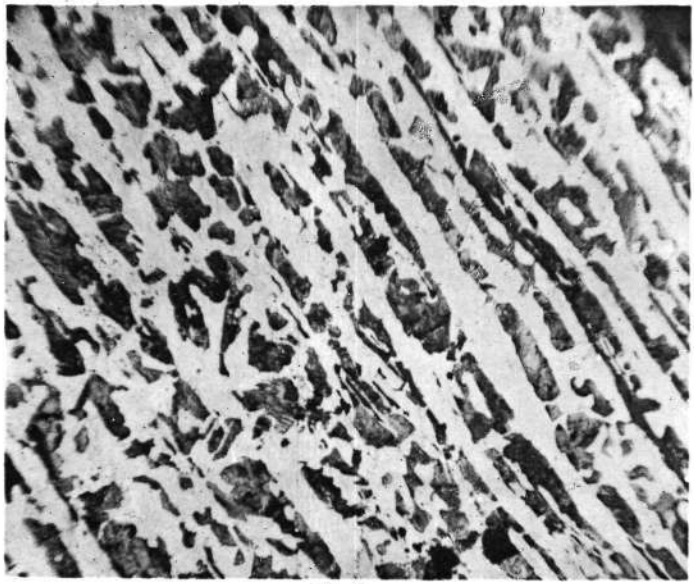

Fig. 4

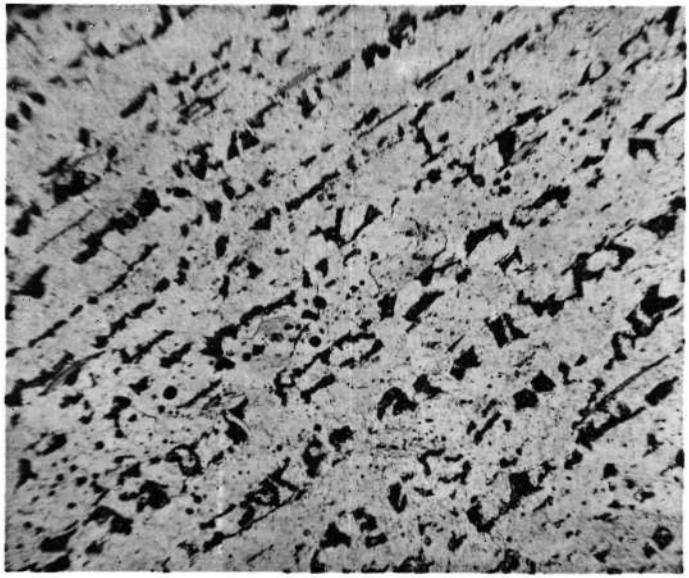

Fig. 5 Lichtdruck v. Max Jaffé, Wien.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Austrian Journal of Earth Sciences

Jahr/Year: 1915

Band/Volume: 8

Autor(en)/Author(s): Schmidt Walter

Artikel/Article: Mechanische Probleme der Gebirgsbildung. 62-115