

Zur petrographisch-tektonischen Analyse.

Von B. Sander (Innsbruck), mit einem Beitrag v. M. Pernt.

(Mit 3 Textfiguren.)

I. Richtung und Stoffe petrotektonischer Analysen.

Es wird versucht, die petrographisch-tektonische Analyse, deren Grundbegriffe in der Verh. G. B. A. 1923, Nr. 4, zitierten Literatur und in den regionalgeologischen Arbeiten des Verfassers in besonderen Fällen erörtert und angewendet wurden, nun durch Erörterung noch einiger allgemeinerer Fragen zu fördern. Wenn man das Endziel derartiger Betrachtungsweisen, deren Gebiet man kurz als Petrotektonik bezeichnen könnte, darin erblickt, die Gesteine als mittelbar (z. B. Sedimente, Magmengesteine) und unmittelbar (z. B. Tektonite) beziehbar auf Bewegungen der Erdhaut zu erfassen und zu Rückschlüssen auf diese Bewegungen zu benützen, so scheint das Hauptgewicht noch immer auf dem Ausbau der Analyse zu liegen, obgleich sich z. B. in den Zentralalpen auch schon entscheidende Beiträge zur Synthese ergeben haben. Einen Anlaß zu diesen Aufsätzen hat mir die Belehrung durch die Fortschritte der Metallographie, vermittelt besonders durch Tammanns Metallographie, und der Kristallographie, vermittelt besonders durch Darstellungen von Rinne und Niggli, gegeben.

Daß auf Translationen viel mehr eingegangen wurde als in früheren Arbeiten, ist durch Mügges grundlegende Arbeiten veranlaßt und manche Belehrung auch Lehmanns „flüssigen Kristallen“ zu danken.

Ich kann meine früher geäußerte Ansicht nur wiederholen, daß eine Rückwirkung petrographisch-deskriptiver Ergebnisse, gerade auf dem Gebiete der Deformation von Kristallen und Kristallgefügen, der Regelungen, Holoblastesen, des zeitlichen Verhältnisses zwischen Deformation und Kristallisation, kurz eine Rückwirkung fast des ganzen hergehörigen deskriptiv-petrographischen Begriffsinventars sowohl auf die Metallographie als auf die allgemeinste physikalisch-chemische Fassung der Vorgänge fruchtbarer wäre als der gegenwärtige Zustand, bei welchem wegen der geringen Fühlung zwischen den betreffenden Wissenschaften sichere Ergebnisse der Petrographie den Nachbarwissenschaften sowohl als Probleme für die physikalisch-chemische Bearbeitung als auch als lediglich an anderem Material gewonnene Fortschritte in gleicher Richtung verloren gehen. Eben deshalb ist ja die entsprechende Bescheidenheit, was „Erklärungen“ anlangt, die Klarheit der Begriffe und eine Sprache, welche den Fachnachbarn nicht abschreckt, und damit die asymptotische Fühlung mit der Atomphysik wenigstens anzustreben und sind diesem Zweck alle unklarerer Begriffe, wie Dynamometamorphose, Piezokristallisation etc., wie in früheren Arbeiten zum Opfer gebracht

worden, so viel Beobachtung sie auch einseitig unleugbar summieren und so lockend sie für den Geologen sind.

Neben der Bestrebung, Ergebnisse den Fachnachbarn zugänglicher zu machen, ist und bleibt die Hauptaufgabe der Lehre von den tektonischen Fazies ihre weitere Ausgestaltung und heute bereits ihre Anwendung. In letzterer Hinsicht und insbesondere auch angesichts der hierin noch geringen Ergebnisse von geologischen Reisen möchte ich noch einmal mit allem Nachdrucke auf die ebenfalls schon früher mit aller Drastik gemachte Feststellung verweisen, daß sehr oft einige vom einsichtigen Tektoniker entnommene Proben im Dünnschliff die tektonische Fazies kennzeichnen und damit vollkommen sichere Einblicke in die Geologie namentlich tiefentektonisch deformierter Areale gewinnen lassen.* Eben wegen dieser, auch der alpinen Deckentheorie gegenüber, meines Erachtens viel größeren Tragweite und wegen des allgemeinen Interesses solcher Ausgestaltung der petrographischen Tektonik und der Tiefentektonik habe ich meine in dieser Hinsicht leider von seiten manches Tektonikers im wesentlichen, trotz gelegentlichen Reproduktionen ohne Bezugnahme unverstandenen Arbeiten in den Tauern auf dieses Allgemeine seit jeher ausdrücklich eingestellt.

Am zweckdienlichsten scheint es mir nun, zunächst einem Werke von solcher Bedeutung wie Heims Geologie der Schweiz gegenüber Aufgaben, Ziele und Begriffsinventar der petrographisch-tektonischen Richtung festzuhalten und zu zeigen, wie derartiges petrographisches Studium als eine selbständige unerläßliche Grundlage gegenüber geologisch-genetischen Synthesen auf seinem eigenen Platz zu pflegen, nicht aber mit geologisch-genetischen Terminis zu überschwemmen ist. Um diese Abgrenzung vorzunehmen, scheint ein Werk wie Heims am besten geeignet, gleichviel ob mein Verfahren in diesem Sinne verstanden wird oder nur als Polemik, obgleich ich Heims Mechanismus der Gebirgsbildung an den Anfang der zur Einführung in den Stoff (l. c.) empfohlenen Literatur gestellt habe.

Albert Heim hat an zwei Stellen seiner Geologie der Schweiz (Bd. II, 1, p. 73—121, 1921; und Bd. II, 2, p. 850—865, 1922) die alpinen Metamorphosen besprochen.

Hiebei gelangten, wie ein Blick auf die von Heim zitierte Literatur zeigt, keineswegs nur die Resultate zur Darstellung, „zu welchen uns heute unsere Kenntnis der Schweizeralpen führt“; vielmehr sind viele der von Heim zugrunde gelegten Einsichten in Gebieten außerhalb der Schweiz gewonnen und publiziert worden. Es wäre ferner auch anzunehmen, daß manche von Heim in der „Literatur spezieller oder lokaler Art“ angeführte Autoren ganz und gar allgemeine Ergebnisse erstmalig begründet haben, welche erst später in äußerlich „allgemeine“ Darstellungen übernommen wurden. Es ist in einer Wissenschaft, deren allgemeine Ergebnisse geradezu in der Regel zum erstenmal induktiv und regional gewonnen und dargestellt werden, durchaus nötig, hierin

* Ein Beispiel dafür, was man aus solchen Materialien durch petrotektonische Analyse machen kann, gibt Helge Backlund, „Petrogenetische Studien an Taimyrgesteinen“, Geol. Förr. Förrh. Febr. 1918.

schärfer zu sehen, man läuft sonst heutzutage Gefahr, Bücherschreiberei aus zweiter und dritter Hand und Arbeit vor Ort zu verwechseln, was meines Erachtens Heim, ganz ungemäß seiner eigentlichsten Art und Wirksamkeit widerfuhr. Die Feststellung Heims, daß die Erscheinungen der Dislokationsmetamorphose in der Schweiz eingehender als anderswo beobachtet und erörtert worden sind, kann man bis auf neuere Zeiten vielleicht gelten lassen, für die neueren Zeiten aber ist sie unrichtig, wie abermals schon ein wirkliches Studium der von Heim angeführten Autoren erweisen kann, welche noch keineswegs alle hergehörigen sind, sobald man anfängt von „eingehend“ — was anderes wäre etwa „allgemein verbreitet“ — zu sprechen.

Es muß einem Forscher von der Eigenarbeit Heims und vollends in einem seinem Titel nach regionalgeologischen Werk unbenommen bleiben, was er für eine Auswahl aus der Literatur trifft. Da Heim aber unser Thema der alpinen Metamorphose, nicht ungezwungen allerdings, auf die Schweizer Alpen bezieht, andererseits aber ausgesprochen- und ersichtlichermassen bis zu einem hohen Grade allgemein behandelt, so besteht für jeden, der sein Begriffsinventar in der Sache nur teilweise oder nicht bei Heim wiederfindet, die Forderung, einer solchen Geologie für viele Fernstehende gegenüber, wie sie Heims Werk seine Zeit lang sein wird, sich in ein Verhältnis zu setzen, um so mehr, wenn man es für möglich hält, daß bei der Intensität schweizerischer Geologenarbeit die Zeiten wieder kommen, wo tektonische Petrographie in der Schweiz am eingehendsten betrieben wird, wie etwa zur Zeit des „Mechanismus“. Weshalb ich aber glaube, daß wir derzeit weit davon entfernt sind, wird sich im folgenden nebenbei ergeben, wenn ich nur meine Betrachtungsweise gegenüber der Heimschen seinerzeit für die Ära des „Mechanismus“ in jeder Weise voranleuchtenden und anregenden zu kennzeichnen und zu behaupten versuche.

Lediglich also um meinen Standpunkt zu charakterisieren und zunächst neben Heims Darstellung überhaupt als einen ganz anderen kenntlich zu machen, setze ich mich zuerst in Gegensatz zu einigen die Methode kennzeichnenden Aussprüchen Heims. Ich verkenne damit nicht, daß auch Heims Art, immer gleich nach den letzten Ursachen zu fragen, eine Aufgabe hat und eine Rolle in der Arbeitsteilung der Geister spielt. Diese Rolle bestand und besteht offenbar in der Anregung zur Befassung mit der Geologie, wie der ganze Verlauf der Heim zu dankenden Schweizer Geologie seit Heim zeigt, nicht aber bisher in der Aufstellung klarer Begriffe und nicht in der eingehenden Behandlung der Tektonite, wie das Folgende zeigen soll.

(p. 99) „Was in der Natur genetisch verknüpft ist, können wir auch für die Besprechung nicht auseinanderreißen.“

Was nun aber Heim mit mehr oder weniger Recht in der Natur genetisch verknüpft scheint, wird man für jede von Heims Ansichten über die Genesis unabhängige, also wissenschaftlich selbständige Besprechung begrifflich unbedingt trennen für Forschung und für Lehre. So die Ummineralisation und die Teilbewegung im Gefüge, ja sogar letztere und die Kristallisation. Nur so gelangt man zu den für eingehendere

Befassung mit den Tektoniten aufgestellten Begriffen, z. B. zeitliche Beziehungen zwischen Deformation und Kristallisation, Teilbewegung in Lösung usw. Ferner ist nicht zu vergessen, daß wir nur durch eingehendere, nicht von Vorurteilen über die Genesis gegängelte Untersuchungen an Tektoniten Beiträge für die allgemeine wissenschaftliche Deformationskunde liefern, welche über den Interessentenkreis für alpine oder Schweizer Geologie hinausragen.

p. 853. „Es ist Geschmacksache, wenn man diesen letzteren Teil ihrer Arbeit (d. h. der Arbeit der Dislokationsmetamorphose bei Erzeugung von Tektoniten) sich noch zerlegt denken will in einen mechanischen und einen chemischen Teil, obwohl beide gleichzeitig gegenseitig einander beeinflussend zusammenarbeiten.“

Dies ist Geschmacksache, aber nur insofern, als es eben Geschmacksache ist, ob man die Tektonik eingehend studieren will oder nicht, ob man sich mit genetisch-geologischen Terminus begnügen oder selbständige Petrographie treiben will. „Will man so verfahren, so wäre es wohl besser, von vornherein nicht nach Ursachen, sondern nur nach den Folgen zu unterscheiden in mechanische oder chemische oder mechanisch-chemische Metamorphose.“

Eben dies nun habe ich mir für das eingehendere Studium der Tektonik zur Aufgabe gemacht: Von vornherein nicht nach Ursachen, welche man nicht sieht, sondern nur nach den Folgen, welche man sieht, zu unterscheiden. Und erst nach einer viel weiter gediehenen und eingehenderen Unterscheidung und Deskription als sie etwa Heims Geologie der Schweiz erkennen läßt oder wir sie bereits besitzen, auf eine Prüfung des Genetischen in Heims und R. Staubs Behauptungen einzugehen.

Damit ist mein Bestreben in der Sache, welches ich in den einschlägigen Arbeiten seit 1909 betont und festgehalten habe, der „Geologie der Schweiz“ gegenüber kurz gekennzeichnet und ich gehe auf Einzelnes über.

Als Beispiel für eine Erörterung, wofür gewisse beliebte Begriffe der heutigen Geologie und Petrographie zu brauchen sind und wofür sie nicht zu brauchen sind, wähle ich Heims Dislokationsmetamorphose unter vielen ähnlichen Begriffen, die alle vielleicht nur das eine gemein haben, daß sie einen von Hand zu Hand wechselnden Inhalt mit einer wechselnden, bald bewußten, bald unbewußten Aussage über Genesis besitzen und häufig schon in ein und derselben Arbeit ihren Inhalt wechseln. Schon wegen der Vorwegnahme des Urteils über die Genesis sind derartige Begriffe zwar für die Darstellung endgültig geklärter genetischer Fragen, nicht aber für die vorher nötige Deskription verwendbar, deren Terminologie sie überhaupt nie verdrängen dürften, selbst wenn wir der Genesis viele Male gewisser wären, als wir es tatsächlich in den meisten Fällen sind — vollends etwa bei der von Heim vorgenommenen Einordnung von Grubenmanns Tiefenstufen in die derzeitige Gestalt der Deckentheorie bei Heim.

Unter Dislokationsmetamorphose versteht Heim (p. 74) alle Veränderungen, welche Gesteine in ihrer Form, Textur, Struktur, Mineralisation infolge der Gebirgsdislokation erfahren haben.

In dieser Form ist die Dislokationsmetamorphose (DM. mit Heim) ein Begriff, welcher als alles umfassende Überschrift über einem Kapitel stehen könnte, das auch Heim seit dem Mechanismus der Gebirgsbildung nicht mehr schrieb, das als „Veränderungen der Form“ sogar die Tektonik umfassen müßte, das eben fast alle Erscheinungen bei der Gebirgsbildung überhaupt umfassen würde, den „Mechanismus der Gebirgsbildung“ und wie viel mehr heute noch dazu, kurz die Überschrift eines uferlosen Gebietes. Es eignet sich das Wort lediglich zur Feststellung des Umstandes, daß irgendeine Veränderung am Gestein infolge (direkt und indirekt?!) der Gebirgsbildung entstanden ist. Es soll von der Blocktektonik, denn auch diese ist Veränderung der Form eines Gesteins, bis zu Ummineralisationen alles Mögliche bezeichnen und so bezeichnet es automatisch gar nichts und ist deskriptiv fast wertlos für jede eingehendere Befassung.

Genetisch ist es überall wertlos, wo wir uns nicht mit irgend einem Zusammenhange der Gesteinsveränderung mit der Gebirgsbildung begnügen, was wir bei eingehenderer Befassung denn doch nicht mehr können, sondern dem genetischen Zusammenhange der Gesteinsveränderung mit der Änderung physikalischer und chemischer Bedingungen nachgehen, deren verschiedenste in der verschiedensten Art mit dem Riesenkomplex von Erscheinungen der „Gebirgsdislokation“ zusammenhängen. Damit ist die Dislokationsmetamorphose in Heims Definition auch genetisch allzuweit und ist für den wahren Stand der Fragen und eingehendere Befassung mit den metamorphen Gesteinen durch eine Anzahl von engeren Begriffen bereits ersetzt, welche durch weitere Einengung einen Beitrag zu jener Sprache ergeben sollen, in welcher man endlich auch mit dem Physiker über dynamische Petrographie und über Tektonik wird sprechen können.

Kurz eine Gebirgsdislokation kann Veränderungen der verschiedensten physikalisch-chemischen Variablen lediglich im Gefolge haben. Und ferner kann beispielsweise ein Gesteinskörper „infolge der Gebirgsdislokation“ lediglich in größere Tiefe geraten, dort Druck und Temperatursteigerung treffen und ein Produkt ergeben, welches ganz genau gleich durch Tiefenmetamorphose wie durch Dislokationsmetamorphose zustande kommen kann, im gegebenen Fall aber wäre meiner Meinung nach die Metamorphose „ohne die Dislokation nicht entstanden“ (vgl. p. 851) und würde von Heim Dislokationsmetamorphose genannt. Man sieht, wie der Begriff für die vorurteilslose Beschreibung versagt. Wie ist es ferner mit den Metamorphosen, welche unter lastenden Decken „bei stehendem Druck“ entstehend, ihr Gepräge durch Druck und Temperatursteigerung erhalten? Wie ist es mit allen Metamorphosen, bei denen die „Gebirgsdislokation“ lediglich die Rolle des Versenkers spielte? Oder gibt etwa Überlastung durch Decken nicht dieselben Produkte der Druck- und Temperatursteigerung wie sedimentäre Überlastung oder Belastung durch Ergüsse? Man stelle sich nur derartige Gebiete erodiert vor, so begegnet man der unerfüllbaren Forderung, gleiche Produkte gleicher physikalischer Änderungen verschieden zu benennen nach einer erst auf Grund vorangehender Deskription, zuweilen aber gar nicht mehr erhebbarer geologischer Genesis. Kurz

man begegnet dem Versagen einer allzu genetischen Benennung und wird sich in diesem Falle und auch auf einem Tummelplatz geologisch-genetischer Hypothesen, wie es die Alpen auch nach Heims Geologie der Schweiz noch sind, oder bei Bereisungen fremder Länder, bei Aufnahmen, deren Ziel ein für Fachgenossen brauchbares Inventar des Tatsächlichen ist, doch wohl nach schärferen Begriffen umsehen, welche sich wie oben erörtert an das Ersichtliche, nicht an das Hypothetische anknüpfen lassen und in unserem Falle auf die begriffliche Trennung von Teilbewegung und Kristallisation, auf tektonische Fazies und Mineralfazies, kurz auf petrotektonische Analyse zurückgehen, nicht aber auf derart schwierig trennbare genetische, deskriptiv viel schlechter brauchbare Begriffe wie dislokationsmetamorph und tiefenmetamorph.

Eine weitere Kennzeichnung erfolgt durch Heims (p. 850) Feststellung: „Alle drei Arten der Metamorphose nehmen an Intensität in ihrer spezifischen Art der Umwandlung mit der Tiefe stark zu und werden dadurch einander in ihren Endprodukten ähnlich, zum Teil sogar gleich.“ Abgesehen davon, daß diese „Intensität“ bei näherer Betrachtung eine Sache wird, an welche man schwer einen Maßstab legen kann, solange ihn Heim nicht beistellt, könnte man wirklich nichts Schlimmeres von der spezifischen Art der Umwandlung behaupten, als daß sie durch Zunahme so unspezifisch, so wenig unterscheidend wird, daß Ähnlichkeit bis Gleichheit der Produkte gesteigerter Tiefenmetamorphose, Dislokationsmetamorphose und Kontaktmetamorphose auftritt. Es genügt hier Heims eigene Charakteristik seiner Metamorphosen um den Bedarf nach anderen Begriffen zu erzeugen. Wenn man ferner bedenkt, daß Heim (p. 851) diese Metamorphosen in ihrer von ihm selbst stigmatisierten schlechten Begrenzbarkeit und ihrer Unverwendbarkeit für die Deskription mit den Tiefenstufen Grubenmanns kombiniert, so wird man vielleicht billigen, daß ich ein bescheidenes Begriffsinventar dem gegenüber aufrecht erhalten will, schon um zum Beispiel der Kritik des folgenden Heimschen Satzes nicht alle Wege zu verlegen.

Dieser Satz (p. 855) lautet: Die Abstufungen der Regionalmetamorphose sind in den verschiedenen tektonischen Gliedern nach der gegenwärtigen geographischen und stratigraphischen Lagerung der Gebirgsglieder so verteilt, wie letztere (die Regionalmetamorphose) vor dem Deckenbau war; dagegen ist die alpine Dislokationsmetamorphose der Lagerung im Deckengebäude des jetzigen Alpenkörpers angepaßt. Oder anders ausgedrückt: Die Regional (oder Tiefen)metamorphose ist vorherrschend vortertiär, die alpine(!) Dislokationsmetamorphose aber erst tertiär.

Diesen fundamentalen Satz nun kann man meines Erachtens nicht mehr gelten lassen, wenn es um die Unterscheidbarkeit der Metamorphosen so steht wie aus Heims oben erörterten Worten zu schließen und aus unserer Einsicht, daß die bestimmenden physikalisch-chemischen Variablen für alle drei Metamorphosen vielfach dieselben sind, bekanntlich die kurze Erklärung dafür, daß die Grenzen tatsächlich verschwimmen. Zur weiteren Kennzeichnung führe ich an, daß R. Staub, hierin allerdings von Heim nicht begleitet, aus demselben Begriffsinventar eine zyklische Übereinstimmung der drei Metamorphosen mit orogenetischen

Phasen behauptet, wogegen sich die Einwände, die wir Heim entgegenhalten, entsprechend verstärkt geltend machen: Die Begriffe sind in der Heimschen Definition für derartige Aufstellungen vollständig ungeeignet. Für eine von solchen Aufstellungen unabhängige petrographisch-tektonische Bearbeitung der Alpen habe ich, gewiß als unvollkommenen Versuch, mein Begriffsinventar ausgearbeitet, welches ich hier konfrontiere, damit es wenigstens bemerkt und vielleicht durch ein besseres, noch exakteres ersetzt wird; nicht aber soll es lediglich achtungsvoll zitiert oder umgetauft werden. Die schweizerische petrographisch-tektonische Forschung läßt, abgesehen von derartigen Aufstellungen, wirkliche Ergebnisse, soweit ich von hier aus sehe, derzeit noch stärker vermissen als die Ostalpen, und dies vielleicht solange, bis die obigen Begriffe durch bescheidenere und exaktere ersetzt sind.

Das bahnbrechende ältere Verdienst Heims um die Betrachtung der tektonischen Deformationen habe ich immer dankbar betont, zweifle aber nicht, daß auch für die Schweiz die Zeit gekommen ist, durch neuere petrographisch-tektonische Begriffe und Studien wirkliche Grundlagen für derartige weittragende genetische Hypothesen, wie die Heims und Staubs zu schaffen, und zweifle gar nicht, daß die Schweiz solche Forderungen erfüllen wird und kann, um so mehr als uns im kritisierten Fundamentalsatz Heims über alpine Metamorphosen sehr viel gute Beobachtungen, lediglich in unhalbarer Form resumiert erscheinen. Es wird am Ende des folgenden Abschnitts versucht, an Stelle jener Fassung Begriffe und Hinweise für die Untersuchung einer allgemeinen petrographisch-tektonischen Gesetzmäßigkeit zu setzen.

Ich versuche zunächst noch einigen weniger wichtigen Sätzen Heims eine meiner Betrachtungsweise angepaßte Form zu geben, wobei ich meist nur auf frühere Publikationen verweisen könnte. Statt z. B. zu sagen, daß „ausgeprägt geschichtete“ Gesteine faltbar sind, wäre zu sagen, daß von dieser ausgeprägten Schichtung lediglich das mechanische Moment, die mechanische Inhomogenität des Gesteins durch Flächenscharen geringster Gleitarbeit in Frage kommt, kurz ob das Gestein aus irgendwelchem Grunde (Feinschichtung, ältere Schieferung usw.) „s-Flächen“ oder ob es Lagen verschiedener Knickfestigkeit besitzt. Andererseits kann eine in bezug auf die sedimentäre Komponente X ausgeprägte Schichtung da sein, aber mechanisch belanglos (z. B. Wechsel einer chemischen Komponente des Sediments). Eben weil ferner die vorgefundenen s-Flächen gar nicht Schichtung sein müssen, sondern z. B. bei „Deformation zwischen bewegten Becken“ entstanden sein können, also z. B. in einem vollkommen massigen Gestein, so ist zwar die Schichtung auch meines Erachtens der wesentlichste Faktor für die Entstehung von Faltegebirgen, bemerkenswerterweise aber nicht nötig für die Entstehung von Faltungen. Sobald in einer Gesteinsmasse s-Flächen entstehen, was bei fast beliebiger Deformationen (durch Scherflächenscharen, durch Regelungsphänomene im Kleingefüge usw.) eintritt, so wird sie faltbar und wir könnten beispielsweise aus einem Meteoriten mit Faltung noch nicht auf Schichtung (in gasigem oder flüssigem Medium) schließen, ja es wäre vermutlich ein Gestirn mit Faltenzügen mechanisch möglich,

welche lediglich durch ältere Deformationen in der Rinde vorbereitet und ermöglicht sind.

Die Amplitude der Faltung scheint mir besser denn als Funktion der Schichtenmächtigkeit als Funktion der Knickfestigkeit der betreffenden Schichte zu nehmen, da die Knickfestigkeit nicht nur von der „Feinheit der Schichtung“ (Abstände der s-Flächen), sondern auch vom Materiale, von allen die Teilbewegung innerhalb der betrachteten Schichte beeinflussenden Faktoren (Temperatur, kristalline Mobilisation, Zeit) abhängt. Erst durch diese Rücksicht wird die empirische „Regel der Stauchfaltengröße“, wie ich sie darstellte, verständlich und anwendbar für Rückschlüsse z. B. auf die Erweichung bei der Deformation. Wir sehen ja doch in allen Graden wie die zunehmende Erweichung, zunehmende Teilbewegung innerhalb der gefalteten Schicht die Regel der Stauchfaltengröße aufhebt, bis im Extrem (eines palingen erweichten oder noch primär viskosen Gesteins z. B.) die Abhängigkeit der Faltenamplitude von der Mächtigkeit der betrachteten Schichte ganz verschwindet. Kurz, es bedarf nur dann, wenn nicht „teilweises Fließen“ hinzutritt, „viel weniger innerer mechanischer Leistung, eine Schicht zu biegen als in sich selbst zu stauen“. Es darf eben der ganze Fall nicht mit der Vereinfachung Heims betrachtet werden, wenn man im Verständnis der tatsächlich vorhandenen tektonischen Deformationen und in der Anwendung der Stauchfaltenregel, welche, wie ich hervorhob, von absoluten Maßen unabhängig ist, zu Rückschlüssen sicher gehen, lernen will; was ich für eine wichtige, von mir erfahrungsgemäß erörterte petrographische und tektonische Angelegenheit halte, sehr wert der technischen und mathematischen Behandlung, welche sie durch Smoluchowski und Schmidt erfahren hat.

Einer Einschränkung bedarf auch Heims Annahme (p. 78), daß die Verdickung an der Biegestelle von Falten eine dem Fließen zu vergleichende Bewegung der Teilchen vom Schenkel gegen die Umbiegung hin beweise. Diese Verdickung an sich zeigt gar nichts, als daß der jetzt in der Biegung liegende Teil der ursprünglichen Schicht gegenüber dem Druck (während der Verbreiterung) anders eingestellt war, als der jetzt dünne Schenkel bildende Teil der ursprünglichen Schicht gegenüber ganz demselben Druck (während der Verdünnung). Demgemäß ist die Biegestelle ausweichend in die Breite geflossen und sind die Schenkel, demselben Drucke ausweichend, sich verdünnend geflossen. Ein Materialtransport aus den Schenkeln in die Biegestelle ist hiedurch weder bewiesen, noch im allgemeinen Fall von einiger Bedeutung. In einzelnen Fällen ist er vielleicht möglich, aber solche Fälle sind Gegenstand des Experimentes oder einer beweisenden Beschreibung, nicht aber Gegenstand einer Behauptung ohne Belege.

Zur Ergänzung dessen, was Heim von der Seltenheit der Zugrisse oder Streckungsrisse sagt (p. 80, 85), ist auf deren Häufigkeit in den Ostalpen nördlich der Tauern z. B. hinzuweisen; auch Cloos hat sie (doch wohl nicht als erster?) in deutschen Graniten gefunden. Für das Verständnis dieser in den Ostalpen sehr weit verbreiteten Erscheinung ist für manche Fälle auf das Beispiel des gestreckten Belemniten hinzuweisen, welcher infolge seiner Reibung an dem leichter fließenden

Einbettungsmaterial Zugrisse quer zur Streckung des Ganzen erhielt, welche, wie wir ja auch in den Ostalpen längst und oft genug hervorhoben, ein Ausweichen gemäß dem Druckminimum bedeuten. Es ist nicht zu vergessen, daß solche Zerreißen durch Einspannung in ein leichter Fließendes ebenfalls ein von absoluten Maßen ganz unabhängiges Phänomen darstellt, welches z. B. einer, welcher etwa gestreckte Belemniten im Dachschiefer nicht verstünde und durch Kristallisationskraft erklären wollte, ganz ebensowenig in der Tektonik verstehen wird.

An Stelle der Trennung, zu welcher Heim angesichts des Vergleiches seiner durch „Fließen im festen Zustande“ entstandenen Deformationen und den durch Fließen im Eruptiv entstandenen Deformationen neigt (p. 81, 83), möchte ich folgende Feststellung setzen. Ob eruptiv oder nicht, ob primär noch viskos oder palingen erweicht, ob mit viel oder wenig rupturer Teilbewegung erfolgt — nichts davon kennzeichnet, wie ich gelegentlich erörtert habe, die entstehenden, im engsten Sinne stetig deformierten Formen. In der Natur ergeben (ptygmatische Faltungen) weich werdende Gesteine und fest werdende Gesteine dieselbe tektonische Fazies, wenn sie unter homologen Bedingungen für das Fließen durchbewegt und verglichen werden. Ein Gestein auf dem Wege der Erstarrung fließt eben gleich, weicht gleich aus, zeigt sogar Gefügeregelungen usw. ganz wie ein zweites Gestein, welches auf dem Wege der Erweichung in dem Moment deformiert wird, wo seine Festigkeitseigenschaften denen des ersteren Gesteins entsprechen, worin sich beide Gesteine auf ihren verschiedenen Wegen irgendwo begegnen werden. Es scheint mir wichtiger, diese Einsicht festzuhalten, als vom „Fließen in festem Zustande“ und „fester Fluidalstruktur“ zu sprechen.

Was an Stelle solcher Begriffe wie bruchlose Umformung etwa zu setzen wäre, habe ich vielfach ausgeführt und darf wohl auch an den von mir eingeführten Begriff der stetigen Umformung erinnern, deren Stetigkeitsgrad lediglich durch das Größenverhältnis der teilbewegten Teile zum ganzen Deformierten, also wieder durch keinerlei absolutes Maß gegeben ist. Von bruchloser Umformung, womit von Heim (vgl. p. 93) ja nicht gemeint ist, daß das Gestein derzeit bruchlos, also etwa auch irgendwie verheilt oder neukristallisiert vorliegt, sondern daß es im Kleingefüge bruchlos deformiert wurde, kann man nur im Anschluß an genaueste petrographische Untersuchung mit Hilfe neuerer Begriffe (teilweises Fließen der Blastomylonite usw.) fallweise sprechen.

Den Ausweg aus solchen terminologischen Wirrsalen findet man jederzeit, indem man Deformation des Gesteines und Korndeformation begrifflich auseinanderhält, den Begriff der räumlichen Stetigkeit einer Deformation einführt und die Teilbewegungen kennzeichnet, wie dies hier (s. u.) neuerdings vorgeschlagen und erörtert wird. Man entgeht so der bekannten Verfänglichkeit des Begriffes „fest“ an dessen Stelle man, was das Einzelkorn anlangt, vielleicht schließlich die Unterscheidung von Ordnung und Unordnung im Gitter in den Vordergrund rücken wird, und was Gesteine anlangt, eine ähnliche Unterscheidung, ob die Deformation mit Ordnung oder Unordnung im Gefüge vor sich

ging (Tektonite einerseits — texturlose Mylonite und Intrusiva anderseits).

Hiermit mögen diese Hinweise, welchen Raum zu geben vor allem die Bedeutung von Heims Werk riet, ihr Ende haben, nicht ohne daß ich kurz auf einige mir höchst erfreuliche Übereinstimmungen rückverweise, welche sich in Heims Geologie der Schweiz für von mir vertretene Auffassungen finden. Solche betreffen: daß mechanische Deformation von einem Material in ein anderes möglich ist (Deformationsverglimmerung), daß die Bedeutung der Teilbewegung in Lösung eher überschätzt wurde, daß sich Tektonite auf das zeitliche Verhältnis von Deformation mit Kristallisation untersuchen lassen, daß die Ummineralisierung und Holoblastenbildung mit zeitlich wechselnden geologischen Schicksalen des Gesteins zusammenhängt, wodurch allein schon zeitliche Mineralfolgen in kristallinen Schieferungen gegeben sind („Generationen“), daß Baustile und Bewegungshorizonte unterscheidbar sind u. a. m.

Es wird demnach, auch wenn man meine von Heim recht verschiedene Betrachtungsweise festhält, nie an Berührungspunkten fehlen, vielmehr sind solche gerade für ein petrographisches Studium zu erwarten, welches sich keineswegs von geologisch-genetischen Begriffen in seinen eigentlichen Aufgaben, zu beschreiben und physikalisch-chemisch zu begreifen, kurz, in seiner Selbständigkeit beirren läßt.

II. Tektonite und Klassifikation metamorpher Gesteine.

Von den Begründern der Lehre, welche die „kristallinen Schiefer“ in erster Linie als deutbare Produkte der Tiefe betrachtet, in der sie das zu deutende Gepräge erhielten (kurz Tiefenstufenlehre) standen alle der Schwierigkeit gegenüber, daß sich während des Ausbaues ihrer Lehre der größte bisherige Umbau unserer tektonischen Anschauungen vollzog, der mir gerade hinsichtlich des kristallinen Grundgebirges noch heute nicht abgeschlossen erscheint. Angesichts der Unmöglichkeit, mit einem derartig bewegten und zugleich die induktive Tiefenstufenlehre so tief berührenden Nachbarfache Fühlung zu halten, war meines Ermessens die Zurückhaltung, welche sich etwa Becke im Ausbau der Tiefenstufenlehre auferlegte, für die Haltbarkeit einer „Tiefenstufenlehre“ das Günstigste, während für Grubenmanns sehr ins Einzelne gehendes System der Versuch einer eingehenden Auseinandersetzung mit der Tektonik vielleicht erforderlich gewesen wäre für die induktive Begründung des Systems. Wir finden die Tiefenstufen bei F. E. Sueß schon vorausgesetzt und eine tektonische Theorie (der moravischen Fenster) auf die Voraussetzung der Tiefenstufen gegründet und an Ausnahmen von der normalen Tiefenstufenfolge angeknüpft. Andererseits hat Pentti Eskola in „The mineral facies of rocks“ (Norsk Geol. Tidskr. 1920) mit einer vielfach von der Tektonik glücklich unabhängig gehaltenen Fragestellung, das Problem der metamorphen Gesteine in viel weiterer Fassung zu behandeln begonnen — ich möchte diese Fassung hier nicht mehr etwa Tiefenstufenlehre nennen — und es sind Beckes

Grundlagen mit Eskolas Arbeiten im Wesentlichen vereinbar. (Becke, Zur Facies-Klassifikation der metamorphen Gesteine, T. M. M. 1921, B. 35, H. 5 u. 6). L. c. hat Becke einige Hinweise getan, welche ich auch von meinen Arbeitsgebieten lebhafter tektonischer Durchbewegung aus hier stärker betonen und an meine früheren Arbeiten anschließen möchte. Übrigens erscheint mir Beckes schon in Grubenmanns Lehrbuch eingeführter Begriff, Gesteinskomponenten, die den Gleichgewichtszustand des Gesteins besonders typisch bezeichnen, typomorphe Minerale zu nennen, unentbehrlich und ebenso glücklich scheint es, wie man gerade aus dem folgenden ersehen kann, Gesteine, die aus lauter typomorphen Mineralen bestehen, typomorphe Gesteine zu nennen.

Es ist aus der Literatur ersichtlich, daß das Wort Fazies sowohl als spezifisches unterscheidendes Aussehen, Gepräge eines ansonsten (z. B. in bezug auf die Bildungszeit oder das Ausgangsmaterial) mit anderen Gesteinen gleichzustellenden Gesteins genommen wurde, aber auch für dieses Gestein selber. In diesem Sinne habe ich stets die Ausdrücke Sekundärfazies, Mineralfazies, tektonische Fazies verwendet sowohl für das Gepräge als für das betreffende Gestein direkt, nachdem ich doch das Wort bereits für gleichzeitig aber verschiedenartig gebildete Sedimente, für die Varietäten eines Massengesteins und sogar für kontakt-metamorphe Gesteine bereits in der älteren Literatur vorfand. Als wesentlichste Sekundärfazies der Gesteine in diesem ungezwungenen Sinne betrachte ich also:

1. die sekundäre Mineralfazies als Gesamtheit der bei der Gesteinsveränderung durch Kristallisation oder mechanische Gitterdeformation zustande gekommenen Minerale mit Hervorhebung der hinsichtlich ihrer physikalisch-chemischen Existenzbedingungen am meisten besagenden typomorphen Minerale, aus welchen sich also auch am sichersten Rückschlüsse auf geologische Bedingungen ergeben;

2. die tektonische Fazies, welche durch eine Charakteristik der zu Bewegungsbildern summierbaren Teilbewegungen im Gestein unabhängig von der absoluten Größe der Teile bestimmt ist und mit welcher die sekundäre Mineralfazies zum größeren Teile mittelbar, in den „mechanisch-chemischen Deformationen“ nach meiner Meinung auch unmittelbar zusammenhängt.

Ich habe also absichtlich und vorbedacht das geologisch-genetische Moment in diesen Begriffen auf ein Minimum gebracht und dies z. B., daß ich von Teilbewegung und deren Zeichen und dann erst in zweiter Linie von Kräften spreche, deutlich und mehrfach betont.

Ein genetisches Moment ist im Begriffe der Mineralfazies dann vorhanden, wenn aus einer Reihe bekannter und allgemein anerkannter Merkmale auf die primäre oder sekundäre Bildung der betreffenden Minerale geschlossen wird.

Beim Begriffe der tektonischen Fazies liegt das genetische Moment darin, daß ich in einer Weise, welche ich ausführlich dargestellt habe, aus dem Gestaltlichen des größeren und kleineren Gefüges auf Bewegungen schließe und erst in zweiter Linie aus letzteren auf ihre Ursachen, z. B. auf ein Druckellipsoid. Genau dieselbe Bescheidung habe

ich vorsätzlich und betontermaßen auf die Tektonik im großen angewendet.

Unter sekundärer Mineralfazies eines Gesteins kann man also meines Erachtens ungezwungen, wie ich es auch schon übte, wohl nur die Gesamtheit der mehr oder weniger besagenden Mineralneubildungen verstehen, typomorphe und nichttypomorphe Minerale. Ob diese Mineralfazies Minerale umfaßt, welche sich miteinander im Gleichgewicht befinden, also eine „Mineralfazies“ in Eskolas Sinn ist, das ist Sache einer höchst wichtigen Bearbeitung, welche ja keineswegs jedesmal schon geleistet ist, wenn sich bereits das Bedürfnis geltend macht, eine charakteristische, regional immer wiederkehrende Mineralparagenesis, eine Mineralfazies, rein deskriptiv festzustellen. Gerade um Eskolas scharf gefaßten und wertvollen Begriff vor Verflachung, vor zu häufiger oder zu seltener Verwendung zu bewahren, ist es besser, die Mineralfazies Eskolas als das zu benennen, was sie sind, nämlich als bestimmte Mineralfazies. Sie bedeuten allerdings, solange sich die Bedingungen nicht ändern, eine endgültige Anpassung und sind stabil, aber eben nur solange z. B. keine Durchbewegung mit Änderung der Bedingungen erfolgt.

Eskola versteht unter einer Mineralfazies geradezu eine Gruppe von Gesteinen, welche primär oder sekundär unter so ähnlichen Drucktemperaturbedingungen geprägt sind, daß ihr Bestand an stabilen Mineralen das Gleichgewicht ihrer Elementarbestandteile bei den betreffenden Drucktemperaturbedingungen darstellt.

Daß von diesem Standpunkt aus Massengesteine und Metamorphe „Mineralfazies“ heißen können, ist ein Vorteil. Daß aber die Mineralbestände, welche nicht einem Gleichgewicht entsprechen, aber entweder als Relikte oder als beginnende Generationen oder als Ergebnisse der Durchbewegung oder als Imprägnationen oder als Entmischungsprodukte gerade am allermeisten von der Geschichte des Gesteines aussagen, die „Fazies“ des Gesteines nicht bestimmen sollen, erscheint für den ersten Blick als Nachteil. Durch die „Mineralfazies“ Eskolas erfahren wir nur, daß irgendwelches Drucktemperaturfeld und also dessen geologische Bedingung solange anhielt, daß sich der Elementarbestand ins Gleichgewicht setzen konnte. Das bedeutet also einen Aufenthalt des Gesteins von übrigens unbestimmter Dauer in einer meist durch ein einziges geologisches Ereignis bedingten Situation, also oft eine geologisch besonders ereignislose Zeit im Werdegang des Gesteins, ein Interim. Auf dieses eine geologische Ereignis und auf die Zeit mit konstantem Druck und konstanter Temperatur, das Interim, kann man bestenfalls aus der „Mineralfazies“ Eskolas zurückschließen. Daß man zeitlich nicht hinter die „Prägezeit“ zurückkommt, hat schon Becke l. c. bemerkt.

Nun bedeutet aber jedes Anzeichen von Störung eines Gleichgewichtes (i. e. einer „bestimmten“ Mineralfazies), von Ungleichgewicht eine Änderung der Bedingungen, ein geologisches Ereignis für das Gestein. Es sind also die Ungleichgewichtsmminerale und die Ungleichgewichtsgesteine, welche geologisch mehr besagen, als Eskolas Mineralfazies. Sie lassen im selben Gestein bisweilen mehrere geologisch

deutbare Änderungen anstatt einer einzigen Zeit der Anpassung an ein einziges Ereignis ablesen. So hat sich auch Erdmannsdörfer (N. J. f. M. Beil., Bd. XLVIII) mit Bezugnahme auf Backlund auf den von mir bei jeder Gelegenheit praktizierten Standpunkt der petrotektonischen Analyse gestellt. Gerade angesichts der Ungleichgewichtsminerale kann man sich übrigens denn doch nicht der Tatsache zeitlicher Mineralgenerationen in kristallinen Schiefern verschließen und kann man es auch keineswegs allgemein gelten lassen, daß in den kristallinen Schiefern „alle Bestandteile gleichzeitig in Kristallisation sind“ (Becke l. c.). Glücklicherweise nicht —, wird der Geologe sagen oder der Petrograph, der manche Tektonite begegnet, deren Analoga ich beschrieben habe, um Beispiele für petrographisch-tektonische Analysen zu geben.

Wenn man nun berücksichtigt, daß man als Fazies eines Gesteins denn doch seit jeher das geologisch Bedeutsame am Gestein hervorgehoben hat, was ja auch der stärkste Grund war, den Begriff der tektonischen Fazies einzuführen, so wird man vielleicht nicht geneigt sein, als Mineralfazies eines Gesteins lediglich die geologisch am wenigsten besagenden Minerale desselben zu verstehen, sondern, wie ich es übte, unter den Typomorphen sowohl die Gleichgewichts- als die Ungleichgewichtsminerale.

Als wichtigstes Kennzeichen der Gleichgewichtsgesellschaft hebt Becke (l. c.) die Häufigkeit und Beständigkeit ihres Vorkommens hervor. Bei der von Becke betonten Häufigkeit von Nichtgleichgewichtsgesteinen, besonders „in tektonisch verwickelten Gebieten“ glaube ich, daß man außerdem noch auch die Häufigkeit und Beständigkeit der Ausbildung an zahlreichen Nichtgleichgewichtsgesteinen behaupten kann und sich also doch wohl zuletzt ein anderes Kriterium für Gleichgewichtsgesellschaften suchen muß, ohne etwa diesen wertvollen Begriff fallen zu lassen.

Ohne zunächst die Gleichgewichtskriterien eingehend zu kritisieren, sei daran erinnert, daß in allen festen Gesteinen und selbst in nicht-durchbewegten, unfesten das „Gleichgewicht“ näher zu kennzeichnen ist, je nachdem es für den Fall der Nichtdurchbewegung oder auch für den Fall der Durchbewegung besteht. Vom Studium der Tektonite aus habe ich bereits 1915 (J. R. A.) auf die „Umrührwirkung“ der Durchbewegung verwiesen. Diese kann ein Gleichgewicht der ersten Art (das nur für Nichtdurchbewegung besteht) aufheben, nicht aber ein Gleichgewicht der zweiten Art (das trotz Durchbewegung besteht).

Eben weil Gleichgewicht der ersten Art so selten ist — es ist das ja auch für Massengesteine bekannt und kommt in Eskolas Terminus *armoured relics*, geschützte Relikte, gut zu Worte —, hebt die tektonische Durchbewegung das Gleichgewicht in polymikten Gesteinen so oft auf, bringt das latente Ungleichgewicht zur Geltung, wirkt mit an der „kristallinen Mobilisation“ des Gefüges und zeitigt, kurz gesagt, eine der „Umrührwirkungen“. Faktisch bestehendes Gleichgewicht ist also zunächst überhaupt nicht nur als Funktion des Mineralbestandes zu betrachten, sondern auch als Funktion der Anordnung der Minerale, als Funktion des

Gefüges also. Als solche („Gleichgewicht erster Art“) ist das Gleichgewicht gegen Durchbewegung empfindlich und es werden gegebenenfalls aus den Gesteinen mit Gleichgewicht „erster Art“ die Tektonite mit besonders starker kristalliner Mobilisation, Entmischung, sekundärer Teilbewegung (siehe dieselbe) durch Kristallisation. Auch ist es begreiflich, daß der lebhaften Durchbewegung die Kristallisation des Gefüges in Gesteinen, auf welche ich in früheren Arbeiten verwiesen habe, als eine Erholungspause und Phase faktischer Erstarrung und mechanischer Festigung folgt, wie dies in vielen vorkristallin deformierten Gesteinen (mit überdauernder Kristallisation) der Fall ist.

Wenn man sich also als Geologe im Felde nach Kriterien für Gleichgewichte „zweiter Art“ — als solche sind doch wohl Eskolas Mineralfazies zu verstehen — umsieht, so wird man ganz besonders die durchbewegten Teile des betreffenden Gesteins zu beachten und hiebei wieder das Verhältnis der Durchbewegung zur Kristallisation und Mineralbildung zu analysieren haben. Dies wäre also eine Bedeutung der „unstabilen“ Relikte Eskolas für die tektonische Fazies und eine gelegentliche Bedeutung der tektonischen Fazies für Eskolas Mineralfazies.

Um deutlicher zu machen, wohin das Studium der tektonischen Fazies seinem Stoffe nach innerhalb der heutigen Lehre von den metamorphen Gesteinen zu stehen kommt, kann man davon ausgehen, was die Metamorphose bekanntlich ändert:

A. Die Minerale: 1. Umkristallisieren derselben Minerale. 2. Auftreten dichter oder undichter Minerale aus Mineralen derselben Formel (Paramorphosen). 3. Auftreten dichter oder undichter Minerale mit neuer Formel entweder authigen aus den bereits vorhandenen gebildet oder teilweise bis gänzlich allothigen, mit Stoffzufuhr gebildet.

B. Das Gefüge.

C. Die Gestalt (Form und Einlagerungsverhältnis) des Gesteins wohl immer mit Änderung des Gefüges, oft mit Änderung des Mineralbestandes.

Diese Veränderungen lassen sich beziehen auf Änderungen 1. der Temperatur; 2. des hydrostatischen und gerichteten Druckes; 3. der Lösungsmittel (Menge, Chemismus).

Gerichteter Druck mit Ausweichmöglichkeit — ohne solche Deformationsmöglichkeit bildet er sich vielleicht überhaupt nicht ab — führt zur Deformation mit korrelater Teilbewegung im Gefüge. Diese verläuft, wie bei früheren Gelegenheiten erörtert, verschiedenartig, im engsten Zusammenhange sowohl mit A als mit B und C der obenerwähnten Metamorphosen. Auf diese Teilbewegung im Gefüge sind Kornzerkleinerung, Umrührwirkung in Gesteinen mit latentem Ungleichgewicht (geschützten Relikten Eskolas), viele Entmischungs- und Regulationserscheinungen und die mechanisch-chemische Deformation beziehbar oder sind selbst geradezu Formen dieser Teilbewegung im Gefüge. Es gibt also eine Reihe von Änderungen, welche sich entweder nur oder auch als Teilbewegung im Gefüge fassen lassen und so direkt oder indirekt mit der Durchbewegung des Gesteins zusammenhängen. Diese Fassung als Teilbewegung ist aus dem Gefüge viel unmittelbarer und sicherer ablesbar, als etwa die Beziehung auf ein Druckellipsoid.

Die geologischen Faktoren von welchen die Bildung der metamorphen Gesteine abhängt, indem sie die vorgenannten Faktoren herbeiführen sind: 1. Belastung durch Sedimente, Magmen oder tektonische Transporte; 2. Begegnung mit Magmen, 3. tektonische Durchbewegung.

An diese drei geologischen „Ursachen“ für die Metamorphosen hat sich die Lehre von den metamorphen Gesteinen gehalten, entsprechend dem nächsten Zwecke, der Geologie zu dienen, nicht aber immer zum Vorteil klarer und selbständiger Erörterung der die Metamorphosen unmittelbarer bestimmenden Faktoren. Es entspricht hiebei 1. der geologischen Ursache Belastung ungefähr die Tiefenstufenlehre der kristallinen Schiefer, wie sie Becke, van Hise und Grubenmann ausführlich dargestellt haben.

2. Der Begegnung mit Magmen entspricht die Lehre von den kontaktmetamorphen Gesteinen und deren Übergreifen (Weinschenk) auf Sekundärfazies, welche andere als Tiefenstufen faßten.

3. Der tektonischen Durchbewegung entspricht die Lehre von den Gesteinen mit summierbarer Teilbewegung im Gefüge, von den Tektoniten.

Mehr und mehr erscheint es nun als eine Aufgabe, durch schärfere Trennung von 1 und 3, welche im „Dynamometamorphismus“ chaotisch verbunden waren, die Einsicht weiter auszubauen. Dies ist eine Hauptaufgabe der petrographisch-tektonischen Analyse. Und gerade von hier aus ist Eskolas Betonung bestimmter „Mineralfazies“ in seinem deskriptiv außerordentlich brauchbaren Sinn zu begrüßen. Aber es sind diesen Gleichgewichtsgesteinen (bestimmten „Mineralfazies“), welche auf ein geologisches Interim weisen, die Ungleichgewichtsgesteine als geologisch gleich interessante, als die zweite große Kategorie zur Seite zu stellen, wo es sich um ein System der metamorphen Gesteine überhaupt handelt. Es ist also auch die Betonung der Ungleichgewichtsgesteine (Becke, Erdmannsdorfer) sehr zu begrüßen.

Die Betrachtung des Erstarrungsprozesses schmelzflüssiger Lösungen lehrt, daß das Gleichgewicht aller Komponenten im allgemeinen nicht zustande kommt, daß eine latente Reaktionsfähigkeit der Minerale aufeinander bestehen kann. Minerale aus dem Anfang des Erstarrungsprozesses können als unstabile Relikte (Eskola) verbleiben, von einer Schutzhülle (Eskola) anderer Minerale umgeben. Wird diese Schutzhülle durch Teilbewegungen bei tektonischer Durchbewegung zerrissen, so können Reaktionen zwischen den Körnern eintreten und das latente Ungleichgewicht des Gesteins verringert werden. Es ist anzunehmen, daß Durchbewegung unter konstanten Drucktemperaturbedingungen das latente Ungleichgewicht, welches Massengesteinen innewohnt, durch „Umrührwirkung“ verringert bis aufhebt und auch in dieser Beziehung die Ausprägung des Gesteins als bestimmte Mineralfazies fördert.

Während sich während der Erstarrung ein so wichtiger Faktor wie die Temperatur immer ändert, ist dies während der Belastungsmetamorphose nicht immer der Fall, wohl aber in vielen Fällen tektonischer Transporte mit Durchbewegung.

Im allgemeinen weisen also die bestimmten Mineralfazies auf Belastung oder auf „interimistische“ Durchbewegung bei konstanten

Drucktemperaturbedingungen, ausgesprochene Ungleichgewichtsgesteine auf magmatische oder tektonische Vertikaltransporte.

Sehen wir von den Erstarrungsgesteinen ab, so werden wir Gleichgewichtsgesteine im lang belasteten Grundgebirge kontinentaler Tafeln, Ungleichgewichtsgesteine in tektonisch belebten Zonen, in Faltengebirgszonen insbesondere, zu suchen haben und unter den polymikten Tektoniten.

Nicht nur bei Erstarrungsgesteinen, sondern auch bei polymikten Sedimenten, für deren Komponenten chemisches Gleichgewicht von vornherein unwahrscheinlich ist, ferner bei metamorphen Ungleichgewichtsgesteinen, welche durch geschützte Relikte oder zeitlich unterbrochene Anpassung ihr Ungleichgewicht verraten, fördert Durchbewegung unter konstanten Drucktemperaturverhältnissen bestimmte Mineralfazies. Wo aber mit der Durchbewegung eine Vertikalkomponente tektonischen Transports verbunden ist, besteht Gelegenheit zur Bildung unbestimmter Mineralfazies, auch deshalb, weil die Existenzfelder nicht für alle Minerale gleichzeitig überschritten werden.

Es läßt sich erwarten, daß man sich bei ständiger Beachtung solcher Beziehungen und der verschiedenen Bedeutung von Gleichgewichts- und Ungleichgewichtstektoniten dem eingangs genannten Ziele nähern kann, die Gesteine mehr und mehr mittelbar und unmittelbar auf die Bewegungen der Erdhaut zu beziehen und aus den Gesteinen auf die Bewegungen rückzuschließen, wozu bemerkenswerterweise die sedimentären Fazies früher als die tektonischen herangezogen wurden, die doch direkte, petrographisch-tektonisch analysierbare Funktionen der Bewegungen sind.

In diesem Sinne sind besonders die Zeichen für Ungleichgewicht geologisch bedeutsam. Diese Zeichen weisen auf Änderung von Druck und Temperatur, diese Änderungen kommen durch geologische Änderungen zustande und nach letzteren fragt ja der Geologe. Ungleichgewichtsgesteine lassen aus Relikten und undurchgeführten Kristallisationen vieles aus ihrer Vergangenheit noch ablesen, Gleichgewichtsgesteine lassen sich chemisch-mineralogisch besser klassifizieren, beide mit vielen Übergängen auseinander ableiten. Die unvermeidliche Klassifikation der Ungleichgewichts-Tektonite scheint mir, wie an vielen Beispielen gezeigt, namentlich durch Charakteristik ihrer Teilbewegung und durch ihre Gleitmineralfazies gegeben; ferner durch ihre zeitlichen Mineralgenerationen oft mehr als durch die mehr minder erkennbaren bestimmten Mineralfazies, welche selbst zu Relikten werden.

III. Durchbewegung und Mineralfazies. Symmetrie der Tektonite.

Ein Körper ist nicht fest oder fließend oder plastisch oder spröde, sondern er reagiert unter bestimmten Umständen bei einer Deformation fest, spröde, brüchig, plastisch, fließt etc. Es ist nicht wohlgetan, einem zusammengesetzten Körper irgendein Festigkeitsverhalten als „Eigenschaft“ zuzulegen, da hiemit eine nicht bestehende Konstanz

der betreffenden „Eigenschaft“ suggeriert und darüber durch sprachliches Ungeschick die Abhängigkeit seines Festigkeitsverhaltens von der Temperatur, von der Deformationsgeschwindigkeit, von der Art der Deformation (Richtung der angreifenden Kraft), von vorangegangener Bearbeitung usw. vergessen werden kann. Will man das Verhalten eines Körpers bei Deformation so genau als heute möglich kennzeichnen, so dürfte sich ganz allgemein das Verfahren empfehlen, welches ich für die Kennzeichnung dieses Verhaltens von Gesteinen seit jeher (1911) verwendet habe und welches für die Objekte, mit welchen wir Festigkeitsversuche machen, noch viel besser verwendbar ist: Man kennzeichnet das Verhalten indem man die Teilbewegungen des deformierten Körpers unmittelbar so weitgehend als jeweils möglich kennzeichnet und die oben angedeuteten Bedingungen, unter welchen die Deformation stattfand, soweit sie bekannt sind, mit anführt. Man sagt also aus

1. der Körper wurde mit den und den Teilbewegungen deformiert, und man sagt sodann aus
2. von den Bedingungen, unter welchen die Deformation stattfand, sind *a*) die und jene mehr oder weniger bekannt, *b*) andere aus der Art der Teilbewegungen und der Gruppe *a* erschließbar.

Bei der ersten Aufgabe, für welche ich mit anderen seit 1909 durch genaue Beschreibung tiefentektonisch deformierter Areale und durch petrographische Studien wohl die geologisch wichtigsten, aber sicher noch nicht alle wünschenswerten Beispiele beigebracht habe, ist der Begriff der räumlichen Stetigkeit einer Deformation als einer von absoluten Maßen unabhängigen Eigenschaft, wie ich ihn 1911 betonte, festzuhalten. Die Stetigkeit hängt nur vom Größenverhältnis zwischen dem deformierten Ganzen und seinen zur Deformation korrelat verschobenen Teilen ab, ist also mit Unrecht von den meisten nur auf Gesteine im Dünnschliff oder gar auf Mineralkörner, von anderen nur auf Profile bezogen worden. Gerade darin, daß man diese Relativität festhält, scheint mir die künftige Brauchbarkeit des Begriffes zu liegen. Eine Falte von mehreren 100 m Amplitude, deren Gestein in Teile von mehreren Kubikdezimetern bei der Faltung zerlegt wurde, ist eine stetigere Deformation, als eine geometrisch ähnliche Falte von mehreren 100 μ Amplitude, bei deren Bildung sich Körner von mehreren μ verschoben. Auch unser Auge urteilt so, sobald wir es durch das Mikroskop in die Lage setzen, auch im zweiten Falle die Teilchengröße im Verhältnis zum Ganzen wahrzunehmen. Es kommt in jedem Falle objektiv nur darauf an, ob ein vor der Deformation auf den Körper aufgetragenes Liniennetz nach der Deformation noch zusammenhängend lesbare Linien zeigt.

Als solche Linien verwendet aber das Auge tektonischen Deformationen gegenüber alle Linien im Gestein, deren Geometrie vor der Deformation der Beschauer zu kennen glaubt und deren Verzerrung durch die stetige oder unstetige Deformation er hienach vergleichend beurteilt.

Man hat also bei Angabe der so wichtigen räumlichen Stetigkeit der Deformation auch die Größe des deformierten Körpers anzugeben,

bei Falten welche an und für sich stetige Deformationen sind (keinesfalls deshalb „plastische“), genügt eben bekanntlich die Faltengröße — um das Bild vor Augen zu führen und einen tektonischen Stil ziemlich gut zu kennzeichnen und es ist eine stetige Tektonik, z. B. typische Tiefentektonik, eine solche, deren Umformungen alle oder fast alle stetig im erörterten Sinne verlaufen sind.

Wie oft erörtert, genügt es für eine Fühlung mit den physikalischen Bedingungen der Orogenesis und meist erst von da aus zu unternehmende Schlüsse auf geologische Bedingungen der Orogenesis keineswegs, nur das Moment der räumlichen Stetigkeit der Tektonite zu beachten und etwa mit der Jb. G. B. A. 1921, p. 173 ff., gekennzeichneten Unklarheit zu Worte zu bringen oder wie Lachmann genetisch zu mißdeuten (V. R. A. 1912, Nr. 17).

Es ist auch hiefür wieder nötig, die Teilbewegungen eingehend zu charakterisieren und es schneidet jede weitere Befassung ab, wenn man etwa nicht nur von Festigkeitseigenschaften wie von absoluten Konstanten spricht, sondern nicht einmal unterscheidet und angibt, ob man dieselben (z. B. Plastizität) dem Gestein als Ganzem oder seinen Mineralkörnern beilegt, was deskriptiv und genetisch (in physikalischer, chemischer und sodann geologischer Hinsicht) meist eine ganz und gar verschiedene Bedeutung hat.

Was nun die ausführliche Behandlung dieser unserer ersten Forderung, Kennzeichnung der Teilbewegungen, anlangt, so muß hier zunächst auf die (V. B. A. 1923, Nr. 4) angeführte Literatur verwiesen werden. Sodann aber auf die Ausführungen p. 206 bis p. 212 dieser Arbeit.

Bevor wir auf letztere kleinen Beiträge zu der großen hierin noch zu leistenden Arbeit eingehen, versuchen wir die zweite der petrographisch-tektonischen Grundaufgaben, welche die Bedingungen der Deformation betrifft, zu verdeutlichen.

Wenn uns die dem Experimentator gegebene Möglichkeit, die Bedingungen selbst festzusetzen und zu ändern, nicht gegeben ist, so sind uns bisweilen entscheidende physikalische Bedingungen durch geologische Einblicke bekannt und wir erhalten damit die Gruppe 2 a.

Anderseits kommen uns sowohl die Ergebnisse des Experiments als die in der Gruppe 2 a erhaltenen Einsichten zugute, wenn wir es wagen, aus den Teilbewegungen auf Deformationsbedingungen (2 b) zu schließen.

Von den Bedingungen, unter welchen die Deformation stattfand, sind folgende gelegentlich feldgeologisch erschließbar:

a) Belastung, z. B. Deformation an der Basis von Decken.

Temperatur, z. B. Deformation in Kontakthöfen.

Deformationsgeschwindigkeit, z. B. zeitliche (stratigraphische) Eingrenzung von tektonischen Deformationen; Unstetigkeiten im zeitlichen Ablauf: Risse und Überschiebungen etc. und Flexuren.

Zufuhr von mobilisierenden Agentien, z. B. Kontakthöfe.

Folgende Bedingungen sind fallweise mehr oder weniger sicher erschließbar mit weiterer Zuhilfenahme der Kennzeichnung der Teilbewegungen und der Mineralfazies.

b) Hydrostatischer Druck und Temperatur, z. B. tektonischer Baustil verschiedener Tiefe; räumliche Stetigkeit der Deformation; bestimmte Mineralfazies und deren Irritation im Sinne des Steigens oder Sinkens von Druck und Temperatur: also unbestimmte Mineralfazies, welche unter anderem tektonische Vertikalkomponenten bezeugen. Zeitlicher Verlauf, z. B. zeitliches Verhältnis zwischen Deformation und Kristallisation der einzelnen Minerale. Zeitliche Mineralgenerationen in metamorphen Gesteinen.

Hieraus ergibt sich eine gewisse erste Übersicht darüber, was die genaue Kennzeichnung der Teilbewegungen und Beachtung der Mineralfazies im Vergleich zu bloß feldgeologischen Beobachtungen zu besagen haben. Um dies zu verdeutlichen und vorläufige Umriss für eine systematische Begründung und geologische Ausnützung der Lehre von den Tektoniten der Kritik anheimzustellen, werden hier einige Schlußfolgerungen versucht, welche sich ergeben, wenn man das hier über bestimmte und unbestimmte Mineralfazies Bemerkte und die in früheren Publikationen erörterte Unterscheidung vorkristalliner, parakristalliner und nachkristalliner Durchbewegung des Tektonits festhält und zunächst nur unterscheidet, ob sich die betreffende Durchbewegung auf bestimmte Mineralfazies oder auf unbestimmte Mineralfazies bezieht, beziehungsweise auf Minerale, welche unter Umständen in einem und demselben Gestein entweder einer erkennbaren „Gleichgewichtsgesellschaft“ angehören oder nicht.

Eines aber ist diesem Versuch mit allen Nachdruck voranzustellen. Es scheint mir, daß die Rolle hydrostatischen Druckes ohne Durchbewegung für die Kristallisation von Gesteinen größerer Tiefen noch immer bedeutend überschätzt wird. Wenn Grubenmann (p. 40) sagt: „Im ungestörten Gebirge zeigen auch die ältesten Schichtserien selbst bei großer Überlastung oft nur Anfänge der Umwandlung“, so nehme ich das meinerseits als einen ganz ausreichenden Beleg meiner Annahme, daß hydrostatischer Druck ohne Durchbewegung in seinen Wirkungen hinter hydrostatischem Druck mit Durchbewegung ganz und gar zurücksteht.

I. Die Deformation des Tektonits ist a) vorkristallin, b) parakristallin, c) nachkristallin in bezug auf „bestimmte Mineralfazies“.

a) Es kommen dabei in Frage: Umrührwirkung mit Ausgleich latenten Ungleichgewichts, z. B. Anpassung der Mineralfazies eines Erstarrungsgesteins an eine Tiefenzone oder an einen Kontakthof durch tektonische Durchbewegung. Ebensolche Anpassung eines Sediments mit Ungleichgewicht der Komponenten. Tektonische Transporte mit Vertikalkomponente und folgender kristalliner „Erstarrung“ in einer Pause von Durchbewegung und Transport.

b) Die Deformation unter konstanten Drucktemperaturbedingungen weist auf tektonische Transporte ohne Entführung aus dem Drucktemperaturbereich der bestimmten Mineralfazies. Also z. B. tektonische Transporte und Durchbewegungen ohne Vertikalkomponente.

c) In Frage kommt Deformation, welche rascher verläuft als die Rekristallisation unter den Drucktemperaturbedingungen der betreffenden bestehenden Mineralfazies.

Wurde aber das Gestein korrelat zur Durchbewegung dem Existenzfeld der bestimmten Mineralfazies entführt, so sind außer nachkristalliner Deformation der bestimmten Mineralfazies auch Erscheinungen des Ungleichgewichtes angesichts der Durchbewegung vorhanden.

II. Die Deformation des Tektonits ist a) vorkristallin, b) parakristallin, c) nachkristallin in bezug auf Ungleichgewichtsminerale.

a) Es kommt in Frage: Durchbewegung während des Transports in neue Drucktemperaturbedingungen, in welchen dann erst die Reaktionen der irritierten Minerale ohne weitere Durchbewegung oder in einer tektonischen Pause erfolgen. Ferner auch Reaktionen an instabilen Relikten, deren Hüllen eine temporäre Durchbewegung zerreißt, ohne die Relikte gänzlich auszulöschen.

b) Wie II a), aber ohne tektonische Ruhe während der Reaktionen der irritierten Minerale.

Mechanisch-chemische Mineraldeformationen, welche die Deformationsarbeit verringern.

c) Falls die nachkristalline Deformation die neben bestimmten Mineralfazies erkennbaren Ungleichgewichtsminerale nicht mehr chemisch irritiert, liegt die Frage nahe, ob letztere nicht als erste Glieder einer neuen Gleichgewichtsgesellschaft zu fassen sind, welche auch bei voller Anpassung bestehen geblieben wären, da jedenfalls während der Durchbewegung ihr Drucktemperaturbereich nicht verlassen würde.

Ungefähr nach solchen Richtlinien lassen sich voraussichtlich die schon bei Beschreibung des Tauernwestendes verschiedentlich aus der petrographisch-tektonischen Betrachtung der Tektonite gezogenen Schlüsse als Beginn eingehenderer allgemeinerer Studien behandeln.

Es sollen nun aber auch, was das Morphologische der Tektonitgefüge angeht, frühere Erörterungen weiter ergänzt werden.

Wir betrachten zunächst das Deformationsellipsoid, zu welchem eine beispielsweise durch Färbung bezeichnete Kugelfläche im Körper deformiert wird.

Es treten auf

Es; ein 3achsiges Ellipsoid bei differentialer Gleitverschiebung in s in einer Richtung r . In diesem Ellipsoid wird die in s liegende Querachse zur Schiebung ($\parallel s$ und $\perp r$) als ungeänderter Kugelradius und mittlere Achse des Ellipsoids erscheinen. Die längste Achse und die kürzeste Achse nähern sich der Richtung $\parallel s$ und $\perp s$ mit zunehmendem Betrage der Schiebung. Kurz, es gilt für den Mechanismus der Gesteinschiebung nach s das für die Kristallschiebung nach einer Flächenschar Bekannte. Die Gesteinstranslation oder Schiebung, deren Bedeutung für tektonische Fazies ich durch viele Beispiele von Differentialüberschiebung mit Gleitung in s veranschaulicht habe, unterscheidet sich nicht im Bewegungsbild, sondern etwa darin von der Kristalltranslation, daß sich in Gesteinen meist nur eine s -Flächenschar oder wenigstens keine zweite gleichwertige findet, und darin, daß die „Ausarbeitung“ der Translationsflächen in Gesteinen ein überaus auffälliges und auch vielfach bekanntes Phänomen ist, während über die dauernden Veränderungen eines Kristallgitters durch Translation noch wenig bekannt ist. Es kann also erst in der Zukunft gelingen, die Rolle der Trans-

lation als Ausarbeiter der Gesteins- und Mineralgefüge übersichtlich nebeneinanderzustellen. Die Anregung, das beiden Fällen, der Gesteinstranslation und der Kristalltranslation Gemeinsame zu betonen, liegt schon darin, daß die Kristalltranslation in vielen Tektoniten zur wichtigsten Teilbewegung der Gesteinstranslation wird (z. B. Glimmer der Phyllonite). Schon jetzt ist es heuristisch nicht ohne Wert, wenn wir z. B. „passive Gefügeregelungen“ in Gesteinen als Begleiterscheinung von Schiebungen fassen und daneben jene Fälle von Kristalldeformation stellen, in welchen als Begleiterscheinung der Kristalltranslation, z. B. eines Feldspats oder einer Hornblende, z. B. Glimmer auftreten (bei echter Deformationsverglimmerung). Ein weiteres Gemeinsames beider Fälle liegt, bei aller Anerkennung der Sonderstellung der zwischen Atomen wirkenden Kräfte, doch darin, daß in beiden Fällen anlässlich der Translation eines geordneten Körpers eine Regelung, im einen Falle der Mineralkörner, im anderen Falle der Feinbauelemente des Kristalls, stattfinden kann, u. zw. orientiert im Hinblick auf den Bau des geordneten Körpers und ausgelöst durch die deformierende Kraft, ohne daß eine Temperaturänderung den geordneten Körper gleich stark ändert, wo er mechanisch nicht beansprucht ist.

Das Ergebnis ist im einen Falle der Tektonit, ein mehr oder minder neues Gestein, im andern Falle das dauernd deformierte Kristallgitter, also ein mehr oder minder neues Mineral, u. zw. ein charakteristisch eingestelltes Gleitmineral. In beiden Fällen wird die Teilbewegung durch das früher erörterte Verfahren erschlossen oder dadurch, daß wir, gestützt auf technologische Erfahrungen, aus dem Vorhandensein von Flächen geringster Arbeit auf deren Benutzung während der Deformation schließen. Und es erweist sich in beiden Fällen die Teilbewegung summierbar zur Deformation des Ganzen. Bei der Deformation eines geordneten oder ungeordneten Gesteins scheint sich analog wie bei der Deformation eines geordneten (kristallinen) oder ungeordneten (kolloiden) Minerals eine mechanisch ausgelöste, gesetzmäßige und also mit der Zeit eindeutig deutbare Neuordnung zu ergeben, auch ohne daß die Temperatur anders denn als Konstante mitentscheidet. Dies ist die allgemeinste Fragestellung nach echter Deformationsmetamorphose im genügend scharfen Sinne. Und da es sich bei den struierten Gesteinen, namentlich bei den Tektoniten, um charakteristische Ordnungen handelt und anderseits wohl für jeden Petrographen die hohe Schule für das Studium derartiger Ordnungen überhaupt die Kristallographie hinsichtlich der Gitter sowohl als der Ellipsoideigenschaften ist, so erscheint es nicht überflüssig, diese Schule auch für die Betrachtung geordneter Gesteine nutzbar zu machen und später Parallelen zwischen geordneten Gesteinen und Kristallen noch etwas weiter zu führen.

Weder das Gestein noch der Kristall wird also scheinbar durch Translation (Gleitung in s bei Gesteinen) geändert, wenn man die Sache sozusagen geometrisch schematisch betrachtet. In der Tat bleiben in manchen Fällen fast alle, in anderen Fällen wichtige Eigenschaften des Gesteins sowohl als des Minerals bei Translation erhalten, so z. B. bei weiterer Translation eines Phyllonits, was eben die Beurteilung des Ausmaßes der Translationen in vielen Fällen schwierig macht.

Wenn man die Sache aber nicht nur begrifflich schematisch betrachtet, sondern einerseits auf das für Gesteine auf Grund eingehender petrographischer Studien aufgestellte „Prinzip der Ausarbeitung von s “ Bedacht nimmt, andererseits die Feststellung von reiner Deformationsverglimmerung bei der Kristalldeformation (Sander-J. R. A. 1912) sowie auf die metallographischen Ergebnisse, betreffend Eigenschaftsänderungen durch Kaltbearbeitung (von Kristallen) berücksichtigt, so kann man sagen:

1. Wie der Gesteintranslation als Ausarbeitung der s -Flächen eine ganze Reihe von Änderungen in fast allen Fällen entspricht, so entspricht der Mineraltranslation in manchen Fällen eine Änderung des Gitters bis zur Umstellung in ein neues Mineral.

2. Das durch die Mineraltranslation erzwungene Auftreten von in s eingestellten Gleitmineralien verringert die Reibung in s , erhöht also die Translatierbarkeit des Gesteins wie andere durch die Gesteintranslation bewirkte Ausarbeitungserscheinungen in s .

3. Das genannte, durch die Mineraltranslation erzwungene Auftreten von Gleitmineralen in s läßt sich selbst nicht nur als ein die Translatierbarkeit des Gesteins erhöhender Vorgang, sondern letzten Endes als mittelbare oder sekundäre Differentialbewegung zur Gesteintranslation bezeichnen, wenn man, wie es hier geschieht, auch die Differentialbewegungen, welche nach bis zu einem gewissen Grad eigenen Gesetzen innerhalb der Teile einer Teilbewegung, aber doch der Deformation des Ganzen indirekt zuordenbaren Bewegungen erfolgen, mittelbare oder sekundäre Differentialbewegungen nennt.

Ee; ein zweiachsiges Ellipsoid bei reiner linearer Streckung mit einer Ausweicherichtung, welche längste Ellipsoidachse ist.

Ep; ein zweiachsiges Ellipsoid bei reiner Pressung ($\perp s$) mit lauter gleichwertigen Ausweicherichtungen (in s), welche die längsten Ellipsoidachsen sind, während die kürzeste Ellipsoidachse $\perp s$ steht.

E; ein dreiachsiges Ellipsoid bei einer Beanspruchung aus Streckung und Schiebung; oder aus Pressung und Streckung (= Walzung); oder aus Schiebung und Pressung; kurz bei einer Beanspruchung und Deformation allgemeinerer Art, worin Schiebung, Pressung und Streckung auch im selben Deformationsakt neben- und nacheinander auftreten können. Es zeigt z. B. die längste Achse die Streck- (bzw. maximale Ausweiche-) Richtung; es liegt die kürzeste Achse $\perp s$ und die mittlere Achse $\parallel s$, $\perp$ zur längsten. Auf diesen häufigen, aber schon wegen möglicher Translationen keineswegs allein möglichen Fall bezieht sich die übliche Bezeichnung der drei Ellipsoidhauptschnitte als Längsbruch, Querbruch und Hauptbruch des Gesteins, z. B. eines deutlich gestreckten Schiefers.

Es ist schließlich gegenüber diesen allereinfachsten Fällen nicht zu vergessen, daß die vor der Deformation ins Gestein gedachte Kugel im allgemeinen in einen weniger einfachen Körper als die Ellipsoide deformiert wird, ohne zeitliche Unterbrechung des Deformationsaktes, da sich häufig während desselben Größe und Richtung der Angriffskräfte und der innere Bau des Körpers selbst auf mannigfaltige Weise ändern, indem z. B. die s -Flächen verbogen werden. Wir werden aber z. B. in diesem so häufigen letzteren Falle lediglich den Kugelradius

entsprechend klein zu wählen haben, um den Fall *Es* wieder vor uns zu haben.

Wählen wir unsere Kugel groß und geht sie bei der Deformation nicht in ein Ellipsoid über, so läßt sich aus der deformierten Kugel nicht auf die Differentialbewegungen innerhalb der Kugel schließen. Die Deformation kleinerer Kugeln, mit welchen wir uns die große gefüllt denken, werden der Deformation der großen nicht nur geometrisch unähnlich, sondern auch nur mehr minder schwierig oder gar nicht aus derselben erschließbar sein. Wir haben bei vorausgesetzter Deformation mit unserer großen Kugel keinen eindeutig deformierten Raum umschlossen, können dies aber mit entsprechend klein gewählten Kugeln besser erreichen. Ähnlich dem werden wir in einem größeren Ausschnitt verschiedenartiger Deformation aus einem tektonischen Profil, dem Bewegungsbilde eingeordnet, verschiedene eindeutig deformierte prototype tektonische Fazies finden, deren Studium, wie ich es jederzeit (seit 1911!) praktiziert und betont habe, nur in solchen Zusammenhängen, also an zu tektonischen Deformationen orientierten Schriffen seinen Wert für die petrographisch-tektonische Analyse hat. Es ist das ja die selbstverständliche Grundlage aller von uns publizierten tektonisch ausgewerteten petrographischen Untersuchungen und der praktischen Anleitung meiner Schüler zu solchen Arbeiten.

Es sind damit einige einfache unter Tektoniten typische Fälle von größerer (*Es*, *Ee*, *E*) oder geringerer (*Ep*) Häufigkeit aufgezählt. Sie gestatten eine gewisse Übersicht der Tektonik, d. h. der Gesteine mit summierbarer Teilbewegung, nach dem Bewegungsbild der Teilbewegung. Auch diese Übersicht ist unabhängig von absoluten Maßen der bewegten Teile festzuhalten, wozu bei Erörterung der Stetigkeit einer Teilbewegung oben neuerlich angeleitet wurde. Sie kommt dann der Tektonik und der Petrographie zugute — je nach der Teilchengröße. Wie man derartige geometrische Betrachtungsweisen an Stelle voreiligen Geredes von Kräften und Genesis auch in der Großtektonik setzen kann, hat vielfach Ampferer gezeigt und betont (Bewegungsbild von Faltegebirgen J. R. A. 1906 und viele folgende Arbeiten). Es würde leider viele „Tektoniker“ noch befremden, wenn man bei der Betrachtung und Beschreibung von Gebirgsbauten in der Anwendung der beim Studium von kleineren Formen gewonnenen aber von absoluten Maßen unabhängigen Begriffe so weit ginge, als man mit Vorteil für die Beschreibung kann, da die Petrographie in der Wahrnehmung solcher Dinge denn doch weiter ist, als die meisten Tektoniker.

Wenn wir uns nun hier auf die Kleingefüge beschränken, so ist der obigen Übersicht namentlich beizufügen, daß der Fall *Ep*, welcher nach den meisten Darstellungen die kristallisationsschiefrigen Gesteine beherrschen soll, gegen die anderen Fälle sehr zurücktritt, wie ich durch petrographische Untersuchungen an zahlreichen Tektoniten zeigte.

Wenn wir die Gesteine mit geordnetem Gefüge in Übersicht bringen wollen, so empfiehlt es sich, eine rein geometrisch beschreibende Übersicht vorzunehmen und dabei ähnlich wie bei der Kennzeichnung von Punktgittern auch die Symmetrieeigenschaften hervorzuheben.

Diese Symmetrie der Gesteine läßt sich von zwei Gesichtspunkten aus betrachten. Einmal, indem wir zuerst die Symmetrie der bereits besprochenen Ellipsoide ins Auge fassen. „Ellipsoidsymmetrisch“ in diesem Sinne ist dann jedes Gestein bzw. jeder Tektonit, wo sein Gefüge in einer der Symmetrie des Ellipsoids zuordenbaren Weise texturiert ist, was mit den kristallographischen Körnerachsen nichts zu tun haben muß. Einen zweiten Gesichtspunkt erhalten wir, wenn wir bedenken, daß Gestein bisweilen eine mehr oder minder vollkommene Parallelstellung der kristallographischen Körnerachsen zeigt, eine Gefügeregelung verschiedenen Grades, wie ich sie beispielsweise an Quarztektoniten von berggipfelbildender Mächtigkeit schon vor 10 Jahren beschrieben habe, wie an monomikten Gesteinen aus schieferholden Mineralen längst bekannt ist und ebenso am Gletschereise. Es ist klar, daß ein derartig geregeltes monomiktes Gestein (oder auch Metall!) eine umso vollkommenere Näherung an sein Mineral in bezug auf alle gerichteten und geordneten Eigenschaften (Vektoren und Tensoren) desselben zeigt, kurzgesagt an den Kristall seines Minerals, je vollkommener die Regelung erstens hinsichtlich der Genauigkeit homoachser Stellung oder zweitens statistisch, hinsichtlich der Zahl der geregelten Gefügekörner ist. Es gilt in diesem Falle von den Eigenschaften des Gesteins und ihrer Symmetrie dasselbe, wie für den Kristall seines Minerals. Die Gesteine sind mehr oder minder Kristall geworden, was die Ellipsoideigenschaften des Kristalls anlangt. Und es erübrigt sich so hier eine eingehende Erörterung von Spezialfällen derartiger Ellipsoidsymmetrie h. A. (höherer Art) der Gesteine, welche wir neben Ellipsoidsymmetrie, namentlich beim Studium von Tektoniten, im Auge behalten. Die Ellipsoideigenschaften eines polymikten, aus mehreren Mineralen mit bekanntem Mengenverhältnis*) und Regelungsgrad**) bestehenden Gesteines mit Gefügeregelung setzen sich aus den Ellipsoideigenschaften seiner Minerale zusammen, seine Ellipsoidsymmetrie sozusagen aus den Ellipsoidsymmetrien h. A. des einzelnen für sich zu betrachtenden Minerals. Da die gerichteten (vektoriellen und tensoriellen) „Eigenschaften“ oder besser Reaktionen der Gesteine vielfach (Wärmeleitung, Tunneltemperaturen, Schürfung mit Wellen oder Leitfähigkeit u. a. m.) praktisch von Interesse sind, erscheint die Bearbeitung solcher Zusammenhänge mit dem Endziel gewisse Voraussagen von Schliffen aus machen zu können, angesichts der ungemein zahlreichen geregelten polymikten Gesteine wünschenswert, wobei die Wirkung der Intergranularen zu beachten wäre.

IV. Mechanisch-chemische Deformation der Minerale.

Als „Deformationsverglimmerung“ von Feldspaten habe ich Fälle beschrieben, in welchen nur an den stärkst beanspruchten Stellen der Feldspate — an vorspringenden Ecken oder im Scharnier gebogener Kristalle — ersichtlich korrelat (zuordenbar) zur Spannungsverteilung,

*) Mit Rosiwal's Methoden im Schliiff bestimmbar.

**) Mit Schmidt's Methoden im Schliiff bestimmbar.

bei der Deformation die Serizitisierung erfolgt. Die Serizitisierung stellt in solchen Fällen eine Erleichterung der zur Deformation korrelierten Differentialbewegung dar, welche nicht nur durch Translationen oder durch Verstellungen im Raumgitter (Zwillinge) erfolgt, sondern durch Ausbildung eines Minerals mit leichterem Translatierbarkeit an Stelle des ersten bei voraussichtlich geringer Änderung der Formel.

Der analoge Vorgang scheint mir in einer Reihe von Fällen in Tektoniten eine Rolle zu spielen und einer Erörterung auf Grund der neueren Anschauungen über Raumgitterveränderungen wert. Er bedeutet sozusagen eine zur Deformation korrelierte „passive Gefügeregelung“ im Kristall mit einer Änderung des Raumgitters, welche an Stelle des weniger translatierbaren ein translatierbares, arbeitssparendes Mineral setzt (schieferholde Minerale in schärferer Fassung, „Gleitminerale“). Sehr wesentlich ist für die Auffassung, daß wir heute weitgehende Änderungen des Chemismus bei ziemlich weitgehender Erhaltung von geometrischen Raumgittereigenschaften kennen. Ferner wissen wir, daß es sich bei der Teilbewegung in schiefrigen Tektoniten wesentlich um Gleitung in s handelt und also hinsichtlich der Korndeformation nicht um Beanspruchung auf Spaltbarkeit, sondern um Beanspruchung des Kornes auf Translation, vornehmlich $\parallel s$ (des Schiefers). Ferner ist der Begriff vorbereitender Molekül- (oder besser Gitter)deformationen in einer Vorphase vor der chemischen Umsetzung begründet. Damit ist vorerst rein begrifflich neuerlich die Brücke geschlagen zur Annahme, daß „mechanisch-chemische Deformation“, d. h. eine mechanische Beanspruchung des Raumgitters, gehend bis zu dessen dauernder Deformation, welche eben mit der Bildung eines neuen Minerals korreliert zur Beanspruchung identisch ist, in Tektoniten eine Rolle spielt. Wirkliche dauernde Deformation eines Raumgitters ist eben bereits mechanisch-chemische Änderung oder chemische Deformation in unserem Sinne.

Darauf, daß derartige chemische Deformation als Steigerung der mechanischen bis ins Raumgitter zu fassen ist und beide genetisch zusammenhängen, scheinen mir zwei sonst unverständliche Umstände hinzuweisen:

1. daß die neuen Minerale eben gerade solche sind, welche die Arbeit bei der betreffenden Deformation verringern und mit ihren Translationsflächen entsprechend orientiert sind;
2. daß diese Änderung an den meistbeanspruchten Stellen des Kornes erfolgt; bei einer Temperatur, welche das übrige Korn ungeändert beließ oder gleichsinnig, aber weniger stark änderte, also wesentlich mechanisch bedingt.

Diese beiden Umstände scheinen mir ohne meine obige Annahme „mechanisch-chemischer Deformation“ im oben erörterten Sinne unerklärlich, und ihr Vorhandensein bildet jeweils das Hauptargument für die fallweise Annahme und nähere Diskussion derartiger mechanisch-chemischer Deformationen (bei einer Temperatur, welche ersichtlicherweise den mechanisch unbeanspruchten Teil des Kristalls ungeändert oder weniger geändert ließ, ob sie sich nun selbst geändert habe oder nicht).

Die Gesamtheit dieser wesentlich mechanischen Deformation in Gleitminerale stellt einen Teil der passiven Gefügeregelung des Gesteins vor, einen Vorgang, welcher die auf Reibung im Gestein entfallende Arbeit vermindert, aber einen Teil der Deformationsarbeit auf Neubildung von Mineralen verwendet. Genauerer Studium derartiger Deformationen kann vielleicht wieder einen Teil des begrifflichen Chaos, der „Dynamometamorphose“ ersetzen.

Neben dem Umstande, daß Leptyle aus dem Feinbau eines Kristalls chemisch herauspräpariert (Rinne) werden können, muß der Umstand beachtet werden (Johnsen nach Rinne), daß bei Zwillingsgleitungen die Leptyle gesondert marschieren können. Es scheint mir dann die mechanisch-chemische Deformation im obigen Sinne eine näherliegende Annahme und auch ihre experimentelle Bestätigung zu erwarten. Und wenn Lehmann Beispiele für schiebende Bewegung beim Übergang einer Modifikation (Protokatechusaure) in eine andere gibt, erscheint es nicht mehr unmöglich, eine Modifikation in die andere zu überschieben.

Eben weil andererseits die Leptonen im Kristall nicht kinetisch frei sind, sondern in einem mechanisch anisotropen Netz von Affinitätstensenoren verstrickt, ist es verständlich, wenn mechanische Beanspruchung zu neuen geregelten Feinbauen, d. i. zu neuen Kristallen, nicht aber zu neuen regellosen „Aggregat“zuständen führt. Ist doch selbst schon im Falle viskosen Fließens nicht mehr regelloses, sondern geregeltes Ausweichen im fließenden anisotropen Aggregat so vielfach die Antwort auf mechanische Deformation.

Ein eigens zu behandelndes Kapitel, welches ich an die mechanisch-chemische Deformation im obigen Sinne anreihen möchte, betrifft die mechanische Überführung von kolloiden Tongesteinen in Serizitphyllite. Doch bedürfte gerade dieses Kapitel noch darauf gerichteter Röntgenuntersuchungen, was die Kristallinität und Regelung in kolloiden Tonsedimenten angeht.

V. Tektonische Entmischung. Mittelbare Teilbewegungen.

Tektonische Entmischung im weitesten Sinne liegt überall vor, wo anlässlich einer Gesteinsdeformation Entmischung der mineralischen Komponenten des Gesteins auftritt. Wir haben eine Reihe von hergehörigen Vorgängen vor uns, welche dem Maße nach von mächtigen gefüllten Gängen in einem Gestein bis zu den feinsten verheilten Haarrissen seiner Körner, zur Füllung „tektonischen Porenvolumens“ verschiedensten Ausmaßes (was Größe und Gesamtraum des Porenvolumens anlangt) führt. Wenn wir nun wieder vom absoluten Maße der Erscheinung absehen, so finden wir eine hier zu erörternde Möglichkeit, die hergehörigen Erscheinungen begrifflich und manchmal nachweislich einzuteilen. Diese geht von der Frage aus, ob die Füllung eines vorher gebildeten Hohlraumes oder eines mit der Füllung ab statu nascendi wachsenden Raumes stattgefunden hat oder ob die entmischten Stoffe gemäß ihrer Beweglichkeit an Orte mit geringerem allseitigen Druck wanderten, wie dies ebenfalls wieder in den verschiedensten Ausmaßen

zu beobachten ist; so in den druckgeschützten Augenwinkeln der Feldspate von Augengneisen (Streckungshöfe Beckes), in den Innenseiten unter dem herrschenden Druck gebogener, gefalteter Gesteinslagen, seien dieselben unter dem Mikroskop untersuchte Quarzite oder Lagen mächtiger Ausmaße, welche anlässlich der Faltung eine vollkommen analoge Anreicherung aus dem Gestein entmischer, bisweilen nutzbarer Minerale erlebten.

Abgesehen auch von diesen Fällen läßt sich noch ein anderer finden, welcher als mechanisch-chemische Deformation eben erörtert wurde. Indem wir nämlich beachten, ob der Transport der entmischten füllenden Stoffe in Lösung erfolgte oder ob bei der Deformation eines einzelnen Kristallkorns, z. B. bei dessen Biegung bei einer konstanten Temperatur oder bei einer Temperaturänderung, welche die bei der Deformation unbeanspruchten Teile des Kristalls stabil läßt eine der mechanischen Kräfteverteilung angepaßte Änderung des Raumgitters mit Ausscheidung von Atomen oder ohne solche erfolgt. Es erfolgt in diesen Fällen die Entmischung mehr oder weniger bloß innerhalb des Raumgitters, ähnlich wie dies Tammann z. B. an Legierungen gezeigt hat, und es ist Sache der Übereinkunft, ob wir hier noch von Entmischung sprechen, wenn keine Abwanderung von Atomen nachweislich ist. Man könnte den Fall als interne Entmischung der Minerale isolieren, was auch der außerordentlichen und ganz besonderen Bedeutung dieses Falles der „mechanisch-chemischen Deformation“ für die Tektonite am besten gerecht wird. Noch eine vierte Art der Bewegung von Atomgruppen im Anschlusse an die Deformation des Gesteins ist hier anzuführen: die Rekristallisationsbewegung, welche sicher oft ohne Entmischung erfolgt. Die Atomgruppen bewegen sich hierbei allerdings frei, insofern, als ihre Wege nicht unmittelbare Teilbewegungen zur Deformation des Ganzen sind; so z. B. bei Warmreckung oder Glühen eines kaltgereckten Metalles. Man wird diese Bewegungen also nicht schlechthin als Teilbewegungen zur Deformation bezeichnen. Aber man kann darauf hinweisen, daß auch diese sozusagen an Umwegen reiche Bewegung der Teilchen das Kleingefüge der neuen Form des Ganzen anpaßt. Und darauf, daß den Teilchen bei dieser Bewegung im Gefolge der Deformation zwar ihre Wege von Wärme und molekularen Richtkräften (vielleicht in manchen Fällen auch noch von gerichteten Drucken und elektrischen Stromrichtungen) vorgezeichnet sind, aber innerhalb der von der Deformation mehr oder weniger deutlich vorgezeichneten Räume. Die Atomgruppen sind so frei wie Gefangene, die sich in einer Zelle bewegen dürfen, deren Form weitgehend durch die Deformation des Körpers bestimmt ist (Abbildungskristallisation). Es ist dies vielleicht am deutlichsten, wenn Rekristallisation schon vor Überschreitung der Elastizitätsgrenze eintritt. Folgt sie aber auch erst später, so ist sie auch in diesem Falle eine durch die Deformation des Ganzen (und Wärme) bedingte und in diesem Sinne derselben korrelierte Bewegung; wenn man will eine mittelbare Teilbewegung zur Deformation, gewissermaßen ein mehr oder weniger verspätetes Nachfließen besonderer, nicht nur durch die Deformation vorgeschriebener Art. Bei dieser Gelegenheit sei angemerkt, daß sich auch die Warmreckung als eine mechanische

Deformation mit folgender Kristallisation betrachten läßt. Es gibt, abgesehen von Flüssigkeiten, wohl überhaupt nur „Kaltdeformation“ mit nachfolgender Kristallisation, wie ich dies längst für alle beobachtbaren Fälle „vorkristalliner“ Gesteinsdeformation zugrunde legte. Es ist also nicht unverfänglich, solche Kategorien, wie etwa kaltgereckte, warmgereckte und etwa Gesteine mit Nachglühwirkung nebeneinander zu stellen. Was man für die petrographisch-tektonische Analyse aus dem Gestein entnehmen kann, ist, bei welchen Mineralen die Kristallisation (und also deren oft geologisch deutbare Bedingungen) die Deformation überdauerte. Ich stehe nach wie vor auf dem Standpunkt, daß damit viel die besseren und eingehenderen Unterscheidungen schon sehr lange getroffen sind als durch Übertragung der metallographischen, dem Bearbeitungsversuch angepaßten Begriffe „kaltgereckt“ und „warmgereckt“.

Jeder sogenannten Warmbearbeitung des Kornes geht also sozusagen — wenn auch vielleicht nicht einmal bis zur Elastizitätsgrenze — eine Kaltbearbeitung des Kornes voraus, auf welche, lediglich schneller oder weniger schnell, Kristallisation folgt. Vielleicht könnte man auch bei manchen metallographischen Überlegungen, statt Warmreckung und Kaltreckung zu koordinieren, von den für die Gesteinsuntersuchung benützten Begriffen ausgehen: mechanische Deformation ohne oder mit rascherer oder langsamer Kristallisation, welche mit oder ohne Temperaturänderung erfolgt. Fällt die Deformation nicht unter diese Fälle, so war sie nicht die Deformation fester Körner.

Wir kehren nun noch einmal zum ersten Gesichtspunkt, Füllung vorgezeichneter Hohlräume, zurück und sehen von den Dimensionen der Füllungen, welche übrigens mit dem Grad der Entmischung des Ganzen nichts zu tun haben, ab. Wir denken uns ferner die Zeit, in welcher die Füllung wirklicher oder wachsender Hohlräume durch Entmischungsprodukte erfolgt, zuerst der Zeitspanne nach gleichgültig, sodann lassen wir die vielleicht eingeschlichene Forderung fallen, daß sich in allen Fällen irgendeine beobachtete Füllung unmittelbar an eine beobachtete Entmischung und diese unmittelbar an eine tektonische Durchbewegung des Ganzen anschließe. Wir haben damit den allgemeinsten Fall definiert, in welchem wir gleichwohl noch die Wanderung entmischter Stoffe und die Füllung als mittelbare oder unmittelbare Teilbewegung zu einer tektonischen Deformation betrachten; wobei aber auf die Unterscheidung als mittelbare und unmittelbare Teilbewegung Gewicht gelegt wird. Mittelbare oder unmittelbare Teilbewegung in Lösung ist dann jeder Transport im Gesteinskörper, welcher eine wirkliche oder virtuelle durch den Deformationsakt bedingte Lücke füllt, gleichviel ob letzteres sogleich oder später erfolgt. Es wird vielleicht später gelingen, dem eine exaktere Fassung zu geben. Der Vorteil dieser Fassung ist, daß sie auch mittelbare Zusammenhänge der Füllung mit der Deformation und Entmischung nicht übersieht, sondern stets im Auge behält. Als Teilbewegungen anschaulich werden solche mittelbare Teilbewegungen (z. B. nachträgliche Kluftfüllungen), wenn wir den ganzen Vorgang mit richtig gewählter Verkürzung der Zeit betrachten, z. B. so, als wären 1000 Jahre wie 1 Minute.

Wir betrachten nun noch die Bedeutung des Umstandes (vgl. Tammann, Zeitschrift für anorg. u. allg. Chemie 1922, p. 303), daß Silikate nicht als Moleküle in Lösung gehen, für die Teilbewegung in Lösung und die tektonische Entmischung von Silikatgesteinen.

Mit der einen Tatsache, daß die Lösungen von Silikaten nicht Moleküle der Silikate, sondern deren Atome und Atomgruppen transportieren, und mit der zweiten Tatsache der ungeheuren Verbreitung tektonisch deformierter Silikatgesteine ist die Wahrscheinlichkeit gekennzeichnet, mit welcher wir auf Mineralneubildungen anläßlich der Teilbewegung in Lösung treffen. Es ist in hohem Grade unwahrscheinlich, daß sich ein tektonisch entmischtes und gelöstes Silikat rekonstituiert, da im allgemeinen die Bedingungen schon anläßlich der tektonischen Durcharbeitung andere geworden sind. Die Teilbewegung in Lösung bei den Silikaten führt also im allgemeinen zu neuen Mineralen und die Lösung stellt die Gelegenheit dar, bei welcher sich Silikate auf die neu gegebenen Bedingungen einstellen.

Bei Lösung sind also Silikate empfindliche Indikatoren geänderter Bedingungen.

Wenn wir in einer tektonischen Fazies dieselben Silikate nach der Durchbewegung neugebildet finden, welche vor der Durchbewegung da waren, so ist der erste Gedanke nicht der an eine Rekonstituierung der Silikate aus Lösung, sondern der, daß überhaupt keine Lösung, also keine Teilbewegung in Lösung stattfand.

Haben wir, diesen Gedanken prüfend, das Gefüge untersucht, so ist die zweite Aufgabe, den Chemismus der betreffenden Silikate zu beachten. Ein Silikat wird ein um so empfindlicherer Indikator im eben erwähnten Sinne sein und um so weniger Aussicht haben, sich aus seiner Lösung zu rekonstituieren, 1. je enger sein Existenzbereich ist und 2. je mehr sein sogenanntes „Molekül“ in Lösung zerfällt, oder etwas ungenauer gesagt, je komplizierter es gebaut ist. Mit dieser Forderung stimmt z. B. die Erfahrung, daß sich z. B. SiO_2 selbst so leicht aus Lösung wiederherstellt und unter den durch tektonische Bewegungen weitgehend geänderten Drucktemperaturbedingungen im Gesteinsinnern eine nur durch das Auftreten von Modifikationen variierte Rolle als Füllung tektonischer Porenvolumina, als Verheiler von Rupturen spielt. Andererseits läßt sich, was ich lediglich um eine systematische Beachtung dieser Frage anzuregen erwähne, der Fall geradezu deskriptiv als eine Norm aufstellen, daß die tektonisches Porenvolumen füllenden Minerale einfachere Verbindungen sind als die Lieferanten der Lösung. Man kann diese Regel, daß die verheilenden Minerale einfachere Verbindungen sind, an Silikaten sowohl als an Karbonaten eine große Rolle spielen sehen, wenn man statistisch überblickt, womit die Rupturen von Kalknatronfeldspaten, von Granaten, von Dolomiten usw. verheilt sind. Einfachere Verbindungen treten als Rupturenverheiler in tektonisch entmischten Blastomyloniten an Stelle von komplizierteren. Es ist dies eine genauere und konkretere Fassung der bekannten Feststellung, daß in geringeren Tiefen der „Regionalmetamorphose“ „einfachere Verbindungen an Stelle komplizierterer treten“.

Es läßt sich bei dieser Fassung verstehen, daß die Mineralparagenesis im tektonischen Porenvolum des Kleingefüges, die verheilende Mineralgeneration eines Blastomylonits dieselbe oder eine ähnliche ist wie die Verheilung und Füllung größerer Rupturen (der Gänge). Es führt also von Königsbergers Studien über die Paragenesis der Gangminerale der Weg unserer Untersuchung zu den Haarrissen im Gesteine und endlich zur Füllung rupturer Intergranularen, z. B. der Blastomylonite oder, hier vielleicht besser zu sagen, der Blastotektonite (vgl. Sander I. R. A.).

Die Drucktemperaturbedingungen eines Tektonits, in welchem rupturale Teilbewegung neu auftritt, werden im allgemeinen andere sein als zur Zeit, welche vor der rupturrellen Deformation liegt und eben eine Zeit ruhiger Kristalloblastese oder allgemeiner Warmreckung nahekommender tektonoblastischer Deformation war. Es ist mit diesem Satze und dem Satze, daß die Silikatlösungen keine Moleküle der abgebauten Verbindung führen, bereits gegeben, daß Rupturen mit neuen Mineralen verheilen (einfachste Verbindungen ausgenommen), was keine Selbstverständlichkeit ist. Daß nun diese neuen verheilenden Minerale, welche von vornherein ja hochkompliziert sein könnten, im allgemeinen einfachere Verbindungen sind, das ist eine von den Theoretikern der Metamorphose ausgesprochene Erfahrung.

Haben wir nun die Minerale einer tektonischen Fazies auch noch von solchen Gesichtspunkten aus betrachtet und finden dieselben Minerale nach der Durchbewegung neugebildet, welche vorher vorhanden waren und darunter auch komplizierte Verbindungen, so ist der Schluß gerechtfertigt, daß die Durchbewegung eben ohne Änderungen der Drucktemperaturbedingungen erfolgte. Es werden rupturale Teilbewegungen fehlen. Es werden unterscheidbare Mineralgenerationen sowohl stofflich als der Gestalt nach häufig fehlen, was durchaus kein Kennzeichen kristalliner Schiefer überhaupt ist. Wir werden neugebildete Minerale aus stofflich gleichen älteren und damit unseren Gesteinstypus in der gegebenen Auffassung überhaupt nur schwierig, etwa in Fällen mit vergleichbarer interner und externer Reliktstruktur, feststellen können. Wir gelangen von den vollkristallinen durchbewegten Gesteinen großer Tiefen bis in Gebiete, in welchen die Nachbarschaft von Magmen den Chemismus der neu gebildeten Minerale bestimmt, ohne daß diese im allgemeinen als Verheiler oder Füller tektonischen Porenvolumens auftreten.

VI. Streckung an Gesteinsgrenzen.

Was die Zugrisse anlangt, so ist bei der Diskussion der einzelnen Fälle immer nach dem mechanisch anders reagierenden Nachbargestein, welches das zerrissene Gestein nicht notwendig allseits umschließen muß, zu suchen. Man wird eine unter den betreffenden Deformationsbedingungen besser geflossene unzerrissene Masse G_1 als Nachbar- oder Einbettungsmasse für das bei gemeinsamem Ausweichen zerrissene Gestein G_2 finden. Wenn man nun darangeht, den Fall zu erörtern, so hat man vor allem die Reibung R_g an der Grenze der beiden Gesteine (welche keine scharfe zu sein braucht!) in Betracht

zu ziehen. Damit die Zerreißung zustande kommen kann, muß die Reibung an der Grenze größer sein als die Zerreiungsfestigkeit von G_z (Z_z)

$$R_g > Z_z$$

R_g ist kleiner oder höchstens gleichgroß wie die Festigkeit von G_f (F_g)

$$R_g \leq F_f.$$

Es ist also $F_f \geq R_g > Z_z$.

Die Reibung an der Grenze liegt zwischen den Festigkeiten der beiden Gesteine.

Dieser Umstand bestimmt, daß das eine Gestein zerreißt. Die Distanz der Zerreiungsklfte nimmt ab mit der Zunahme von R_g innerhalb der eben gegebenen Grenzen. Sie kann also um so kleiner werden, je größer F_f im Vergleich zu Z_z ist. Da wir in manchen Fällen, z. B. im Falle der zerrissenen Belemniten, die Zerreiungsfestigkeit des Belemniten messen und mit ziemlicher Sicherheit seinem Z_z zur Zeit der fließenden Deformation seiner Einbettungsmasse gleichsetzen können, so wird die Angelegenheit dem Experiment und einer quantitativen Behandlung einigermaßen zugänglich, welche sich mit der nötigen Vorsicht auch auf sorgfältig gewählte großtektonische Beispiele übertragen läßt.

Es ist nämlich in diesem Falle und in analogen Fällen die Zugfestigkeit F_f jedenfalls größer als die bestimmte Z_z gewesen. Wir finden sozusagen von der Natur eingebettete Kontrollmastbe. Die Auffindung und unerläßliche petrographische Untersuchung derselben steht dem petrographischen Tektoniker zu. Eine Schwierigkeit liegt nach meinen bisherigen Untersuchungen von Gestein- und Streckungsrissen zunächst darin, daß auch G_z eine Zeitlang unzerrissen mitgestreckt wurde.

Wenn wir aber den Vorgang nach den angedeuteten Umrissen eben nur von dem Moment an betrachten, wo Zugrisse auftreten, so dürfen wir wohl für die Bestimmung von Z_z nicht nur einen Belemniten, sondern auch manche Gesteine verwenden und deren Z_z in der Streckachse bestimmen. Da der Vorgang in der Natur unter Bedingungen stattfand, welche das Nachbargestein fließen machten, so ist anzunehmen, daß einige dieser Bedingungen auch G_z im selben Sinne beeinflussen. Die eingehende Diskussion solcher Bedingungen für Gesteine muß andernorts an die mechanische Technologie angeschlossen werden. In den meisten Fällen dürfen Deformationszeit und Wärme als Größen im Vordergrund stehen, deren Wachsen fließendes Nachgeben begünstigt. Sie sind gewiß später in die Betrachtung einzuführen, hier aber genügt die Feststellung, daß wir G_z in der Zerreißmaschine ohne solche Einflüsse deformieren und es fragt sich, ob Z_z größer oder kleiner ausfllt als für die Natur, also beim Bestehen genannter Bedingungen. Anders gesagt: Ist die Zerreiungsfestigkeit für ein und denselben Körper größer oder kleiner als seine Zugfestigkeit, wenn wir ihn unter Bedingungen deformieren, unter welchen er fließt.

Was die Deformationszeit, die Plötzlichkeit der Beanspruchung anlangt, so ist anzunehmen, daß bei rascherer Deformation auch bei Gesteinen Z_z kleiner wird und daß Wärme durch Vermeidung der inneren Reibung die Zugfestigkeit und Z_z herabsetzt. Wenn wir also annehmen, daß in der Natur langsamer — also Z_z vergrößernd — und wrmer — also

Z_z verringernd — deformiert wurde, so müssen wir zu einem Urteil über das Verhältnis dieser beiden Einflüsse zu gelangen suchen, ehe wir unsere im Laboratorium bestimmte Z_z für den Naturvorgang einschätzen können.

Ist letzteres aber gelungen, so scheint es nicht aussichtslos, aus den Zusammenhängen zwischen Z_z des Maßstabes (d. i. G_z), den Distanzen der Streckungsrisse und Z_f die bei der betreffenden tektonischen Deformation tätigen Kräfte innerhalb gewisser Grenzen absolut zu messen.

Ein gewisser Einblick in das Verhältnis der Festigkeiten zu einander ist aber durch das Erörterte schon gegeben und aus jedem Gestein mit Streckrissen zu entnehmen. Diese Einblicke sind mehr petrographischer Natur. Betrachten wir zunächst zwei monomylete Gesteine, welche gemeinsam gestreckt wurden, z. B. die langgestreckten Hornsteinspindeln im Hochstegenmarmor der Tauernhülle. Weder Kalk noch Hornstein ist zerrissen.

Die Reibung an der Grenze beider (R_g) war kleiner oder gleich der inneren Reibung des Kalkes (R_k) bei der Deformation und sie war größer als die innere Reibung des Hornsteines (R_h) bei der Deformation. Die Deformationsbedingungen waren also derart, daß die Beziehung

$$R_k \geq R_g > R_h$$

bestand, also auch

$$R_k > R_h.$$

Der Hochstegenmarmor wurde also unter Bedingungen deformiert, bei welchen die innere Reibung des Marmors beim Fließen größer war, als die des Hornsteins.

Daß es solche Bedingungen überhaupt gibt, ist die durch das Naturobjekt erwiesene Tatsache.

Aus dem Gefügebild des Objektes ergibt sich dessen vor-kristalline Deformation für den Quarzit. Das heißt, die kristalline Mobilisation des Gefüges überdauerte jedenfalls die Deformation, wobei es offen bleibt, ob diese letztere vor der kristallinen Mobilisation oder mehr oder weniger gleichzeitig, aber von der kristallinen Mobilisation überdauert vor sich ging. Aus der mechanischen Unversehrtheit des Gefüges, welche sowohl Marmor als Hornsteingranit zeigen, ist dieser Schluß wegen der bekannten hohen Translatierbarkeit des Kalzits nur für den Quarzit zu machen.

Wir sind also einer kristallinen Mobilisation für den Quarzit gewiß.

Nun sind zwei Erklärungen dafür möglich, daß die innere Reibung des Quarzites unter die des Marmors sank.

- a) Entweder es war dies durch die kristalline Mobilisation während der Deformation ermöglicht,
- b) oder es erfolgte die Deformation des Quarzites unter rupturer mylonitischer Teilbewegung mit nachheriger Kristallisation.

Zwischen a) und b) kann nun die petrographische Untersuchung entscheiden helfen. So kennen wir als Kriterium für b) Regelungserscheinungen in Quarzgefügen. Die petrographische Untersuchung des vorliegenden Falles wurde in anderen Zusammenhängen bereits durchgeführt (I. R. A., 1915, p. 611) und hat ergeben, daß die passive

Quarzgefügeregelung keine Rolle spielt, daß während der Deformation*) das Quarzgefüge kristallin mobilisiert und wahrscheinlich im Marmor keine Druckleitung möglich war.

Wir machen also die Annahme α , nämlich daß die Umkristallisation des Hornsteins während der Deformation seine innere Reibung kleiner machte, als die des umschließenden Marmors.

Von den beiden Bedingungen Druck und Temperatur mag Druck die innere Reibung für Kalzit und Quarz gleichsinnig beeinflussen, die Temperatur aber irritiert den Feinbau der Kieselsäure mehr als den des Kalziumkarbonats (wenn CO_2 nicht entweichen kann). Möglicherweise also ist die Deformation in der Nähe der Übergangstemperatur zwischen α und β Quarz erfolgt. Die Überlegung wurde jedoch nicht wegen dieser Frage, deren sichere Beantwortung hiemit ja noch ganz und gar nicht gegeben ist, bis hieher geführt, sondern als Beispiel für den Gang derartiger Überlegungen, welche sich den einzelnen Fällen mannigfaltig anpassen lassen, z. B. im Falle das eine der gemeinsam gestreckten Gesteine zerrissen ist oder deutliche tektonische Entmischungserscheinungen zeigt.

Es wäre, wenn man, wie für die meisten Betrachtungen erlaubt ist, Streckung im Ausweichemaximum gegenüber einem Umschließungsdruck gleich Zug in derselben Achse setzt, also anzuführen, daß wirkliche echte Zugwirkung bei Einspannung eines Gesteins neben ein leichter fließendes auftreten kann und vielfach auftritt. Es braucht lediglich das eine Gestein leichter zu fließen als das zweite, aber dennoch fester zu bleiben (d. h. mehr Spannung aufzunehmen) als das zweite gegen Zug.

Ferner tritt ein Unterschied im Verlauf der Deformation zutage, je nachdem ein Zugversuch mit Einspannung an den Enden vorliegt oder Ausweichen im linearen Druckminimum, wenn wir beidemale die Grenze der Gesteine mit verschiedener innerer Reibung betrachten. Es kann nämlich nur im zweiten Falle eine Verbiegung der Grenze auftreten.

VII. Zur Deutung geregelter Gefüge.

In der nun folgenden Betrachtung sollen frühere Studien namentlich durch den Nachweis und die Erörterung der Deutbarkeit geregelter Gefüge optisch zweiachsiger Kristalle ergänzt werden. Im folgenden Abschnitte wird dann eine Anschauung über den Vorgang der mechanisch erzwungenen Gefügeregelung bei translatierenden Kristallen in Umrissen entwickelt. Die konoskopische Untersuchung bezeichnender Präparate im einfarbigen Licht zur Illustration des betreffenden Abschnittes mußte angesichts des ungenügenden Instrumentars des Innsbrucker Instituts vorläufig unterbleiben.

Eingehende Befassung mit den Erscheinungen der Regelung von Kristallitengefügen ist, wie das Folgende lehrt, bei den Petrographen weit früher erfolgt als bei den Metallographen, da den ersteren die

*) Im betreffenden Falle war die untersuchte Deformation Faltung und Ausbildung von Clivage im Hornstein.

optischen Methoden dienstbarer waren. Seitdem aber „Röntgenographische Bestimmung von Kristallenordnungen“ (Polanyi, Die Naturwissenschaften, 1922, Heft 16; mit zitierter Literatur) möglich geworden ist, hat die Untersuchung dessen, was wir lange Gefügeregeln nennen, lebhaft eingesetzt, im Dienste der Technologie sowohl als selbständig. Man wird vielleicht nicht ganz ohne Bedauern auch hiebei sich eines Hinweises Tammans (Aggregatzustände 203) erinnern, daß „einschlägige Ergebnisse von Gebieten, deren Bearbeiter kaum je in Beziehungen zueinander stehen, deshalb diesen Bearbeitern oft unbekannt bleiben.“ Ein Einblick in die l. c. zitierte Literatur ergibt auch außer dem Grundthema Gefügeregeln zu unterscheiden und zu untersuchen, viele Möglichkeiten gegenseitiger Anregung im einzelnen, so z. B. wenn man Polanyis Feststellung, daß sich die dichtesten Netzebenen in kaltgereckten Drähten quer zur Streckachse stellen, mit meiner Fassung der Quarzgefügeregel vergleicht oder wenn Kirchner (Ann. der Phys. 1922, Nr. 17, p. 74) von Metallen Fälle beschreibt, welche vollkommen der von mir beschriebenen Abbildungskristallisation durch Kaltreckung geregelter Quarzgefüge entsprechen.

Wegen der neuerlichen Betonung dieser Arbeitsrichtung, wegen derartiger Anklänge und weil eine allgemeinere Besprechung der Regelung nach Ellipsoideigenschaften vielleicht ein gewisses Interesse für sich hat, wurden die folgenden Erörterungen zusammengestellt.

Trener hat (I. R. A. 1906, p. 469) in allen Schliften einer 15 km langen Quarzitlage jene Anordnung der Quarzkörner $\alpha' || s$ gefunden, welche ich später gemäß meiner Einsicht, daß es sich um ein Phänomen von größter Verbreitung in den verschiedensten Gesteinen handelte, dem ersten Beobachter zu Ehren als Trenersche Regel bezeichnet habe, unter Hinweis darauf, daß die Trenersche Regel $\alpha' || s$ eine besondere Einzelercheinung der von mir als Quarzgefügeregel zusammengefaßten räumlichen Orientierung der Quarzkörner darstellt. Eine Erklärung des Phänomens hat Trener meines Wissens nicht versucht und es keineswegs als Regel ausgesprochen „daß die intensiven Gefügeregelungen bei Kaltdeformation der Kristalle auftreten“ (vgl. Schmidt, Sitzber. Ak. d. W. 1917, p. 535), vielmehr lediglich auf die Unerklärlichkeit der Erscheinung durch Speziess Wachstums-gesetz des Quarzes oder das Rieckesche Prinzip hingewiesen. In den Arbeiten Tsch. Min. Mittlg. 1911 und 1915 und I. R. A. 1912 habe ich die Angelegenheit der erzwungenen passiven Gefügeregelung hauptsächlich für Quarz, aber auch auf andere Minerale, abgesehen von schieferholden, hinweisend behandelt. Und zwar habe ich die ungemeine Verbreitung der Quarzgefügeregel in Tektoniten erstmals nachgewiesen, übrigens bereits mit Hervorhebung des Umstandes, daß die Trenersche Regel $\alpha' || s$ keineswegs die einzige faktisch nachgewiesene und geometrisch bedingte Erscheinungsform der Quarzgefügeregel im Schliff ist und daß die Quarzgefügeregel auch in Gesteinen ohne Spur vom Kataklase wahrscheinlich „kristallin abgebildet“ zu beobachten ist. Ferner habe ich das ganze Phänomen der Quarzgefügeregel als einen Sonderfall passiver Gefügeregelung überhaupt in die Literatur eingeführt und auf das Auftreten in Tektoniten mit rupturer Teilbewegung im Gefüge und anlässlich

derselben hingewiesen, was die Genesis angeht. Es wurde ferner (1915 Tsch. Min. Mittlg.) darauf verwiesen, daß Herr Dr. Max Pernt die Bearbeitung einiger für das Regelungsphänomen wesentlicher geometrischer Fragen übernommen hatte. Während ich zur Beobachtung, meiner Aufgabe gemäß, die Methoden verwendet hatte, welche verschiedene Grade der Regelung in kurzer Zeit erkennen und also in einer großen Anzahl von Gesteinen zugleich mit deren Beschreibung im petrographisch-tektonischen Bilde meiner geologischen Aufnahmegebiete die Quarzgefügeregel feststellen ließen, unternahm es Schmidt (Sitzb. Ak. d. W. 1917), durch mühsame und sorgfältige Untersuchungen von Korn zu Korn, welche er so wie ich nicht nur an rupturellen Tektoniten, sondern auch an akataktischen Gesteinen ausführte, die von uns erhobene weite Verbreitung der Erscheinung zu prüfen und, wenn ich recht verstehe, ohne Widerspruch zu bestätigen. Zugleich aber wurden von Schmidt (l. c.) bei dieser Gelegenheit meines Erachtens sehr glückliche und dankenswerte Methoden für die Untersuchung und Darstellung bei statistischen Untersuchungen an Kristallkorngefügen eingeführt, Methoden, welche nicht nur kristallinen Schiefen zugute kommen mögen, sondern wie alles Derartige die Lehre von den geregelten Gefügen überhaupt mitbegründen halfen. Da Schmidt einzelne Schiffe untersuchte und noch keine Diskussion der Frage anschloß, was das Regelungsphänomen im Schiffe bezüglich der Orientierung der Körner im Raume aussagt — eine Frage, deren Erörterung im folgenden versucht wird —, so ergeben Schmidts Studien noch nicht „das betreffende Gesetz des Quarzgefüges“, wohl aber sehr gute quantitative Darstellungen der im betreffenden Schiffe vorhandenen Regelungsphänomens, sowohl nach dem statistischen Grade (im Sinne dieser Arbeit) als nach dem Genauigkeitsgrade (Abweichung von der häufigsten Einstellung von α'), auch in Fällen, in welchen nach Schmidt die Regelung ohne Statistik nicht mehr sichtbar ist. Ferner hat Schmidt geregeltes Kalzitgefüge nachgewiesen und Vorzugsorientierung an Querschnittiten festgestellt.

Was nun die Verwendbarkeit von α' und γ' zur Orientierung des Korns im Raume angeht, so möchte ich Schmidts Zusammenfassung (p. 538) zunächst ergänzen: Einerseits sind auch bei optisch Einachsigen die Auslöschungsrichtungen im Schiffe keine Richtungen, deren einer eine kristallographische Richtung eindeutig zugewiesen ist. Dies ist nur für das gemessene ϵ (nicht ϵ' !) der Fall, welches in c liegt. Andererseits läßt sich auch bei optisch zweiachsigen Mineralen mit α' und γ' arbeiten. Denn auch bei optisch Zweiachsigen ist mit der Festlegung von α' und γ' im Schiffe nur ein gewisser Freiheitsgrad für die Bewegung der Indikatrix und damit des Korns verbunden, also das Regelungsphänomen im Schiffe für die Kennzeichnung der Regelung im Raume brauchbar und grundsätzlich derselbe Weg wie für die optisch Einachsigen, wenn auch schwieriger betretbar, wie ich bereits (Tsch. Min. Mittlg., 1915) andeutete. Mithin sind Schmidts Methoden auch für optisch Zweiachsige unverloren, worauf hinzuweisen eben Anlaß zu dieser kritischen Anmerkung war.

Endlich möge noch eine Bemerkung zum dritten Verdienste der Schmidtschen Arbeit, seiner Deduktion des zahlenmäßigen Mobilisations-

faktors h angefügt werden. Da übrigens schon Jahre vor dem Kriege das Wort Mobilisation als ein in seinem unmittelbaren Wortsinne unentbehrlicher Terminus in das Gefügestudium eingeführt war, ist eine engere Begrenzung desselben Wortes zunächst wohl abzulehnen. Es läßt sich aber mein älterer Begriff und Schmidts Verdienst wahren, wenn wir etwa von h als der Schmidtschen Mobilisationszahl sprechen. Schmidt faßt diese Mobilisationszahl als eine Funktion aus „Anreiz zur Orientierung“ (ins Optimum der Azimute von α') und „Widerstand dagegen“. Es ist hierbei zu bedenken, daß der „Anreiz zur Orientierung“ sich auf die Quarzkörner bezieht; so nach Schmidt (p. 534) und so nach meiner Auffassung derartiger Vorgänge in der zit. Lit. Die beobachtete und in den Diagrammen dargestellte Orientierung ist aber zunächst nicht die der Quarzkörner, sondern die ihres $\alpha' = \omega$, also eine Orientierung, welcher die Orientierung der Quarzkörner nicht eindeutig, sondern mit der (I. R. A., 1912) erwähnten Bewegungsfreiheit, Rotation des Kristalles um ω als Achse, zugeordnet ist.

Bei dieser Rotation kann der Kristall Stellungen einnehmen, welche im Schliff zwar insgesamt ω ins Optimum orientiert zeigen, aber zunächst ob ihrer sonstigen Verschiedenheit nur einem hiedurch sehr charakterisierbaren „Anreiz zur Orientierung“ A_1 zuordenbar wären. Es gilt nun erst zu beurteilen, ob tatsächlich ein Anreiz zur Orientierung A_1 besteht, welcher mit der Einstellung von ω ins Optimum befriedigt ist, ohne sich um die sonstige Orientierung des Kristalls zu kümmern, oder ob, was mir von vornherein wahrscheinlicher scheint, ein Anreiz zur Orientierung A_2 besteht, welcher erst mit der Einstellung der Kristalle, also mit einer genaueren Kornorientierung als sie die Regel ω ins Optimum verlangt, befriedigt ist. Ich habe (I. R. A., 1912) die Gründe erörtert, welche in den betreffenden Fällen tatsächlich zur Annahme von A_2 führen. Diese Fälle sind aber nicht alle vorkommenden, sondern es scheint z. B. bei Streckung auch A_1 aufzutreten (l. c.).

Wenn ich nun das auf Grund der Mobilisationszahl von Schmidt entworfene deduktive Diagramm mit einem statistischen Diagramm decke, so scheint mir dies begrifflich eine Auffassung der Mobilisationszahl h als Funktion von A_1 (und Widerstand) zu involvieren, nicht aber eine Auffassung von h als Funktion von A_2 (Schmidts Definition), was für eingehendere Untersuchung und die Weiterbildung des Begriffsinventars von Belang ist. Es ist also zur jeweiligen Definition von h nötig, festzustellen, ob A_1 oder A_2 vorliegt, die Einstellung nur von ω oder die viel genauere Einstellung von c , was, wie ich l. c. erörterte, durch gewisse Überlegungen oder durch zwei zueinander geneigte Schlitze zu entscheiden ist.

Legen wir bei Einachsigen durch den Mittelpunkt der Indikatrix alle möglichen Schnitte, so zeigt deren jeder bekanntlich die Schwingungsrichtung und Größe von ω . Bei einer bestimmten Lage dieser Richtung ω (festgelegt in Beziehung zu einer Geraden σ im Schliff) ist die Lage des Kornes nicht ganz frei, nicht ganz bestimmt. Das Korn hat eine gewisse Pendelfreiheit um seinen Mittelpunkt, welche mit der fixierten Lage von ω vereinbar ist. Die Lage des Kornes ist frei insofern, als seine c -Achse in einer Ebene $\perp \omega$ rotiert, bestimmt insofern, als c nur

in dieser Ebene rotieren darf. Ist beispielsweise s eine Bezugsebene $\perp$ auf die Schliff-(Zeichen- oder Schnitt-)Ebene und σ die Schnittgerade der beiden eben genannten Ebenen, so gilt:

1. Steht $\omega \perp \sigma$, so liegt c in s ,

2. liegt $\omega \parallel \sigma$, so liegt c in der Ebene, welche sowohl auf σ als auf der Schliffebene normal steht (also z. B. durch die Augennachse des Betrachters $\perp \sigma$ gelegt ist).

Sowohl im Fall 1 als im Fall 2 lassen sich die isotropen Schnitte für die Kornlage $c \perp$ Schlifffläche ausscheiden und es läßt sich beurteilen, ob ihre Anzahl der Wahrscheinlichkeit oder einer besonderen Ursache entspricht (vgl. Grengg, Zeitschr. f. wiss. Mikroskopie, 31, 1914. Sander, I. R. A., 1912, p. 256 ff.).

In beiden Fällen (1 und 2) nehmen wir nun an, daß die betreffende Lage von ω für einen beliebigen, also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit für jeden Schnitt $\perp s$ bei Betrachtung mit dem Gipsblättchen sichtbar werde. Es fragt sich dann, ob diesfalls die Freiheit der Lage von c nicht geringer werde.

In Fall 1 erhält damit c keine nähere Bestimmung. Wir können, bis wir die Zahl und Wahrscheinlichkeit isotroper Schnitte mit in Betracht ziehen, nur sagen: $\omega \perp \sigma$ bedingt c in s . Ob in diesem Fall eine Regelung der c Axen in s vorhanden ist (Faser), ist unter anderm überprüfbar, wenn man beachtet, ob die isotropen Schnitte ($\perp c$) in zwei verschiedenen Schnitten $\perp s$ gleich häufig sind.

In Fall 2 aber wird die Lage von c durch unsere obige Annahme bestimmter:

Wenn in einem beliebigen Schnitt $\perp s$ $\omega \parallel \sigma$ liegt, so gilt $c \perp s$.

Dies läßt sich leicht veranschaulichen: Ich kann die c -Achse eines Korns mit $\omega \parallel \sigma$ dem Betrachter entgegenneigen. Hierbei bleibt $\omega \parallel \sigma$ für den betreffenden Schnitt, nicht aber für einen andern Schnitt, der nur sozusagen das Korn von der Seite zeigt und nicht für einen beliebigen Schnitt. Zeigt also ein beliebiger Schnitt oder zeigen zwei Schnitte $\omega \parallel \sigma$, so gilt $c \perp s$.

Zeigt ein Körnergefüge $\omega \parallel \sigma$, so stehen dessen Körner mit $c \perp s$.

In beiden Fällen (1 und 2) ist die Beachtung der isotropen Schnitte und das Studium von Schliffen $\parallel s$ ein gutes Mittel, die räumliche Lage der Körner festzustellen. An Quarz, als einem praktischen Beispiele, habe ich eine derartige Betrachtung (I. R. A., 1912, p. 256 ff.) ausführlich behandelt.

Hier möge nun eine Erörterung der Regelung Zweiachsiger versucht werden. Anlaß hierfür ist ganz wie im ersten Falle, daß sich geregelte neben unregelmäßigen Gefügen tatsächlich auch bei Zweiachsigen beobachten lassen (wie ich Tsch. Min. Mittlg., 1915, mitteilte), auch abgesehen von den Fällen heterometrischer Körnerformen und schieferholder Minerale. Die Frage lautet: Was läßt sich aus dem gemeinsamen Steigen und Fallen zweiachsiger Körner mit dem Hilfspräparat (z. B. Gips) hinsichtlich der räumlichen Lage dieser Körner entnehmen?

Es läßt sich hierbei häufig an die Verhältnisse bei Einachsigen anknüpfen. Und es ist auch hier häufig gut für die Anschaulichkeit, die Frage in bezug auf ein einzelnes Korn zu formulieren: Welche Körnerlagen sind

möglich, wenn α' und γ' hinsichtlich Bezugsgeraden σ , beziehungsweise der Bezugsfläche s eine bestimmte Lage haben? Bezogen auf die Indikatrix lautet die Frage: Welche Lagen des dreiachsigen Ellipsoids ($\alpha \beta \gamma$) sind möglich, wenn in einem Schnitt α' und γ' in bezug auf σ (s) festgelegt ist?

Es wird hier versucht, die Erörterung dieser Frage auf dreifache Weise zu fördern:

1. Durch eine einleitende Betrachtung der Schnitte des Indikatrix analog der Betrachtung bei Einachsigen.

2. Durch Betrachtung der konoskopischen Interferenzfigur als Übersicht möglicher Kornlagen im Gefüge und des Verhaltens dieser Kornlagen im parallelen Licht zwischen + Nikols mit und ohne Hilfspräparat.

3. Durch eine analytisch-geometrische Untersuchung (Dr. Pernt) der Lagen eines dreiachsigen Ellipsoids, bei welchen Regelungserscheinungen im Schliff denkbar sind.

I.

Man kann zunächst $\alpha \beta \gamma$ als Rotationsachsen betrachten und fragen, ob die tautozonalen Schnitte der Zone α , Zone β und Zone γ einerlei Verhalten in bezug auf die Orientierung von α' und γ' gegen die Bezugsgerade σ zeigen. Dies läßt sich sehr leicht anschaulich prüfen, wenn wir das Indikatrixellipsoid der Reihe nach bei seinen Achsen $\alpha \beta \gamma$ erfassen und von einem Schirm mit σ und mit den parallel perspektivischen Schattenrissen der Indikatrix rotieren. Wir erhalten bei Rotation um α einerlei Regel für alle tautozonalen Schnitte, $\alpha' \parallel \sigma$; bei Rotation um γ einerlei Regel für alle tautozonalen Schnitte $\gamma' \parallel \sigma$. Rotieren wir aber um β , so finden wir unter den tautozonalen Schnitten zweierlei verschiedene Lagen von α' (bzw. γ') zu σ . Finden wir bei Rotation bis zum Schnitt $\perp$ zur optischen Achse $\alpha' \parallel \sigma$ so finden wir bei weiterer Rotation bis zum Schnitt $\perp$ zur anderen optischen Achse $\gamma' \parallel \sigma$. Dieser letztere Fall ist, was die Wahrscheinlichkeit seines Auftretens unter allen tautozonalen Schnitten der Zone β anlangt, proportional $\sqrt{}$ dem Achsenwinkel des Minerals.

Nach dieser ersten Übersicht des Verhaltens der optischen Hauptzonen ergibt sich analog zur Betrachtung der Einachsigen die Frage, was die Regel $\alpha' \parallel \sigma$ besagt, wenn sie an zwei beliebigen Schnitten des um O pendelnden Kornes (oder an zwei beliebigen Schnitten $\perp s$ durch das Korngefüge) auftritt. Die Regel $\alpha' \parallel \sigma$ besagt, daß (bei ganz analoger Betrachtungsweise wie für die Einachsigen s. o.) γ (nicht γ' !) $\perp s$ steht oder aber — und hier liegt der Unterschied von den Einachsigen — daß $\beta \perp s$ steht, bezw. daß die optische Achsenebene selbst in s liegt und außerdem, daß die Bisektrix γ von der Augenachse des Betrachters um weniger als den Achsenwinkel des Minerals abweicht. Es wird also, abgesehen von besonderen regelnden Ursachen, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Körner $\beta \perp s$ (unter den Körnern $\alpha' \parallel \sigma$) geringer sein als für die Körner $\gamma \perp s$ und eine Funktion des Achsenwinkels.

Die Regel $\gamma' \parallel \sigma$ besagt, wenn sie an beliebigen Schnitten $\perp s$ durch das Korn (bzw. Gefüge) auftritt, bei der Mehrzahl der Kornlagen (bzw. Körner), daß α (nicht α') $\perp s$ steht oder, bei der Minderzahl, daß $\beta \perp s$ steht, bzw. die optischen Achsenebene in s liegt.

Nennen wir die Kornlagen mit der optischen Achsenebene in s „ $s(\alpha\gamma)$ “ so läßt sich sagen:

Sowohl die Regel $\alpha' \parallel \sigma$ als die Regel $\gamma' \parallel \sigma$ (im beliebigen Schnitt $\perp s$ oder in 2 verschiedenen Schnitten $\perp s$) gestattet eine Orientierung der Indikatrix des Minerals und damit, wenn die optischen Verhältnisse des Minerals bekannt sind, des Kornes zu s und σ .

Es läßt sich aber im allgemeinen in beiden Fällen ($\alpha' \parallel \sigma$, $\gamma' \parallel \sigma$) annehmen, daß s ($\alpha\gamma$)-Körner mit dabei sind, in der Minderzahl gegenüber den anderen, solange nicht besondere (fasernde) Regelungsursachen mit auftreten. Ist letzteres nicht der Fall, so wird der bloßen Wahrscheinlichkeit nach folgendes gelten:

Die Beteiligung von $s(\alpha\gamma)$ -Körnern wird bei der Regel $\alpha' \parallel \sigma$ für negative Minerale größer sein als für positive;

Bei der Regel $\gamma' \parallel \sigma$ für negative Minerale kleiner als für positive Minerale.

Je kleiner der Achsenwinkel des Minerals ist desto mehr nähern wir uns den Verhältnissen bei Einachsigen.

Hiebei werden bei optischen negativen Mineralen
für $\gamma' \parallel \sigma$ die $s(\alpha\gamma)$ -Körner geringer an Zahl (bis 0),
für $\alpha' \parallel \sigma$ die $s(\alpha\gamma)$ -Körner um so zahlreicher.

Bei optisch-positiven Mineralen werden
für $\gamma' \parallel \sigma$ die $s(\alpha\gamma)$ -Körner bedeutender an Zahl,
für $\alpha' \parallel \sigma$ die $s(\alpha\gamma)$ -Körner um so seltener (bis 0).

Ganz analog zu den bei Einaxigen besprochenen Verhältnissen (I. R. A. 1912 bes. 256 ff.) können die $s(\alpha\gamma)$ -Körner im Schlicke weniger häufig oder häufiger sein als der bloßen Wahrscheinlichkeit ohne besondere zweite Regelung (Faserung) entspricht. Und es ist diesfalls die zweite Regelung besonders im Schlicke $\parallel s$ zu studieren.

II.

Für unsere Frage (welche Lagen der Indikatrix sind möglich, wenn in einem Schnitt α' und γ' in bezug auf die Gerade σ festgelegt sind) läßt sich statt der Indikatrix die Einheitskugel mit den Skiodromen (hier als Sk. bezeichnet) zuerst an Stelle der Indikatrix für die eben durchgeführten Erörterungen mit Rotation von Sk. verwenden, sodann Sk. durch ein quadratisches Netz gesehen, und das Interferenzbild, namentlich dessen Isogyren. Beide hat bekanntlich insbesondere Becke für andere Zwecke der petrographischen Untersuchung ungemein nutzbar gemacht. (Denkschr. k. Ak. d. W. 75. Bd., p. 64 ff.)

An der Sk. werden für Einachsige die Meridianskiodromen mit m , die Breitenkreisskiodromen mit b bezeichnet und ebenso für Zweiachsige, deren spitze Bisektrix dabei in mancher Hinsicht sozusagen an Stelle der optischen Achse Einachsiger tritt.

Wir betrachten zunächst Sk. als Vertreter des Einzelkorns, dessen Verhalten im parallelen pol. Licht interessiert. Es ist für dieses Verhalten

des Kornes also nur das Verhalten in der Bildmitte der parallel projizierten Sk. entscheidend, das Verhalten in der Richtung durch Bildmitte und Auge.

Es lassen sich so mit der Sk. alle in I besprochenen Fälle beweisend veranschaulichen.

So sehen wir leicht für Einachsige, daß bei $c \perp s$ $b \parallel \sigma$ ist für alle Schnitte der Zone c .

Bei Neigung von c dem Betrachter entgegen bleibt $b \parallel \sigma$ bestehen, bei jeder anderen Pendelung von c verschwindet die Regel $b \parallel \sigma$, bzw. es tritt bei gleicher Neigung aller Körner ein anderes „Optimum“ (Schmidt) σ' auf, usf.

Wir können nun zuerst fragen, bei welchen Stellungen von Sk. (an Stelle des Kornes gedacht) bei konoskopischer Betrachtung die Bildmitte dunkel bleibt oder anders gesagt eine dunkle Barre durch die Mitte des Interferenzbildes geht, wobei dann entweder b oder $m \parallel \sigma$ ist, wenn wir σ einer Nikolschwingung parallel stellen.

Gehen die Barren durch den Mittelpunkt der Interferenzfigur, so hat der Kristall eine Lage, in welcher er im parallelen Licht auslöscht. Was das für eine Lage hinsichtlich seiner optischen Bezugsflächen ist, läßt sich innerhalb gewisser Grenzen aus dem Interferenzbild selbst bekanntlich erkennen. Es fragt sich nun: welche Schnitte zeigen im Konoskop eine durch die Mitte laufende „zentrale“ Barre (Z) und bedeuten also Auslöschstellungen des Kornes mit b oder $m \parallel \sigma$ (|| einem Nik.)?

Bei Einachsigen zeigen bekanntlich Z alle Schnitte $\perp c$ und alle Schnitte aus Zonen, deren Achse $\perp c$ steht und mit einer Nikolschwingung zusammenfällt. Bei Zweiachsigen zeigen Z (B_1 sp. Bis. B_2 stumpfe Bis. N optische Normale) die Schnitte der Zonen B_1 , B_2 , N , wenn diese Richtungen als Zonenachsen mit einer Nikolschwingung zusammenfallen (also $\parallel$ oder $\perp \sigma$ stehen).

Die Schnitte schief zu den drei Symmetrieebenen der Sk., bzw. Indikatrix in manchen Fällen, in welchen Z schief zu den Nikolschwingungen läuft (worauf Beckes Methode zur Unterscheidung Einachsiger und Zweiachsiger in schiefen Schnitten fußt).

Es ergibt sich mithin, daß auch Schnitte schief zu allen drei Symmetrieebenen der Indikatrix Zweiachsiger in geregelten Gefügen mit auftreten können. Es war also die in I durchgeführte Übersicht, wenn auch instruktiv, so doch nicht ausreichend, um uns mit allen Kornlagen bekannt zu machen, welche im Schliff α' , bzw. $\gamma' \parallel \sigma$ zeigen können.

Wir versuchen deshalb noch auf eine andere Weise, Isogyren, Interferenzbild und Skiodromenkugel für die Aufgabe, die Optik geregelter Gefüge zu erörtern, heranzuziehen, indem wir, wie eingangs erwähnt, die Interferenzfigur als Übersicht des Verhaltens verschiedener Kornlagen des betreffenden Minerals betrachten. In dieser Hinsicht wird hier abermals mehr eine geometrische Veranschaulichung und Erörterung in Umrissen als eine lückenlose mathematische Darstellung versucht, welche letztere entsprechend dem seit den jüngeren röntgenographischen Gefügestudien (Polanyi u. a.) gestiegenen Interesse an Gefügeregelungen voraussichtlich folgen und auch die Analyse der Beobachtungen an Lehmanns flüssigen Kristallen fördern wird, wenn es mehr und mehr

gelingt, die den verschiedenen Interferenzbildern „optisch korrelaten Kristallitenanordnungen“ (s. u.) darzustellen. Möge also dieser Versuch eine Anregung sein, seine Lücken anderen Zwecken entsprechend zu ergänzen und die Betrachtungsweise auf analoge Zusammenhänge zwischen der räumlichen Anwendung anisotroper Teilchen und ihrer Gesamtwirkung für parallele und konvergente Wege auszudehnen.

Welche Körnerlagen (des betreffenden Minerals) gestattet das Interferenzbild $\perp c$ eines Einachsigen in bezug auf das Verhalten im parallelen pol. Licht zwischen + Nik. zu überblicken? Denkt man den Kristall aus beliebig kleinen Kristallen ($a, b, c \dots$) zusammengesetzt, so läßt sich leicht veranschaulichen, daß die konische Durchstrahlung auf einen Blick nebeneinander dieselbe Übersicht ergibt, welche wir erhalten, wenn wir $a, b, c \dots$ an ihren Strahlen gespießt und diese Strahlen mit dem festgespießten Differential $a, b, c \dots$ in die optische Achse des Betrachters gedreht denken. Bei derartiger Betrachtung sämtlicher Radian der konischen Durchleuchtung und Annahme einer weiten Apertur des Durchleuchtungssystems ergibt sich, daß wir im Konoskop annäherungsweise eine geordnete Übersicht aller möglichen Kornlagen bezüglich ihres Verhaltens im parallelen pol. Licht zwischen + Nik. erhalten. Das dem Interferenzbild optisch korrelate Kristallitenaggregat ist, wie aus der Beobachtung bekannt, ein radialstrahliges Kristallitenaggregat, welches bekanntlich in der Tat schon im p. p. Licht dieselben Isogyren ergibt, wie dasselbe Mineral im Konoskop $\perp c$ und ebenfalls alle optisch differenten Kornlagen aufweist. Alle Rotationen um die c -Achse, ausgeführt an $a, b, c \dots$, ändern das Bild im p. p. Licht ebensowenig, als folgerichtigerweise die Rotation um die c -Achse (bei Drehung des Tisches) dasselbe Bild, entstanden durch konische Beleuchtung, ändert.

Ein radialstrahliges Aggregat muß sich unter gewissen Bedingungen derart konoskopieren lassen, daß sich für größere oder kleinere Bereiche wieder das Bild des Minerals im p. p. Licht zwischen + Nik. ergibt. Angemerkt sei auch, daß einige der im p. p. Licht von Lehmann gewonnenen Bilder (vgl. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig, Engelmann, 1904) auf eine Anordnung der Differentiale schließen lassen, welche dem Interferenzbild zweiachsiger $\perp B$ optisch korrelat ist, worauf bei späterer Gelegenheit zurückzukommen ist.

Es ergibt sich also auf einen Blick aus den Barren der Inferenzfigur, welche Bewegungen der Kristall im Korngefüge machen darf, ohne aus der Bedingung b oder $m \parallel \sigma$ zu fallen. Es wird die schon geometrisch gegebene optische Wirkungslosigkeit der Rotation um c anschaulich. Und es gestattet die diagonale Einschaltung eines Hilfspräparates, das Steigen und Fallen ganzer Quadranten zu beobachten, womit festgestellt ist, daß additive und subtraktive Wirkungen bei einer Abweichung c von σ bis 45° noch denkbar sind, was in der Fragestellung im III. Teil dieser Erörterung zum Ausdruck kommt.

Stellen wir σ einer Nikolschwingung parallel, so sehen wir, daß der Kristall sich nur in einer einzigen Ebene normal zur Schnittebene drehen kann, ohne aus der Bedingung $b (\omega) \parallel \sigma$ zu fallen. Denken wir dann aber die Ebene s durch einen beliebigen Schnitt $\perp s$ geschnitten, so wird $\omega \parallel \sigma$ nur noch von den Körnern mit $c \perp s$ erfüllt usw.

Es sind auf diese Weise die in I erörterten Beziehungen für beliebige Schnitte $\perp s$ aus dem Interferenzbild abzulesen: $\omega \parallel \sigma - c \perp s$; $\omega \perp \sigma - c \parallel s$.

Die optisch korrelaten Kristallitenordnungen zu den Interferenzbildern schief und parallel c geschnittener Einachsiger können hier außer Betracht bleiben, da schon das Interferenzbild $\perp c$ das Verhalten sämtlicher optisch unterscheidbarer Körnerlagen überblicken läßt. Die Untersuchung zeigt übrigens, daß in den optisch korrelaten Kristallitenordnungen für Schnitte $\parallel c$ oder schief c ohne Drehung des Tisches (Änderung der Interferenzfigur!) nicht mehr sämtliche optisch verschiedene Körnerlagen vertreten sind.

In ähnlicher Weise kann nun auch den Schnitt $\perp B_1$ eines Zweiachsigen behandeln, hiebei zunächst nach der dem Interferenzbild optisch korrelaten Kristallitenordnung fragen, sehen, ob diese alle optisch differenten Kornlagen umfaßt und endlich untersuchen, welche Kornlagen auf Grund der Interferenzfigur der Bedingung $b \parallel \sigma$ entsprechen.

Ein wesentlicher Unterschied von den Einachsigen ergibt sich sogleich. Es gibt bei Zweiachsigen kein Interferenzbild, welches bei Tischdrehung ungeändert bleibt, abgesehen von ganz bestimmten später zu betrachtenden Teilen der Interferenzfigur. Dies besagt, daß, abgesehen von bestimmten Fällen, welche zum Teile schon im I. Teile dieser Überlegung erkannt wurden, die Rotation um irgendeinen Ellipsoiddurchmesser (auch α, β, γ) die Kornlage optisch ändert, wie dies auch dem Mangel einer Rotationsachse der Indikatrix Zweiachsiger entspricht und das Korn um seine Stellung zu σ bringt. Ist also eine solche Stellung zu σ , eine Regel im Schliß im Korngefüge Zweiachsiger erkennbar, so ist auf eine erzeugende Ursache zu schließen, welche es nicht nur mit einer Richtung, sondern mit zwei Richtungen (wodurch eine Fläche, z. B. die Achsenebene, gegeben ist) im Mineral zu tun hatte.

Betrachtet man als analoge Richtung zur c -Achse Einachsiger die Richtung B_1 im Zweiachsigen, so läßt sich erwarten, daß sich alle Verhältnisse, auch die betreffend die Regelungserscheinungen, den bei Einachsigen gefundenen um so mehr annähern, je kleiner V ist. Dem entspricht es nach den bisherigen Betrachtungen, daß die Interferenzfigur $\perp B$ der Interferenzfigur $\perp c$ Einachsiger mit abnehmendem V immer ähnlicher wird, also auch das Verhalten im Regelungsphänomen. Und eben dem entspricht es nach der bisherigen Betrachtung, daß das Areal, welches sich in der Interferenzfigur Zweiachsiger $\perp B$ bei Drehung ändert, um so größer und damit auch der oben bereits erwähnte Unterschied von dem Einachsigen hinsichtlich Regelung umso drastischer wird, je mehr der Achsenwinkel wächst. In beiden Beziehungen wird mit $2V = 90^\circ$ die maximale Verschiedenheit von den Einachsigen und ihrem Verhalten hinsichtlich der Regelung erreicht.

Aus den Interferenzbildern $\perp B_1 \perp B_2 \perp N$ lassen sich zunächst wieder die bereits früher erhobenen Beziehungen ersehen, daß nämlich die Schnitte der Zonen $B_1 B_2 N$, wenn diese Richtungen als Zonenachsen mit einer Nikolschwingung zusammenfallen, Körner mit m oder

$b \parallel \sigma$ bedeuten, wobei auch σ mit einer Nikolschwingung $\parallel$ ist. Außerdem ist aber ersichtlich, daß hierbei den Zonenachsen B_1 B_2 N nicht die gleiche Pendelfreiheit zukommt, sondern der optischen Normalen N die geringste (schmäler „Achsenbalken“), der B_2 eine größere (breiter Mittelbalken im Interferenzbild $\perp B_1$), der B_1 die größte (breitester Mittelbalken im Interferenzbild $\perp B_2$).

Wenn wir vorläufig von den Rotationen absehen, so ergibt sich hieraus, daß B_1 bei erfüllter Bedingung $b \parallel \sigma$ eine größere Bewegungsfreiheit zukommt als der c -Achse Einachsiger unter derselben Bedingung. Ferner daß diese Bewegungsfreiheit von B_1 mit dem Achsenwinkel wächst. Zur Beantwortung unserer Frage müssen aber Rotationen mit in Betracht gezogen werden. Die Veranschaulichung mit der Skiodromenkugel lehrt: Bei Rotation um B_1 (Schnitt $\perp B_1$) ändert sich die Stellung von m und b zur Bezugslinie σ im Schnitt für alle jene Stellungen von B_1 , in welchem B_1 um weniger als den Achsenwinkel von der optischen Achse des Betrachters abweicht. Wenn man also darangeht, das Interferenzbild $\perp B_1$ zu deuten, ist zu bedenken, daß es im Innenraum des kleinsten, beide Achsenaustritte umfließenden Kugelkreises nicht alle uns interessierenden Kornlagen optisch darstellt, sondern nur eine Auslese, solange wir nicht drehen. Das Interferenzbild Zweiachsiger enthält also einen zentralen Kreis, der eine Funktion von $\sin^2 V$ ist und innerhalb welcher die Rotation um B_1 sowohl $b \parallel \sigma$ als $m \parallel \sigma$ erzeugt und die Barren nicht erschließen lassen, ob $b \parallel \sigma$ oder $m \parallel \sigma$ gilt. Dieser zweideutige Kreis wird im Grenzfall $V = 0$ ebenfalls 0 (Einachsigkeit), im anderen Grenzfall $V = 45$ (optisch neutrales Mineral) erreicht der zweideutige Kreis Z eine ebenfalls bestimmbare Größe, bleibt aber kleiner als das Gesichtsfeld, wenn die Apertur der Beleuchtungslinse $> 90^\circ$ ist. Es zeigt also auch in diesem ungünstigsten Falle das Interferenzbild $\perp B$ neben zweideutigem auch eindeutiges Gebiet. Die Fläche Z ist ein Maß für die Anzahl der Fälle, in welchen bei fixer Lage von B_1 das Korn sowohl α' als $\gamma' \parallel \sigma$ zeigen kann, bzw. im Gipsfeld ohne Desorientierung von B_1 bloß durch Rotation der Achsebene um B_1 steigen oder fallen kann. Je größer dieser zweideutige Kreis, bzw. der Achsenwinkel, desto größer ist (wie auch die Interferenzfigur $\perp B_1$ bei Rotation zeigt) in einem geregelten Gefüge die Zahl der Körner, welche ohne besondere Ursache für die Einstellung der Achsenenebene ungeregelt erscheinen würden.

Es soll nun die Betrachtung der Skiodromenkugel bei Rotation, bzw. des Interferenzbildes $\perp B_1$ noch etwas genauer werden und alle durch die Lage von B_1 und die Lage der Achsenebene definierbaren Kornlagen umfassen. Hiezu haben wir zwei Operationen vorzunehmen:

1. Wir geben B_1 die Neigungen aller Radien der von oben betrachteten Hemisphäre (durch konische Durchleuchtung oder Pendeln der Isogyrenkugel).

2. B_1 wird Rotationsachse für die optische Achsenebene.

Die Ergebnisse dieser beiden Operationen sind ganz dieselben für die Reihenfolge 1, 2 und die Reihenfolge 2, 1 und dadurch überprüfbar. Man kann die Untersuchung mit der Skiodromenkugel in beiden Reihenfolgen ausführen, besonders gut aber in der Reihenfolge 1, 2.

Um die Untersuchung aber in der Reihenfolge 2, 1 auszuführen, besitzen wir ein sehr bequemes Mittel in der Drehung des Tisches bei konoskopischer Beobachtung des Schnittes $\perp B_1$. Hierbei besorgt die Kondensorlinse mehr oder weniger gut die Operation 1 und macht deren Ergebnis für jede Drehstellung übersichtlich. Das Drehen ist aber eben die Operation 2. Am anschaulichsten ist es, wenn man sich zuerst eine beliebige Drehstellung der Achsebene um B_1 , dann eine beliebige Radialstellung von B_1 vorstellt. Es lassen sich so alle durch B_1 und die Achsenebene definierten, also alle optisch differenten Kornlagen nicht mehr durch einen Blick auf die Interferenzfigur (wie bei den Einachsigen), wohl aber durch Beobachtung der Interferenzfigur bei Drehung mustern und hienach aus dem beobachteten optischen Verhalten eines Korns im p. p. Licht zwischen + Nik. die Rückschlüsse auf dessen mögliche Lagen im Raume ziehen.

Wenn man nun das konoskopische Interferenzbild bei Drehung mit dem Hilfspräparat beobachtet, so kann man die möglichen nach Bisektrix und Achsenebene unterscheidbaren Kornlagen im Raume und ihr Verhalten im p. p. Licht für ein gegebenes Mineral hinsichtlich eines gegebenen Regelungsphänomens im Schliff und mit Bezug auf ein gegebenes Hilfspräparat an einem Korne des Minerals durchmustern. Und man kann sowohl bei Einachsigen wie bei Zweiachsigen überblicken, was das betreffende Regelungsphänomen in einem Schnitt durch das Körnergefüge hinsichtlich der Lage der Indikatrix der Körner im Raume besagt, bzw. welche Pendelfreiheit für die Indikatrix das betreffende Regelungsphänomen läßt. Es ergibt sich so ein an und für sich den Konstanten des Minerals und des Hilfspräparates angepaßtes Verfahren, welches bei gewissen Mängeln doch das Konoskopieren eines Minerals, dessen Gefügeregelungen man untersucht, zu einer lehrreichen und unerläßlichen Vorarbeit machen dürfte.

An der Interferenzfigur $\perp B_1$ beobachten wir bei Drehung des Tisches (also Rotation um B_1) in den Quadranten Bereiche, welche nicht auslöschen. Wir nennen diese Bereiche $q_1 q_1$ (NW, SO) $q_2 q_2$ (NO, SW) und stellen σ NW-SO. Diese Bereiche stellen dar die schon auf Grund ihrer Bisektrixlage gemeinsam steigenden und fallenden Kornlagen im Gefüge, also die mit Bezug auf σ geregelten Körner eines Gefüges aus dem betreffenden Mineral. Diese Körner, q_1 z. B., haben B_1 frei beweglich in der durch die Bezugsgerade σ normal zur Zeichen-, bzw. Schliffebene gelegten Bezugsebene s , jedoch mit der Bedingung, daß der Winkel ihrer B_1 mit der optischen Achse des Betrachters größer als V ist. Die optische Achsenebene solcher Körner kann um B beliebig rotieren ohne Irritation des Regelungsphänomens, z. B. $\alpha' \parallel \sigma$. Wir nennen diese Körner bzw. Kornlagen q .

q) Von solchen Regelung im Schliff zeigenden Körnern (z. B. $\alpha' \parallel \sigma$), deren B_1 mindestens um V von der optischen Achse des Betrachters abweicht, kann man also nichts Näheres über ihre Orientierung im Raume sagen, als was die Lage und Lagefreiheit von B_1 besagen kann; die Lage der Achsenebene ist bei diesen Körnern q frei.

Dies kennzeichnet die eine Schar q geregelter Körner eines Gefüges des betreffenden Minerals. Und wir entnehmen aus der Interferenzfigur, daß unter den Körnern mit Regelungsphänomen q -Körner (mit freier Achsenebene) um so häufiger sein werden, je kleiner der Achsenwinkel des betreffenden Minerals ist.

r) Anderes gilt von der zweiten Körnerschar r , deren Lagen das Feld darstellt, welches bei Rotation um B_1 auslöscht und mit dem Hilfspräparat zusammen die Farbe wechselt. Diese Körner r , deren B_1 mit der optischen Achse des Betrachters einen kleinen Winkel als V bilden, zeigen nämlich, wie die Veranschaulichung durch die Skiodromenkugel oder die Interferenzfigur lehrt, nur dann dasselbe Regelungsphänomen im Schliff wie die Körner q (z. B. $\alpha' \parallel \sigma$), wenn ihre Achsenebene $\perp$ auf der früher definierten Ebene s steht.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher geregelter r -Körner, deren Orientierung im Raume, wie erörtert, eine viel weniger freie ist als bei den q -Körnern, ist aus diesem Grunde gering, so daß ihr jeweils nachgewiesenes Auftreten eine besondere Ursache suchen heißt; übrigens wächst diese Wahrscheinlichkeit des Auftretens ohne Ursache u. a. mit dem Achsenwinkel des Minerals. Die r -Körner mit der Bisektrix in s und mit weniger als V gegen die optische Achse des Betrachters geneigt, werden also nur dann Regelung zeigen, wenn ein auch ihre Achsenebene einstellender Einfluß da ist.

Die Körner q pendeln mit der Bisektrix in s . Die Körner r pendeln mit der Bisektrix außer s . Gibt es außerdem Körner, welche das Regelungsphänomen $\alpha' \parallel \sigma$ zeigen können?

Um dies anschaulich zu beurteilen, haben wir zwei Wege.

1. Wir legen ein Hilfspräparat mit $\alpha' \parallel \sigma$, rotieren um die spitze Bisektrix (durch Tischdrehung) und verzeichnen alle Kornlagen, welche $\alpha' \parallel \sigma$ zeigen.

2. Wir gehen von einer Betrachtung der Isogyren, also der Lagen mit Auslöschung aus und betrachten daneben die Einheitskugel mit den Skiodromen.

Ad 1. Der Versuch 1 läßt sich z. B. mit dem $\frac{1}{4}$ Und. Glimmer als Präparat und dem Gips- oder Quarzkeil als Hilfspräparat anstellen. Es ergibt sich, daß außer der in der Frage genannten Lagefreiheit nur eine Lagefreiheit anderer Art noch besteht, insofern als bei beträchtlichen Abweichung des Präparat- α' vom Gips- α noch additive Wirkung eintritt.

Ad 2. Wir bezeichnen mit P die Schwingungsrichtung O-W des Nikols, auf welche Bezug genommen wird und welche zugleich die Bezugsgerade σ für die Regelung sein soll.

Es möge z. B. der Querbalken (Achsenbalken) der Interferenzfigur zweierlei Regeln repräsentieren:

Körner mit $m \perp P$ (zwischen den Achsenaustritten),

Körner mit $m \parallel P$ (außerhalb der Achsenaustritte).

Der Mittelbalken repräsentiert uns nur einerlei Regel:

Körner mit $m \perp P$.

Wir können auch sagen: Bei der angenommenen Kornstellung mit der Achsenebene $\parallel P$ zeigt die Mehrzahl der Körner, und zwar um so mehr, je größer V ist, die Regel $m \perp P$.

Die Kornlage im Raume erfüllt dabei die Bedingung Achsenebene $\parallel P$.

Wir drehen nun das Präparat oder die Skiodromenkugel um B_1 , wobei wir die Polarisatorschwingung P als Bezugsgerade für die Regelung festhalten.

Bei dieser Drehung machen wir in der 45° -Stellung halt, wobei der Winkel zwischen der Achsenebene und P bis 45° gewachsen ist.

In der 45° -Stellung finden wir die Hyperbelskiodromen als Repräsentanten von Körnern mit der Regel $m \perp P$ und von gleichviel Körnern mit der Regel $m \parallel P$.

Auf dem Wege in die 45° -Stellung finden wir zwischen den Körnern mit $m \perp P$ und denen mit $m \parallel P$ ein Mengenverhältnis, von welchem hier nur festgestellt wird, daß die Körner mit $m \perp P$ über die Körner mit $m \parallel P$ vorwalten, und zwar um so mehr, je größer V ist und ferner um ebensoviel, als bei der weiteren Drehung von 45 bis 90° die Körner mit $m \parallel P$ über die Körner mit $m \perp P$ vorwalten.

In der 90° -Stellung (Achsenebene $\perp P$) repräsentiert uns der Querbalken (der jetzt $\perp P$ steht!) wieder zweierlei Regeln:

Körner mit $m \parallel P$ (zwischen den Achsenausritten) und

Körner mit $m \perp P$ (außerhalb der Achsenausritte).

Der Mittelbalken repräsentiert nur einerlei Regel:

Körner mit $m \parallel P$.

Wir können auch sagen: Bei der angenommenen Kornstellung mit der Achsenebene $\perp P$ zeigt die Mehrzahl der Körner, und zwar um so mehr, je größer V ist, die Regel $m \parallel P$.

Hieraus ersehen wir:

1. Es genügt, wie übrigens auch unmittelbarer einzusehen ist, eine Drehung der Achsenebene um 90° , um alle Effekte dieser Drehung für jede Stellung der Bisektrix zu überblicken.

2. Wenn die Achsenebene eines optisch zweiachsigen Kristalls in ihrer Lage ganz unbestimmt bleibt, also alle möglichen Rotationsstellungen um die Bisektrix mit gleicher Wahrscheinlichkeit einnimmt und ebenso die Bisektrix alle Stellungen im Raume mit gleicher Wahrscheinlichkeit einnimmt, so kann auch bei optisch Zweiachsigen keinerlei Regelungsphänomen im Schliiff zustande kommen.

3. Wird also bei optisch Zweiachsigen ein Regelungsphänomen im Schliiff beobachtet, so widerspricht dies der bloßen Wahrscheinlichkeit; anders gesagt, wir haben die Erscheinung durch eine besondere Ursache zu erklären.

4. Diese Ursache kann näher gekennzeichnet werden, wenn es gelingt, festzustellen, ob sie die Stellung der Bisektrix regelt und die Achsenebene freiläßt (Fall B); oder die Achsenebene einstellt und die Bisektrix freiläßt (Fall A); oder keine solche Verschiedenheit wahrnehmbar ist (Fall A, B). Letzterer Fall dürfte von vornherein um so häufiger sein, je weniger einfach die Festigkeitseigenschaften des Kristalls seiner Optik zuordenbar sind, also häufiger bei rhombischen, als bei triklinen Kristallen.

Es fragt sich nun also, ob und wie sich diese Fälle unterscheiden lassen.

Jeder Bisektrixstellung entsprechen unendlich viele Stellungen einer frei um B rotierenden Achsenebene. Es fragt sich nun, ob auch im Falle einer bestimmten Lage von B die Rotation der Achsenebene die Erscheinung der Regelung aufheben kann. Wie die Isogyrenkugel lehrt, trifft dies in allen Fällen zu, in welchen B um weniger als V° aus der Normalstellung auf die Schliffebene abweicht (Fall I). In allen anderen Fällen (II) ist die Rotation der Achsenebene wirkungslos. Das Regelungsphänomen Fall I weist also auf eine Ursache, welche nicht nur die Stellung von B , sondern auch die Stellung der Achsenebene geregelt hat. Hingegen bedürfen die nach Fall II geregelten Körner keiner Regelungsursache für die Achsenebene (es sei denn eine Regelung der Achsen Ebenen durch andere Methoden eigens nachgewiesen).

Jeder Stellung der Achsenebene entsprechen unendlich viele Lagen einer freien Bisektrix in der Achsenebene, deren optische Wirkungen sich durch Interferenzbilder und durch die Isogyrenkugel übersichtlich machen lassen.

Es fragt sich nun, ob im Falle bestimmter Lagen der Achsenebene damit ein Regelungsphänomen auch bei freier Bisektrix überhaupt gegeben ist und ob dieses in gewissen Fällen durch die Bewegung von B in der Achsenebene aufgehoben werden kann.

Wir betrachten drei Fälle:

1. Die Achsenebene liegt in der Schliff-, bzw. Zeichenebene. Bei freier Bisektrix tritt kein Regelungsphänomen auf. Tritt ein solches (α' oder $\gamma' \parallel \sigma$) auf, so ist auf eine Ursache zu schließen, welche die B (in der Schliffebene) entweder $\perp \sigma$ oder $\parallel \sigma$ stellte (Fall A, B).

2. Die Achsenebene steht $\perp$ zur Schliffebene $\parallel \sigma$. Bei Rotation der Bisektrix erfordert die Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Verhältnis der Schnitte mit $b \parallel \sigma$ (S_b) zur Zahl der Schnitte mit $m \parallel \sigma$ (S_m), und zwar:

$$S_b : S_m = V : (90 - V) \quad \text{bei } V = 45^\circ \text{ also} \\ S_b : S_m = 1$$

Wir finden also im allgemeinen, weil $V < 45^\circ$, mehr Schnitte mit $m \parallel \sigma$, und zwar um so mehr, je kleiner V ist, bis zum Grenzfall der optisch Einachsigen; also eine Regelung im Schliff von bestimmbarem statistischem Grade.

Ist dieses Verhältnis gestört, so ist eine auch die Bisektrix richtende Ursache vorhanden (Fall A, B).

3. Die Achsenebene steht $\perp$ zur Schliffebene und $\perp \sigma$. Es gilt mutatis mutandis dasselbe, wie für 2.

Wir finden also, daß bei bestimmten Lagen der Achsenebene (2, 3) auch bei freier Bisektrix eine Regelung bestimmten, vom Achsenwinkel des Minerals abhängigen statistischen Grades durch bloße Wahrscheinlichkeit und ohne besondere Ursache auftritt (Fall A), daß aber der Fall (A, B) häufiger vorliegen wird, wenn wir Regelung bemerken.

In dieser Weise kann man sich das Verhalten der Körner bei gegebener Bewegungsfreiheit mit der Isogyrenkugel leicht auch für andere Fälle veranschaulichen und die Diskussion der jedesmaligen Regelungsursache sowie des Mechanismus der Regelung (Translationen und Drehungen im Gitter) vorbereiten.

Wenn wir, wie in der Betrachtung ad 2 von den Isogyren bzw. Schattenbarren bei Rotation des Tisches ausgehen, so wird es deutlicher als durch die Betrachtung mit dem Hilfspräparat, daß der Bisektrix eine bedeutende Bewegungsfreiheit ohne Aufhebung des Regelungsphänomens zukommt, wofern wir dabei die Lage der Achsenebene nicht vorschreiben. Es ist dies die maximale, übrigens unwahrscheinliche Bewegungsfreiheit von B_1 . Welche Figur B_1 bei Ausnützung dieser Pendelfreiheit auf einer Einheitskugel ausfüllt, ist von hier aus nicht ersichtlich. Vielleicht aber kann dies die folgende Fragestellung erörtern helfen.

III.

Die Frage, ob die kristallinen Körner eines Aggregates mehr oder weniger gleichgerichtet oder geregelt sind, läßt sich noch etwas schärfer fassen.

Wir können die Prozentzahl der Körner im Gefüge, welche überhaupt gleichgerichtet sind, ins Auge fassen und durch eine solche Zahlenangabe — z. B. 57 unter 100 Körnern des Gefüges sind geregelt | den Grad der Durchregelung des Gefüges, kennzeichnen sozusagen die Einheitlichkeit oder den „statistischen Grad“ der Gefügeregelung auf die Frage: Wie viele Körner des Gefüges sind geregelt? Wir können begrifflich hievon trennen den Grad der Genauigkeit, mit welcher die Parallelstellung der geregelten Körner erfolgt, den „Genauigkeitsgrad“ der Regelung. Beides hat Schmidt unterschieden. Einen dritten Gesichtspunkt betont aber die „Art der Regelung“ (Regelung „nach“ Achsen, Ebenen etc.). Die Parallelstellung kann sich entweder auf das ganze Gitter, also auf sämtliche Achsen beziehen. Ein Schnitt durch das Gefüge läßt dann röntgenologisch erkennen, daß an allen Körnern nur dieselbe Netzebene zutage tritt.

Oder die Parallelstellung besteht im Parallelismus einer singulären Achse, eine Bedingung, bei deren Erfüllung der Kristall bereits eine gewisse Bewegungsfreiheit besitzt und die Gitter nicht parallel zu stehen brauchen.

Oder es bezieht sich im allgemeinsten Falle die Parallelstellung auf irgend welche interessierende und eine Kontrolle der Regelung gestattende Vektoren. In diesem Falle ist die Bewegungsfreiheit des Kornes bisweilen eine bedeutende. Ferner kann in diesem Falle das betreffende Ellipsoid an Stelle des Kristallkorns gedacht werden. Wir hätten also ein Gefüge gleicher Ellipsoide (als Symbole der betreffenden Ellipsoideigenschaft der betreffenden Kristallart). Diese Ellipsoide können mit ihren Achsen entweder genau parallel stehen, was dem ersten Falle (Parallelismus der Gitter) entspricht und also meist ohne Hilfe des Ellipsoids an den gemeinsamen Netzebenen, z. B. Spaltbarkeiten erkennbar ist. Oder die Ellipsoide können so weit geregelt sein, daß sich dem ganzen Gefüge noch etwas von der Vektorenrichtung des Mineralen mitteilt, während sich bei vollständig regelloser Lage der Körner eine statistische Homogenität einstellen würde.

Derartige Regelungen, welche im Gefolge verschiedener Bedingungen in Gefügen auftreten, genauer zu fassen und dabei von der Indikatrix

optisch einachsiger und optisch zweiachsiger Kristalle als von einem Einzelbeispiel auszugehen, also den Fall der optischen Regelung und seine Feststellbarkeit und Deutbarkeit zu untersuchen, ist im Folgenden versucht.

Wir denken uns das Aggregat aus Indikatrixellipsoiden von einer Ebene, der Schnitt- oder Zeichenebene, geschnitten.

Es erscheinen die Schnitte der Ellipsoide im allgemeinen als Ellipsen mit den Durchmessern α' und γ' . Wir machen die Annahme: Gemeinsames Steigen und Fallen der Interferenzfarben der Körner erfolgt dann, wenn γ' (bzw. α') der Körner sich zu γ'' (bzw. α'') des Vergleichspräparates ganz oder teilweise summiert. Kreuzen wir die Nikols und stellen γ'' des Gipses z. B. unter 45° zu den Nikolsschwingungsrichtungen, so wird eine teilweise Summation von γ' zu γ'' noch möglich sein, solange γ' der längere Ellipsoiddurchmesser im Quadranten von γ'' , welches fix eingestellt bleibt, pendelt, also um höchstens $\angle \rho = 45^\circ$ von der Richtung γ'' abweicht, welche wir zur Bezugsrichtung für die Untersuchung machen und diesfalls wieder σ nennen wollen. Wir nehmen also schon in einer Ebene, der Schnittebene, eine gewisse maximal begrenzte Bewegungsfreiheit für γ' und damit für das Ellipsoid an, ohne daß das Phänomen des gemeinsamen Steigens der Körnerfarben aufgehoben wird. Diese Bewegungsfreiheit wurde schon im Hinblick auf andere Vektoren mit $\rho = 45^\circ$, also maximal angenommen. Wenn wir uns nun an Stelle der Ellipsoide des Gefüges ein einziges Ellipsoid denken, welches um den Mittelpunkt pendelnd alle Lagen einnehmen soll, die ohne Aufhebung des gemeinsamen Steigens der Farben möglich sind, so erhalten wir durch die Gesamtheit dieser Lagen eine Übersicht darüber, welche Körnerlagen mit unserem Phänomen vereinbar sind oder anders gesagt, was gemeinsames Steigen und Fallen der Interferenzfarben in einem Schnitte über die Orientierung der Körner aussagt.

Die Frage nach der Gesamtheit der möglichen Achsenlagen für das ohne Störung des Regelungsphänomens pendelnde Ellipsoid ist also eine geometrische geworden.

Herr Direktor Dr. Ing. Max Pernt hat diese geometrische Frage auf meine Bitte bereits 1916 bearbeitet und mir das Ergebnis zur Verfügung gestellt, dessen Publikation durch meine Kriegsschicksale unterblieb.

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß diese Fragestellung durch die Annahme $\rho = 45^\circ$ charakterisiert und eine andere ist als die bisher behandelten Regelungsfragen.

In kurzem Auszuge ergeben die lückenlosen, von Herrn Prof. Dr. Zindler ebenfalls noch freundlichst bestätigten Darlegungen Dr. Pernts folgendes.

Frage: Welche Lagen kann die längste Hauptachse eines um seinen Mittelpunkt frei beweglichen Ellipsoides einnehmen, wenn die Bedingung

$\angle \rho < \frac{\pi}{4}$ erfüllt bleiben soll, wobei ρ den Winkel bedeutet, den die

große Achse der Schnittellipse mit einer festen, in der gleichen Ebene liegenden, durch den Mittelpunkt gehenden Geraden σ bildet?

Die Schiffebene sei die $O\xi\eta$ -Ebene eines rechtwinkligen räumlichen Koordinatensystems, dessen Ursprung in den Mittelpunkt O des drei-

achsigen Ellipsoides verlegt werde und dessen ξ -Achse mit der Richtung σ zusammenfällt (vgl. Abb. 1).

Ene beliebige Lage des Ellipsoides sei gekennzeichnet durch ein zweites räumliches Koordinatensystem $Oxyz$, dessen Ursprung ebenfalls O sei und dessen Achsen mit den drei Hauptachsen des Ellipsoides identisch sind und zwar falle die längste Hauptachse in die Richtung der Ox -, die kürzeste in die Richtung der Oz -Achse.

Es wird die Lage des Systems $Oxyz$ auf $O\xi\eta\zeta$ durch die Angabe der Winkel bezogen, welche jede Achse $Ox \dots$ mit den Richtungen $O\xi \dots$ einschließt, die Mittelpunkts Gleichung des dreiachsigen Ellipsoids

Schematische Darstellung der Lagenverhältnisse.

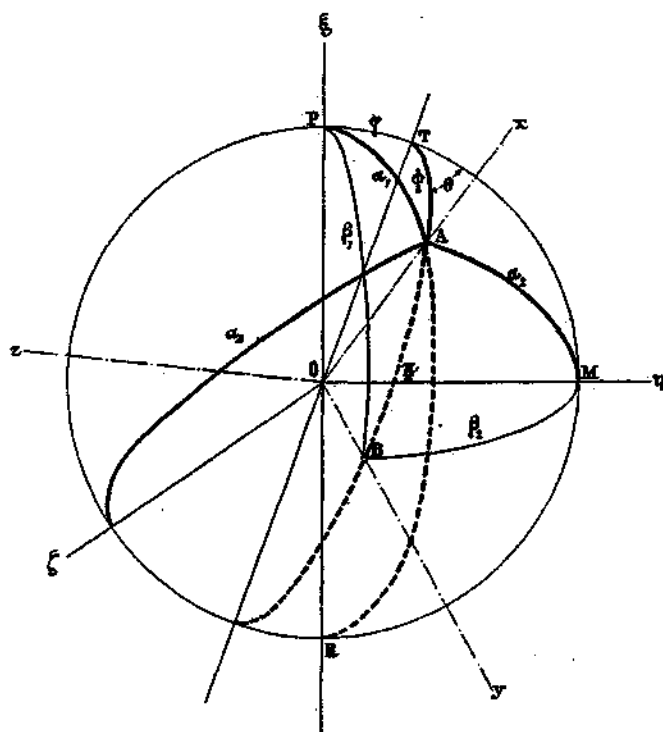


Abb. 1.

im System $Oxyz$ -aufgestellt und sodann die Gleichung des Ellipsoids im $O\xi\eta\zeta$ System. Hienach ergibt sich für $\zeta = 0$ die Schnittlinie zwischen Schliffebene und Ellipsoid. Die Gleichung dieser Schnittlinie wird mit der Mittelpunkts Gleichung eines Kegelschnitts verglichen und die Koeffizienten in beiden werden identifiziert. Für die große Hauptachse des Kegelschnitts, welche mit $O\xi$ den Winkel ρ einschließt, ergibt sich $\tan 2\rho$ und nach einigen Umformungen im vorliegenden Falle

$$10 a) \quad \tan 2\rho = 2 \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + v^2 \cos \beta_1 \cos \beta_2}{(\cos^2 \alpha_1 - \cos^2 \alpha_2) + v^2 (\cos^2 \beta_1 - \cos^2 \beta_2)}.$$

11) Hierin ist für den Zahlenwert $\frac{A^2(B^2 - C^2)}{B^2(A^2 - C^2)} = v^2$ gesetzt und es

bedeuten die Winkel $\alpha_1 = x\xi$, $\alpha_2 = x\eta$, $\beta_1 = y\xi$, $\beta_2 = y\eta$; $A > B > C$ sind die halben Hauptachsen des Ellipsoids.

Durch Einführung der in Abb. 1 verzeichneten neuen Variablen erhält man aus 10 a).

$$13) \operatorname{tg} 2\rho =$$

$$\frac{\sin 2\varphi [\cos^2 \phi + v^2 \sin^2 \phi - (\sin^2 \phi + v^2 \cos^2 \phi) \cos^2 \Theta] + (1 - v^2) \sin 2\phi \cos 2\varphi \cos \Theta}{\cos 2\varphi [\cos^2 \phi + v^2 \sin^2 \phi - (\sin^2 \phi + v^2 \cos^2 \phi) \cos^2 \Theta] - (1 - v^2) \sin 2\phi \sin 2\varphi \cos \Theta}$$

Hiebei bezeichnet (s. Abb. 1) $O T$ die Spur der Oxy -Ebene in der $O\xi\eta$ -Ebene und φ den Winkel von $O T$ mit $O\xi$, ϕ den Winkel von

Graphische Ermittlung des Wertes $r = \operatorname{tg} \phi$.

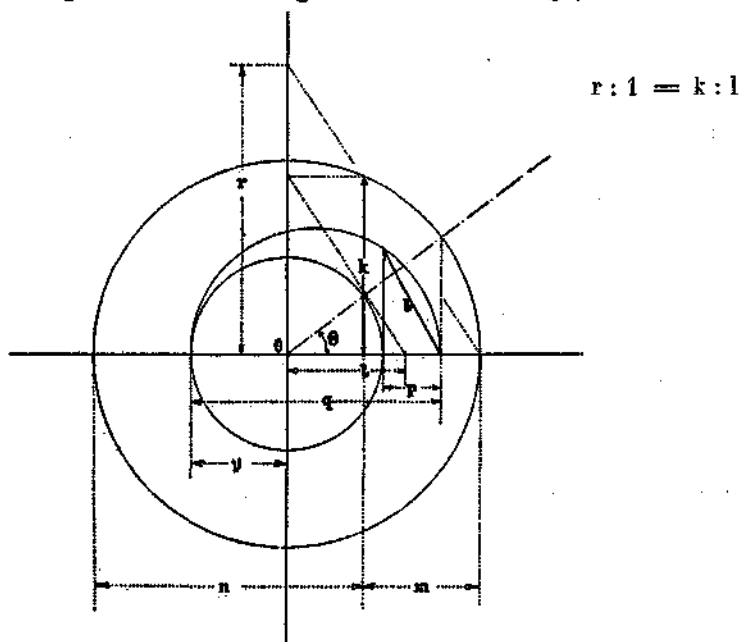


Abb. 2.

$O T$ mit Ox , Θ den Winkel zwischen beiden Ebenen. Wird nun der Aufgabe entsprechend die Bedingung erfüllt, daß 2ρ nicht den Wert $\frac{\pi}{2}$ erreicht, so ergibt sich nach einiger Umformung für den Grenzfall die Bedingung

$$14) (v^2 - \cos^2 \Theta) \operatorname{tg}^2 \phi - (v^2 \cos^2 \Theta - 1) = 2(1 - v^2) \operatorname{tg} 2\varphi \operatorname{tg} \phi \cos \Theta.$$

Die Betrachtung des Sonderfalles $\varphi = 0$ ($O\xi = \sigma$), ergibt

$$15) \operatorname{tg}^2 \phi = \frac{v^2 \cos^2 \Theta - 1}{v^2 - \cos^2 \Theta} \text{ und hieraus}$$

$$16) \quad a) \text{ für } \Theta = 0, \operatorname{tg}^2 \phi = 1; \phi = \frac{\pi}{4}$$

$$b) \text{ für } \Theta = \frac{\pi}{2}, \operatorname{tg}^2 \phi = \frac{1}{v^2}; \phi \text{ imaginär}$$

$$c) \text{ für } \cos \Theta = v, \operatorname{tg}^2 \phi = \infty; \phi = \frac{\pi}{2}$$

Es kann also im Falle *a* der Grenzwert $\frac{\pi}{4}$ erreicht werden, nicht aber im Falle *b*, also für Winkel Θ zwischen $\cos \Theta = v$ und $\cos \Theta = 0$; im Falle *c* kann die Ox -Achse in die $O\eta\zeta$ -Ebene fallen.

Die zeichnerische Festlegung der Grenzbereiche gründet sich darauf, daß für 15) geschrieben wird $\operatorname{tg}^2 \phi = \frac{(v \cos \Theta - 1)(v \cos \Theta + 1)}{(v - \cos \Theta)(v + \cos \Theta)} = \frac{mn}{pq} = \frac{k^2}{l^2} = r^2$
 $r = \operatorname{tg} \phi = \frac{k}{e}$ (vgl. Abb. 2, worin der Radius des Kreises die Einheit ist).

Für diesen Sonderfall $\varphi = 0$ zeigt die Abb. 3 Aufriß, Grundriß und Kreuzriß der Einheitskugel, und zwar ist das Raumgebiet, in welches die Ellipsoidhauptachse nicht eintreten darf, schraffiert. C_A ist ein sphärischer Kegelschnitt.

Bei der Untersuchung des Falles φ von 0 verschieden ergibt sich für

$$19) \quad \operatorname{tg} 2\lambda = \frac{2(1-v^2)\cos\Theta\operatorname{tg}\phi}{(1-v^2\cos^2\Theta) + (v^2 - \cos^2\Theta)\operatorname{tg}^2\phi}$$

an Stelle von 13):

$$20) \quad \operatorname{tg} 2\rho = \frac{\operatorname{tg} 2\varphi + \operatorname{tg}^2\lambda}{1 - \operatorname{tg}^2\lambda \operatorname{tg}^2\varphi} = \operatorname{tg} 2(\lambda + \varphi), \quad \rho = \varphi + \lambda = \frac{\pi}{4}$$

Nimmt man als entgegengesetzten Fall zu $\varphi = 0$ demnach $\varphi = \frac{\pi}{4}$,

$\lambda = 0$, was entweder $\Theta = \frac{\pi}{2}$ oder $\phi = \frac{\pi}{2}$ zur Folge hat, so ergibt sich,

daß die Bewegungsfreiheit des Ellipsenscheitels A in der Grenzlage nur in den beiden symmetrischen größten Kugeln besteht (vgl. Abb. 4). Die Bewegungsfreiheit von A auf der Einheitskugel ist daher für $\varphi = 0$ die größte, und zwar erstreckt sie sich auf das zusammenhängende Kugelstück zwischen den beiden Kurventeilen der C_A , und sie ist am geringsten für $\varphi = \frac{\pi}{4}$ und schrumpft auf die freie Bewegung innerhalb des von den beiden Kugeln K_A begrenzten Kugelquadranten zusammen. Für zwischen $\varphi = 0$ und $\varphi = \frac{\pi}{4}$ liegende φ -Werte wird nach

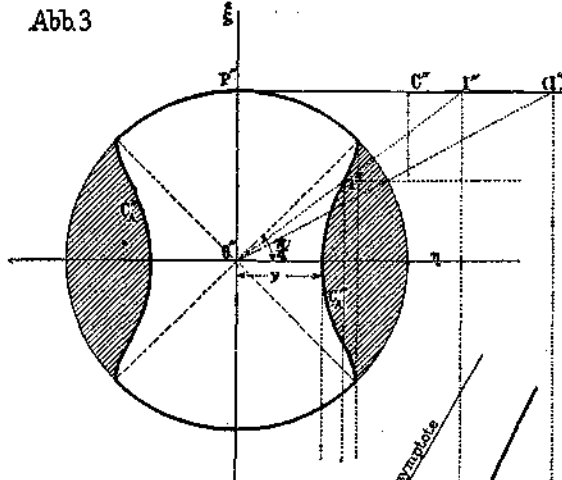
Formel 19 die die Grenzlage der Ellipsoidhauptachse bestimmende Kurve zu berechnen sein, welche innerhalb der von den Kurven C_A und K_A eingeschlossenen Kugelfläche verlaufen muß.

Diese Untersuchung lehrt aber, daß das Maß der Bewegungsfreiheit nicht allein von dem Größenverhältnis der 3 Hauptachsen des Ellipsoids abhängt, sondern auch von der Lage der Geraden OT , in welchen der Hauptschnitt Oxy des Ellipsoids die Schliffebene schneidet, und daß der Ellipsoidschenkel A in keinem Fall sich in den von den Kurven C_A begrenzten Kugelkalotten und in jedem Falle innerhalb des von den Kreisen K_A ausgeschnittenen Kugelstückes bewegen kann.

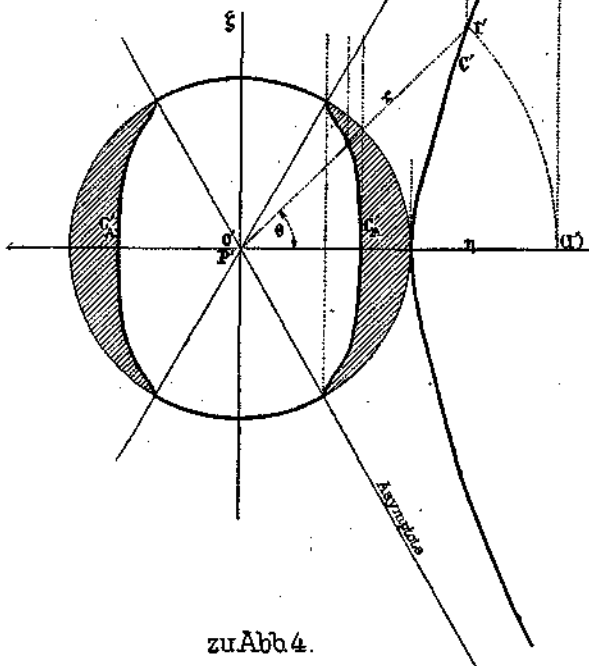
Darstellung der Grenzlagen C_A der längsten Hauptachse eines dreiachsigen Ellipsoides für die Werte $\nu = \frac{1}{2}$ und $\varphi = 0$

a) Aufriss in der $0\xi\eta$ Ebene.

Abb. 3



b) Grundriss in der $0\xi\eta$ Ebene



zu Abb. 4.

c) Kreuzriss in der $0\xi\xi$ Ebene.

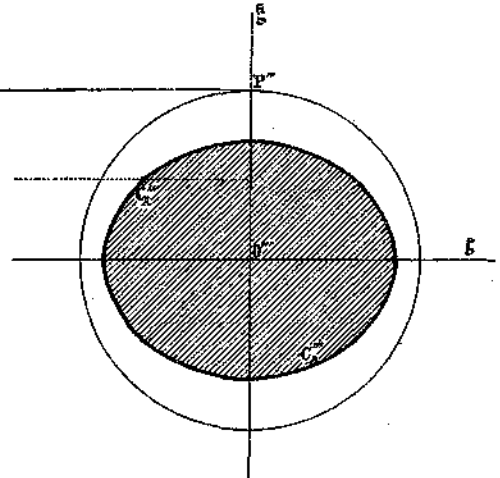
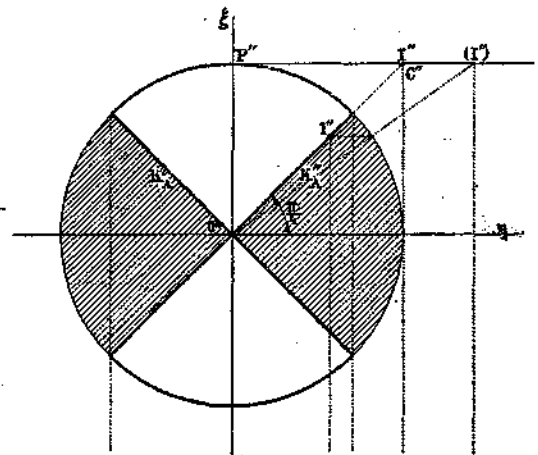
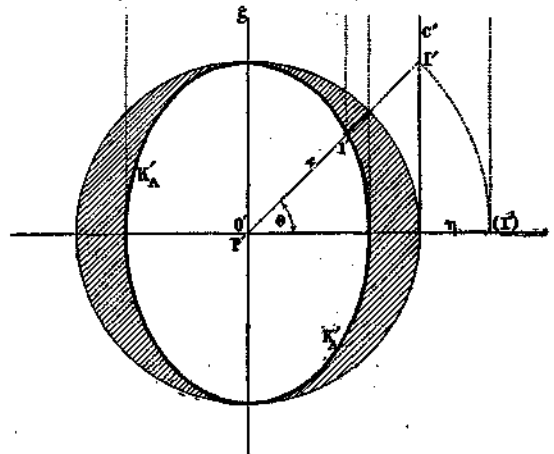


Abb. 4

a) Aufriss in der $0\xi\eta$ Ebene.



b) Grundriss in der $0\xi\eta$ Ebene.



Darstellung der Grenzlagen K_A der längsten Hauptachse eines dreiachsigen Ellipsoides $\varphi = \frac{\pi}{2}$, bezogen für ein Rotations-Ellipsoid.

Abb. 3 und 4.

Für das verlängerte Rotationsellipsoid ($B = C$; $\nu = 0$ nach Formel 11) ergibt die Betrachtung, daß sich der Ellipsoidscheitel A ganz ebenso wie im ungünstigsten Falle beim 3achsigen Ellipsoid ($\varphi = \frac{\pi}{4}$) innerhalb des von den Kreisen K_A ausgeschnittenen (in Abb. 4 nicht schraffierten) Kugelstückes bewegen kann. Oder mit anderen Worten, in den beiden Kugelquadranten, welche die symmetrischen, den Raumwinkel $O\xi\eta$ und dessen Nebenwinkel halbierenden Ebenen einschließen und in welche σ fällt.

Dies ist eine kurze Übersicht über den Gang und die Ergebnisse der geometrischen Untersuchung Dr. Pernts.

Wir versuchen nun, die Ergebnisse der geometrischen Untersuchung in ihrer Bedeutung für die Gefügeregelung zu veranschaulichen. Hierbei bezeichnen wir bisher B_1 und B_2 die spitze und stumpfe Bisektrix, N die optische Normale, b die äquatorialen (B_1 umkreisenden) Skiodromen, m die meridionalen Skiodromen; ferner sind wie früher die Schnittebene, die Fläche s und die Bezugsgerade σ zu unterscheiden, welche letztere die Schnittgerade von s und der Schliff- bzw. Schnittebene ist.

Wir geben nun der Indikatrix und der Skiodromenkugel zu den Abbildungen 3 und 4 bei Pernt zunächst folgende Stellung: $B_1 (= \alpha$ der Indikatrix, entsprechend m der Isogyrenkugel) $\parallel \eta$; die $\beta\gamma$ -Ebene ($\perp B_1$) liegt dabei in s .

Bei unserer Bedingung, daß der $\angle \rho$ zwischen γ' und σ nur bis $\frac{\pi}{4}$ wachsen darf (so daß insofern noch die Möglichkeit additiven Zusammenwirkens von γ' des Präparats mit $\gamma'' \parallel \sigma$ eines Hilfspräparats besteht), kann die Indikatrix, bzw. Skiodromenkugel um den Punkt O in der Weise pendeln, daß γ der Indikatrix ($= B_2$) die in Abb. 4 nicht-schraffierten Teile der Einheitskugel begeht. Für letzteres können wir sagen: α der Indikatrix, also B_1 , begeht die schraffierten Teile.

Eine additive Wirkung ($\rho < \frac{\pi}{4}$) ist also in einem Schliff $\perp s$ noch denkbar, wenn B_1 nicht $\perp s$ steht, sondern hievon in s um ρ , $\perp s$ um einen größeren Winkel abweicht und auf s einen Kegelschnitt zeichnet, welcher, ähnlich (oder gleich?) einem b -Skiodromenverlauf, von der Exzentrizität der betreffenden Indikatrix abhängt.

Ist also in einem Schliff eine additive Wirkung wahrnehmbar, so kann zunächst strenge nur auf die geschilderte Freiheit in den Körnerlagen geschlossen werden.

Ist dies aber ein ganz beliebiger Schliff oder zeigen zwei zueinander $\perp$ Schlitze ($\perp s$) dasselbe additive Phänomen, so schränkt sich die Bewegungsfreiheit der spitzen Bisektrix ein: sie kann aus der Stellung $\perp s$ nur um $\angle \rho$ abweichen.

Letzteres gilt auch für einen einachsigen Kristall, wenn wir an Stelle von B_1 sein ε ($< \omega$), also sozusagen wieder α setzen.

Es sind also für ein bestimmtes ρ (zum Beispiel $\rho < \frac{\pi}{4}$) die Einachsigen von einem Schliffe aus genauer festzulegen als die Zweiachsigen und letztere

vermutlich um so genauer, je mehr sie sich den Einachsigen nähern, je kleiner also ihr Achsenwinkel ist.

Für jene Kristalle, deren $\beta \gamma$ -Ebene die Schnittfläche in σ schneidet ($\angle \varphi = 0$), ist die Pendelfreiheit von B_1 am größten. Es fragt sich, ob solche Kristall-Lagen auch optisch leicht erkennbar sind. Kristallographisch werden solche Kristalle im Schliff erkennbar sein, wenn die $\beta \gamma$ -Ebene sich zum Beispiel einer Spaltbarkeit zuordnen läßt. Solche Kristalle werden mit einer Wahrscheinlichkeit auftreten, welche nicht von den optischen Konstanten des Minerals abhängt, wohl aber von der Anordnung der Festigkeitseigenschaften abhängen kann, in welchem Falle sie eben häufiger oder seltener werden als ohnedies zu erwarten.

Wir haben somit in Übersicht verfolgt, was die im Schliff beobachteten Regeln für die „Regelung des Korns im Raume“ besagen. Hiebei aber sind wir tatsächlich noch nicht bis zur Regelung des Korns übergegangen, sondern hätten statt „Korn“ genauer dessen optische Bezugsflächen und Gerade zu sagen, ich sage im folgenden hiefür kurz das optische Korn.

Eine gegebene Lage des optischen Korns bestimmt die Lage des Gitters, also des kristallographischen Korns, etwa in folgender Weise:

1. bei optisch Einachsigen bis auf freie Rotation um c ;
2. bei optisch Zweiachsigen genau;

1 a) bei optischen Einachsigen mit einer einfachen Beziehung zu den gerichteten Eigenschaften der Festigkeit (zum Beispiel Spaltbarkeit, maximale Translation etc.);

2 a) bei optischen Zweiachsigen mit einer komplizierteren, sehr wechselnden Beziehung zu den Festigkeitseigenschaften, und zwar ist diese Beziehung am einfachsten bei den rhombischen Kristallen, weniger einfach bei den monoklinen und am wenigsten einfach bei den triklinen, wenn man aufs Ganze schaut.

Wir werden also in jenen Fällen, in welchen die Regelung eine Funktion mechanischer Kräfte ist, welche es, um dem heutigen, aber wohl überholbaren Stande der Einsicht gemäß zu reden, direkt mit den Festigkeitseigenschaften und nicht mit der Optik der Kristalle zu tun haben, also bei passiver Gefügeregelung, bei Kaltbearbeitung im allgemeinen erwarten, daß die Aussichten, passiv geregelte Gefüge auch optisch geregelt zu finden, in der aufgestellten Reihe von der Einachsigen zu den Triklinen abnehmen. Die aber hierin oft entscheidenden Einflüsse besonderer mechanischer Eigenschaften der einzelnen Minerale einzuschätzen, muß einer Behandlung besonders interessierender Einzelfälle vorbehalten bleiben.

VIII. Erörterung einer Hypothese über die passive Regelung von Gefügen translatierbarer Kristalle.

Es wird versucht, anschließend an Tammanns Ausführungen über die Bedeutung von Translationen für die Deformation von Kristallkörnergefügen (Metallographie S. 71 ff.), eine hypothetische Anschauung über den Vorgang bei der passiven Regelung solcher Gefüge zu erörtern,

womit demgemäß ein besonderer Fall betrachtet und vorläufig nicht entschieden werden soll, ob er der einzige Fall passiver Gefügeregelung durch Kaltbearbeitung ist.

Nach Tammann's Ausführungen (l. c.) über Elastizitätsgrenze (= Größe der Kraft, bei welcher eine Gleitung stattfindet) und Fließen ist die Elastizitätsgrenze durch eine Angabe über die Größe der Kraft und drei Winkelgrößen gegeben. Die drei Winkel bestimmen: die Lage der Gleitfläche, die Lage der Gleitrichtung in der Gleitfläche, den Winkel zwischen Gleitrichtung und wirkender Kraft. Die Elastizitätsgrenze hängt also bei Kristallen — ganz ebenso wie bei Gesteinen mit geregelter Feinbau, wo das eine große Rolle im Bewegungsbilde der Deformation spielt — von der Orientierung des Kristalls zur deformierenden Kraft ab.

Die Elastizitätsgrenze ist also bei einem regellosen Kristallaggregat (im unregelmäßigen Gefüge) gegenüber einem das Gefüge durchsetzenden Felde mechanischer Spannungen für jedes Korn eine verschiedene oder, genauer gesagt, nur für hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften gleichorientierte Körner die gleiche. Und nur gleichorientierte Körner beginnen also gleichzeitig (Tammann l. c.) sich dauernd zu deformieren (beispielsweise translatierend zu fließen). Ganz anders reagiert ein geregeltes Gefüge: Seine Körner beginnen gegenüber parallel gerichteten Spannungen gleichzeitig mit der dauernden Deformation. Ferner wird aus einem geregelten Gefüge eine Beanspruchung (z. B. auf Biegung), deren Orientierung man kennt, eine übersichtliche, deutbare und verständliche Auslese treffen, was die Elastizitätsgrenzen der Körner und den Beginn ihrer Deformation anlangt. Wie immer, so zeigt auch in diesem Falle das geregelte Gefüge in seinem Verhalten eine graduelle Annäherung an das Verhalten eines Einzelkristalls, den man geradezu an seine Stelle denken darf, wenn der statistische Grad und der Genauigkeitsgrad der Gefügeregelung ein hoher ist. Auch in bezug auf mechanische Beanspruchungen (wie hinsichtlich anderer gerichteter Größen) kommt also ein gradweise geregeltes Gefüge einem Kristall gradweise nahe und es bildet ein unregelmäßiges Gefüge ein statistisch homogenes „massiges“ Gestein mit Mittelwerten. Da aber die mechanische Beanspruchung die schon erwähnte, von Tammann (l. c.) erörterte Auslese unter den Körnern des unregelmäßigen Gefüges trifft, je nach der Lage der Körner, so wird die dauernde Korndeformation im unregelmäßigen Gefüge auch im parallelen Spannungsfelde ein zeitlich gedehnter, an verschiedenen Punkten des Gefüges zu gegebenen Zeiten einsetzender Akt. Und da wir vielfach der Tatsache gegenüberstehen, daß durch mechanische Deformation eines Gefüges erzwungene Gefügeregelung entsteht, so ergibt sich nun die Frage, ob sich theoretisch aus den obigen Voraussetzungen ein geregeltes Gefüge aus einem unregelmäßigen bei mechanischer Deformation ohne dauernde Deformation der Raumgitter der Einzelkörner (wofür man mit Tammann die Änderung der Röntgenperioden des Raumgitters zum Kriterium machen kann) entstanden, denken läßt.

Betrachtet man den Fall, daß ein geregeltes Gefüge unter Korndeformation deformiert wird, so ist für diesen Fall zunächst eine

Erfahrungstatsache aus der Gesteinswelt zu nennen, welche unter den Metallen ihr Analogon hat. Diese Erfahrungstatsache habe ich mit Betonung der großen Rolle, welche sie in der Natur spielt, als Prinzip der Ausarbeitung geregelter Gefüge (verschiedener Größenordnung) bekanntgemacht. Sie besagt, daß geordnete Bahnen geringster Deformationsarbeit im Gestein, z. B. eine s-Flächenschar (Schieferung, Feinschichtung) durch mechanische Deformation im allgemeinen Falle nicht ausgelöscht werden, sondern für die Teilbewegung benutzt und ausgestaltet, beziehungsweise ausgearbeitet werden. Es ist lediglich ein anderer Ausdruck für dieselbe Tatsache, wenn hier gesagt wird: Der Grad der Regelung eines Gefüges, welche jene Bahnen geringster Deformationsarbeit bestimmt, wird durch Deformation des Ganzen im allgemeinen Falle nicht verringert, sondern erhöht. Es ist eine zunächst dem Studium von Tektoniten entnommene Erfahrungstatsache, daß erzwungene Gefügeregelung durch weitere Deformation nicht rückgängig, sondern erhöht wird, auch wenn sich die Angriffspunkte der Kräfte am Ganzen, die „Einspannung“, ändern. Wir beobachten namentlich dann, wenn eine ausgezeichnete Flächenschar geringster Gleitreibung vorhanden ist, sozusagen eine ausgezeichnete Translationsflächenschar des Gesteins, daß die natürlichen Deformationen diese Flächen ausarbeiten, und zwar in erster Linie durch Regelung von Mineralkörnern; ferner durch Formänderung der Mineralkörner und endlich sogar durch Umwandlung von Mineralen in „Gleitminerale“. Es erscheint also die Regelung empirisch als etwas, das, wenn im Keime vorhanden, bei beliebiger Deformation des Gefüges zunimmt, nicht abnimmt.

Diese Erfahrungstatsache nun, auf welche vielleicht auch noch manche Eigenschaftsänderungen kaltgereckter Metalle, anlässlich welcher die Bezugsflächen aus Kugeln zu Ellipsoiden werden — man könnte füglich auch von Anisotropierung statistisch homogener Gefüge sprechen — rückführbar werden dürften, wird verständlicher, wenn wir sie mit dem eingangs erwähnten Begriffsinventar Tammanns behandeln.

Wenn wir nun von einem vollkommen geregelten Gefüge ausgehen und dieses in einem Felde paralleler Spannungen gleicher Größe deformieren, so reagieren alle Körner gleichzeitig und gleichsinnig, wenn wir von der intergranularen Reibung absehen, z. B. weil diese überall größer als die Elastizitätsgrenze der Körner sei. Es deformiert sich das Gefüge gleich einem Kristall; sind seine Körner unter den gegebenen Bedingungen translatierbar, gleich einem translatierbaren Kristall des betreffenden Minerals, wobei der Annahme gemäß die Translationen geringere Arbeit fordern, als die intergranulare Reibung. Dementsprechend wird bei irgendeiner Deformation auch die Reaktion auf den Spannungsverlauf und die später ablesbare Anpassung an denselben erfolgen und eine Auslösung der Teilbewegungen in Flächen geringsten Widerstandes um so deutlicher, je geringer dieser Widerstand ist im Vergleich zu anderen Bahnen der Teilbewegung.

Es ergibt sich in diesem Falle nicht mehr und nicht weniger Anlaß zur Verminderung des Regelungsgrades, als sich bei Deformation eines Kristalles Anlaß zur Minderung der Regelmäßigkeit seines Gitters ergibt.

Wenn wir, wie das oft der Fall ist, in einem Gefüge „Gefügeelemente höherer Ordnung“ unterscheiden können und diese Gefügeelemente höherer Ordnung bestehen beispielsweise in geregelten Inseln in unregelter Zwischenmasse, so gilt auch für derartige Partien, wenn man sie für sich betrachtet, bei Knetung des ganzen Systems das eben Erörterte und es wird verständlich, mit welcher Zähigkeit viele in Körnerinseln auseinander gewalzte ehemalige Einzelkristalle eine subparallele Orientierung der Körner festhalten, und daß eben größere Einzelkristalle mit betonten Translationsflächen bei Kaltbearbeitung nicht in Körneraggregate übergehen.

Wir betrachten nun das zweite Extrem: gänzlich unregelmäßiges Gefüge, in welchem also eine Gruppe statistisch homogen verteilter, in bezug auf die Festigkeitseigenschaften subparallel orientierter Körner, die Gruppe *A*, auf irgendeine Beanspruchung des Ganzen im Zeitpunkt *t* mit dauernder Gestaltänderung reagiert. Diese Gestaltänderung der *A*-Körner wird als Teilbewegung zur Deformation des Ganzen gleichzeitig erfolgen. Sie wird unter der Annahme, daß die wachsende Beanspruchung und der allseitige Druck, in welchem das Experiment erfolgt, kein Porenvolumen dulden, rein geometrisch, das heißt, schon als Gestaltänderung der *A*-Körner Bewegungen der übrigen Körner bedingen, und zwar wegen der gleichsinnigen Deformation der *A*-Körner, ebenfalls untereinander gleichsinnige Bewegungen der Nicht-*A*-Körner, nämlich ebenfalls Teilbewegungen zur Deformation des Ganzen. Diese werden entweder auch zwischen den Körnern oder nur in den Körnern der Nicht-*A*-Gruppe erfolgen können. Im ersteren Falle sind Drehungen der Körner möglich und bleiben also die Aussichten für eine Regelung zu untersuchen.

Im zweiten Fall erfolgt keine Drehung der Körner und somit besteht keine Möglichkeit zur Regelung, wenn die Bewegungen im Korn Translationen ohne Zwillingsbildung sind.

Es wären also zunächst die Bedingungen für den ersten und für den zweiten Fall zu erörtern.

1. Fall: Es treten beim Nachrücken der Nicht-*A*-Körner gemäß der Formänderung der *A*-Gruppe intergranulare Bewegungen auf.

Die Möglichkeit hierzu ist vorhanden. Denn wenn auch die Elastizitätsgrenze der *A*-Körner gegenüber der Deformation niedriger war als die Bindung der Körner, bzw. die intergranulare Reibung, so muß dies eben bei den zur Kraft anders orientierten Körnern der Nicht-*A*-Gruppe nicht der Fall sein.

Ist also die intergranulare Reibung der Körner im Gefüge geringer als die größte Elastizitätsgrenze des betreffenden Minerals, so ist Gelegenheit zur Drehung der Körner gegeben und es tritt drehendes Nachrücken der Nicht-*A*-Körner mit Verlegung der Achsen auf.

Wir sehen hier davon ab, daß diesen Drehungen gemäß dem Gleichsinne der Gestaltänderung der *A*-Körner ebenfalls ein gewisser Sinn innewohnen wird, was geometrisch eigens verfolgt werden muß.

Unter den nachrückenden Körnern der Nicht-*A*-Gruppe, deren Achsen rotieren, wird die Beanspruchung des Ganzen jeweils jene Körner für

Korndeformation auslesen, deren Elastizitätsgrenze bei der erreichten Achsenlage eben kleiner als die intergranulare Reibung wird.

Dies wird bei Körnern der Fall sein, deren Achsenlage durch ihre Drehung eine zur Achsenlage der *A*-Körner subparallele oder eine zu derselben in symmetrischer Stellung, z. B. näherungsweise in irgendeiner Zwillingsstellung befindliche ist.

In bereits regeltem Gefüge entfällt, wie früher erwähnt, der Anlaß zur Drehung und ihre weitere Anpassung an die Deformation geht, wenn per Translation, ohne Störung der Regelung vor sich.

Die Regelung erscheint also unter Umständen als ein nach und nach das ganze Gefüge erfassender, nicht reversibler Vorgang. Und es ist die Regelung eines gänzlich unregelmäßigen Körnergefüges bei fortschreitender Deformation des Ganzen, namentlich bei gleichsinnigen, als eine Anpassung an diese Deformation verständlich.

Wovon hängen nun statistischer Grad und Genauigkeitsgrad der Regelung genetisch ab, wenn wir den erörterten Vorgang annehmen.

Der statistische Grad der Regelung hängt offenbar davon ab, ob die gleichsinnige Deformation des Ganzen, z. B. Walzung oder Streckung, groß genug ist, bzw. nach Dauer und Geschwindigkeit imstande ist, soundso viele nachrückende Körner zu drehen, kurz das Gefüge durchzuregeln. Die Abhängigkeit von der Dauer ist evident. Steigern wir die Geschwindigkeit, so werden wir bei grobkörnigem Gefüge früher, bei feinkörnigem Gefüge später (vgl. Geschwindigkeitsregel der Teilbewegung) an einen Wert gelangen, bei welchem zunächst Kornzerbrechung an Stelle der intergranularen Verschiebung tritt, also zunächst rupturale Teilbewegung, welche aber intergranulare Teilbewegung, Kornrotationen und damit den Fortgang der Regelung aufs neue vorbereitet.

Die Regelung wird um so genauer sein, je später in dem sich der Regelstellung mit *A* entgegendrehenden Korne Translation ohne weitere Drehung eintritt. Dieses hängt von Festigkeitseigenschaften des Minerals und von der Bindung ab; ferner sicher indirekt, vielleicht aber auch direkt von der Geschwindigkeit der Teilbewegung.

Das sich drehende Korn wird in dem Moment die Drehung in die genaue *A*-Stellung einstellen und mit Translation, bzw. Korndeformation antworten, in welchem seine Elastizitätsgrenze kleiner wird als die intergranulare Reibung. Dies wird bei irgendeiner gegebenen intergranularen Reibung ($<$ als die maximale Elastizitätsgrenze des Minerals*) desto früher und desto weiter schon vor Erreichung genauer Parallel- oder Zwillingsstellung mit den *A*-Körnern der Fall sein, je niedriger die niedrigste Elastizitätsgrenze des Minerals im Vergleich zur intergranularen Reibung ist. Es wird aber, während sich das Korn in die *A*-Stellung dreht, auch dann vor Erreichung dieser Stellung Translation an Stelle der Rotation treten können, wenn eine der niedrigsten nahestehende Elastizitätsgrenze erreicht ist; also um so eher, je näher kristallographisch andersorientierte Elastizitätsgrenzen für Translation, dem Werte nach, der niedrigsten liegen. Die Regelung wird also durch kristallographisch

*) Wo nicht, so erfolgt zunächst nicht Rotation, sondern in manchen Fällen zuerst Zerbrechung und dann Rotation der Fragmente.

verschieden orientierte, wenig verschiedene Elastizitätsgrenzen für Translation ungenauer; genauer, je ausgesprochener die niedrigste Elastizitätsgrenze ist, z. B. wenn nur eine oder tautozonale Translationsebenen in Frage kommen.

I. Je niedriger die niedrigste Elastizitätsgrenze des Minerals im Vergleiche zur intergranularen Reibung ist und je mehr andersorientierte, im Werte nahe liegende Elastizitätsgrenzen vorhanden sind, desto ungenauer wird die Regelung.

Es schiene mir von hier aus die ungenaue Regelung von kaltgereckten Karbonattektoniten und die typische schöne Regelung in Quarztektoniten verständlich, schon wenn man bedenkt, daß die intergranulare Reibung kalzitisch verschweißter Kalzitkörner von der kleinsten Elastizitätsgrenze der leicht translatierbaren Kalzite viel stärker verschieden ist als die intergranulare Reibung quarzitisch verschweißter Quarzkörner von der kleinsten Elastizitätsgrenze des Quarzes.

Wir machen also die Annahme, daß ein und dasselbe Mineral je nach der Größe der intergranularen Reibung bei Deformation mit verschiedenem Genauigkeitsgrad der Regelung antwortet. Betrachten wir nämlich die niedrigste Elastizitätsgrenze E_m eines Minerals als konstant (bei konstanter Temperatur!), so finden wir folgende Fälle:

a) E_m ist größer als die intergranulare Reibung. In diesem Falle wird weder die vorbesprochene Körnerschar A deformiert noch tritt irgend welche Regelung im Sinne unserer Betrachtung auf. Die zur Deformation korrelierten Teilbewegungen verlaufen intergranular, ein Fall, dem ich seine Sonderstellung bei früheren Gelegenheiten angewiesen habe (z. B. polymikte Mylonite).

b) E_m ist wenig kleiner als die intergranulare Reibung. Es besteht dann ein Anlaß zur Korndeformation, bzw. Translation an Stelle der intergranularen Teilbewegung erst bei genauer Einstellung des rotierenden Kornes. Es ergibt sich also bei genügender Kaltbearbeitung ein hoher Genauigkeitsgrad der Regelung.

c) E_m ist viel kleiner als die intergranularen Reibungen. Die Regelung kann dann unter unseren Voraussetzungen über ihr Zustandekommen, einen hohen statistischen Grad aufweisen, d. h. alle Körner ergreifen, aber nur eine geringe Genauigkeit, welche sich dem Verschwinden der Regel nähert, wenn E_m gegenüber der intergranularen Reibung kleiner und kleiner wird. Es verlaufen in diesem Falle die Teilbewegungen mehr und mehr als Korndeformationen und es ist bei reiner Translation Regelung unmöglich.

d) Endlich ist der Fall anzuführen, daß R_i größer wäre als die maximale Elastizitätsgrenze des Minerals. Es erfolgt in diesem Falle (z. B. ineinandergreifende Kornkonturen!) keine Rotation, sondern nur Korndeformation, und zwar entweder translatierend („plastisch“) oder rupturrell, in welchem letzterem Falle R_i sinkt.

II. Damit im Sinne unserer Betrachtung Regelung zustande kommen kann, muß also die intergranulare Reibung R_i zwischen der größten (E_{max}) und der kleinsten Elastizitätsgrenze des Minerals liegen:

$$E_m < R_i < E_{max}$$

und es tritt die genaueste Regelung in einem Bereiche auf, in welchem R_i nur wenig größer ist als E_m .

In diesem Bereiche ist der Genauigkeitsgrad der Regelung, G_r , um so größer, je kleiner R_i wird, welches sich dabei dem Werte E_m nähert.

Wächst R_i über den besagten Bereich hinaus, so nimmt die Genauigkeit ab. Bei konstantem E_m wächst also G_r mit abnehmendem R_i und bei konstantem R_i wächst G_r mit zunehmendem E_m .

Es könnte also für den Bereich E_m nahe R_i gelten:

$$G_r = \frac{E_m}{R_i} \cdot k$$

Nach dieser vorläufigen Annahme wäre also der Genauigkeitsgrad meßbar durch den Quotienten aus kleinster Elastizitätsgrenze des Minerals (kleinste Deformationskraft, geringste Festigkeit, leichteste Translatierbarkeit; streckenweise vielleicht der kleinsten Deformationsarbeit ebenfalls proportional) und aus der intergranularen Reibung (nicht gleichzusetzen der Festigkeit der Kornbindung).

Da die Hauptaufgabe nun in der Prüfung dieser Auffassung durch Gefügestudien und Experimente liegt, so möge auch die Diskussion der obigen Annahme und der Faktoren, welche E_m (Temperatur, „Ermüdung“ u. a.) und R_i (rupturelle Teilbewegung) beeinflussen, späterer Gelegenheit vorbehalten bleiben, nachdem auf das Arbeitsgebiet der passiven Gefügeregelung wieder hingewiesen wurde, dem eine noch allgemeinere Behandlung, welche seinem vielfachen Auftreten angemessen wäre, zuteil werden möge.

Erzwungene Homöotropie fließender und fester Einzelkristalle.

Im Voranstehenden wurde ausgeführt, wie sich auf Grund der Tammannschen Vorstellungen über Kaltreckung eine Vorstellung auch über das Zustandekommen passiver Gefügeregelung unter bestimmten Bedingungen gewinnen läßt, unter welchen die Möglichkeit von Kornrotationen die bezeichnende ist.

Ich habe nun aber schon anläßlich der ersten Untersuchungen über das Regelungsphänomen in Gesteinen (T. M. M. 1911) bereits ausdrücklich an die Begriffe und Beobachtungen O. Lehmanns, Springs und Cesaros Anschluß genommen. Diesen Anschluß an O. Lehmanns Begriff der erzwungenen Homöotropie nehme ich nun wieder auf, wenn ich darauf hinweise, daß passive Gefügeregelung auch durch Regelung der Einzelkristalle ohne Kornrotation möglich ist.

„Wird ein fließender Kristall von ölsaurem Ammoniak nicht quer zur Längsrichtung, sondern in irgendwelcher anderen Richtung gezerrt, so zeigt sich, wie bei anderen sehr weichen Kristallen die Erscheinung, daß sich die Struktur der Zugrichtung entsprechend ändert.“ (Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig, Engelmann 1904, p. 35 ff.).

Was hier und weit früher (Molekularphysik) Lehmann an fließenden Oleatkristallen feststellt, das hat Polanyi an dem bei Zimmertemperatur ebenfalls fließend deformierten Zinkkristall festgestellt: die Einstellung

des Raumgitters gegenüber der Beanspruchung. Gerade diese Raumgitterumstellung durch Beanspruchung beglaubigt neuerlich den Sprachgebrauch, welcher in beiden Fällen von „Fließen“ spricht. Übrigens erscheint mir neuerlich O. Lehmanns auch für die Petrographie vorbildlicher Vereinigung reicher Beobachtung und Deduktion hierin die Priorität in einer Feststellung von großer Tragweite zuzukommen.

Für die wesentlichen hier interessierenden Gesichtspunkte scheinen mir die fließenden Kristalle Lehmanns und die plastisch deformierten Kristalle der Metallographie und Petrographie so sehr zusammenzugehören, daß es schade wäre, wollte man etwa auf alle Beobachtungen an fließenden Kristallen verzichten, wo es gilt, die Plastizität und Homöotropie der „festen“ zu erörtern.

In beiden Fällen, auch bei fließenden Kristallen (vgl. Lehmann l. c., p. 36), treten Translationen als Teilbewegung im Raumgitter auf. In beiden Fällen tritt erzwungene Homöotropie des Raumgitters (Einstellung auf die Beanspruchung) auf. (Ammoniumoleat Lehmanns; Lagenquarze Sanders; Zinkkristall Polanyis.)

Endlich nimmt sowohl Lehmann (l. c., p. 36) für seine fließenden Kristalle als für „feste“ Kristalle Ludwik Czochralsky und Schmidt nach einem mir vorliegenden Manuskript, welches ausführlich auf diesen Punkt eingeht, an, daß bei Durchbewegung des Kristalls Unordnungen (Lehmann) im Feinbau des Kristalls auftreten, welche bei den „festen“ Kristallen angenommenermaßen die Eigenschaften ändern. Und wenn Lehmann (l. c.) sagt, daß ein derartig durch Strömung in Unordnung gebrachtes „Molekularaggregat“ infolge spontaner Homöotropie seinen Feinbau wieder herstellt, wenn zur Wirkung der Wärme noch eine mechanische Beanspruchungsrichtung dazukommt, so liegen meines Erachtens auch hier lehrreiche Analogien mit kaltgereckten geregelten Gesteinen, deren „Abbildungskristallisation“ und mit der Rückläufigkeit der Eigenschaftsänderungen durch Kaltreckung, wenn „geglüht“ wird, vor.

Es wäre also meines Erachtens für die Erklärung von passiven Gefügeregelungen unter verschiedenen Bedingungen sowohl Rotation nachrückender Körner und „homoachse Verschweißung“ als auch Drehbewegung im Gitter des Einzelkorns und Inhomogenisierung desselben mit heranzuziehen, zwei Vorgänge übrigens, welche immerhin sehr viel Gemeinsames haben, insofern als sich auch ein Einzelkristall unter Umständen gerade mechanischen Beanspruchungen gegenüber als ideal geordnetes Kristallitenaggregat auffassen läßt.

Was nun letztere Auffassung anlangt, so sei schließlich in diesem Zusammenhange auf etwas Fernerliegendes wenigstens kurz hingewiesen. Wenn wir uns den früher eingeführten und veranschaulichten Begriff des optisch korrelaten Kristallitenaggregates noch einmal vor Augen halten, so erscheinen die flüssigen Kristalle Lehmanns mir nicht als homogene Kristalle, d. h. nicht als Raumgitter, sondern als Teilchenaggregate, welche in bezug auf ihre Oberfläche und äußere mechanische Kräfte geregelt und zwar bisweilen anscheinend optisch korrelate Aggregate zum Konoskopbild optisch Einachsiger und Zweiachsiger geworden sind.

Es sei vorläufig lediglich hingewiesen auf die Zusammenhänge, welche meines Erachtens bestehen und sich ausgestalten lassen zwischen den Anschauungen über Inhomogenität von Kristallen durch Kaltreckung, wie sie Schmidt in der zitierten Arbeit über Eigenschaftsänderungen durch Kaltreckung entwickelt (Über Kaltreckvorgänge. Jahrb. Hochschule Leoben 1923), ferner Tammanns Einwand gegen Lehmann, daß gewisse flüssige Kristalle Systeme aus Kristallen und Amorphem seien und endlich der hier umrissenen Meinung, daß sich unter den flüssigen Kristallen überaus lehrreiche, auch optisch weiter analysierbare Beispiele dafür finden, daß an Stelle homogener Kristalle unter dem Einfluß äußerer Kräfte nicht nur inhomogene Kristalle, sondern von äußeren Kräften „geregelter Gitteraggregate“ treten können. Es ist auch hier zu erwarten, daß ganz unbeschadet der grundlegenden Beobachtungen Lehmanns sowohl diese als manche Einwände verwertend eine allgemeine Lehre, betreffend die aktiven und passiven Gefügeregelungen in geordneten Aggregaten und in Gittern, treten wird. Der Begriff des geregelten Gitteraggregates, das ist eines geregelten Aggregates aus Teilchen mit Gitterbau, wird sich vermutlich als brauchbar erweisen in Fällen, wo man angesichts der scharfen Fassung des Kristallbegriffs als Gitter nicht mehr gerne von Kristall spricht, auch nicht von „inhomogenem Kristall“ oder „gestörtem Gitter“ und eine autonome Regelung der Teilchen mit Gitterbau hervortritt.

Wenn an Stelle des homogenen Gitters unter dem Einfluß äußerer Kräfte (grobmechanische, Adhäsion, Oberflächenspannung, Schwerkraft etc.) Gitteraggregate treten, deren Optik derart an die optisch korrelierten Kristallitenaggregate (zu den Konoskopbildern Einachsiger und Zweiaachsiger mit und ohne stetige Deformation treten) erinnert, so scheint für das Studium der Regelung von Teilchen unter dem Einflusse äußerer Kräfte ein neues Gebiet durch Lehmanns flüssige Kristalle gegeben. Dieses Studium ist optisch im Anschluß an den Begriff des „optisch korrelierten Aggregats“ mit sorgfältiger Berücksichtigung beiirrender Reflexerscheinungen möglich und röntgenologisch.

Schließlich bleibt die Frage, ob sich nicht die Umstellung eines Raumgitters zur Beanspruchung, wie sie Polanyi am gereckten Zinkkristall beschrieb, mit denselben drei Annahmen betrachten läßt, welche für die passive Regelung eines ungeordneten Gefüges translatierender Körner gemacht wurden: 1. Translation in den Teilchen der Teilbewegung. 2. Rotation der Teilchen beim Nachrücken. 3. Eine Annahme über die Größe des Widerstandes gegen diese Rotation.

Da sich diese Vorstellungen nur auf die Regelung eines unregelmäßigen Systems anwenden lassen, sind sie auf Gitter erst anwendbar, wenn man annimmt, daß die erste Antwort auf die Beanspruchung eine Störung des Feinbaus durch Teilchenrotation ist, wobei vielleicht sowohl die Inhomogenität der Spannungsverteilung als die des Gitters an den Kristallgrenzen in Betracht kommt. Vor allem aber wäre festzustellen, ob Teile eines Gitters bei mechanischer Beanspruchung Rotationen ausführen können, so daß an Stelle des Gitters ein Gitteraggregat tritt. Dies nun scheint mir durch Lehmanns Abbildungen

fließender und flüssiger Kristalle (vgl. zum Beispiel Tafel 11, 13, 17²) usw.) wahrscheinlich.

IX. Einige Beziehungen zur Metallographie.

Auf die sehr naheliegende Bezugnahme zwischen Ergebnissen der Metallographie und Petrographie habe ich gerade hinsichtlich deformierter Gesteine lange hingewiesen (vgl. Literatur in Verh. G. B. A. 1923, Nr. 4), es ist dann W. Schmidt (vgl. l. c.) am meisten auf solche Beziehungen eingegangen; im ganzen aber bemerkt G. Tammann (Aggregatzustände) mit vollem Recht die geringe Bezugnahme. Es möge also hier noch einiges namentlich im Anschluß an die durch den letzteren Forscher erfahrene Belehrung angeführt werden.

Die schwierige Frage, inwieferne das Wachsen des Energiegehaltes bei Kaltbearbeitung der Metalle ein Analogon in der Gesteinswelt hat, soll hier nicht erörtert werden. Was aber die Vergrößerung des spezifischen Volumens bei Metallen durch Kaltbearbeitung anlangt, so hat sie in Tektoniten ihr bisher als Volumvergrößerung kaum beachtetes Analogon. In zahlreichen Tektoniten fand anläßlich der Deformation eine Auflockerung des Kleingefüges statt, und das so entstandene tektonische Porenvolumen (vgl. Sander, Über kohlige und bituminöse Gesteine. Mittlg. Geol. Ges. Wien 1922) wird auf verschiedene Weise besetzt: 1. Entweder authigen durch Entmischungsprodukte des Tektonits, welche nach dem Volumgesetz gebildet sind (Ergebnis: Volumvergrößerung des Gesteins) oder nicht. 2. Oder allothigen, z. B. durch Intrusionsderivate, Erze, Bitumina wie in den l. c. beschriebenen Fällen. Es ist also festzuhalten, daß durch tektonische Deformation in sehr vielen Fällen eine Vergrößerung des spezifischen Gesteinsvolumens, in vielen Fällen indirekt eine dauernde Vergrößerung des Gesteinsvolumens mit oder ohne Stoffzufuhr erfolgt. Diese Feststellung scheint angesichts der viel geringeren Volumvergrößerungen, welche schon für tektonische Annahmen in Betracht gezogen wurden, nicht ganz überflüssig. Durch die tektonische Kaltbearbeitung oberer Niveaus gewinnen viele Gesteinskörper direkt und indirekt an Volumen. Kaltbearbeitete Tektonite wachsen in diesem Sinne im allgemeinen und es wäre auch dieser Umstand für die Beurteilung der Massendefekte mit in Betracht zu ziehen. Schon deshalb, weil das tektonische Porenvolumen oft von volumengesetzlich gebildeten Mineralen besetzt und damit das spezifische Gewicht des Gesteins geringer wird, ferner, weil die tektonische Auflockerung der Gesteine sehr beträchtlich wird, so im Tithon von Drežnica 23—37 % (l. c.).

Das genaue Analogon zu der von Tammann (Metallographie, p. 57 ff.) bemerkten Volumvergrößerung der Kristalliten selbst wäre petrographisch erst zu verfolgen; wenigstens habe ich hier und l. c. lediglich intergranulares, tektonisches Porenvolumen ins Auge gefaßt.

Die bei kaltbearbeiteten Metallen auffallende Änderung der Elastizitätsgrenze und des elektrischen Leitungsvermögens durch Kaltbearbeitung ist an deformierten Gesteinen nicht kontrolliert. Eine Änderung aller Eigenschaften, welche im Einzelkorn (Kristall) orientiert sind, ist aber,

wie bereits früher erörtert wurde, in dem aus den betreffenden anisotropen Mineralen bestehenden Gestein in allen jenen Fällen zu erwarten, in welchen die Deformation gradweise Regelung des Kleingefüges mit sich bringt. Es ist zu erwarten, daß sich derartigen anisotropen Gesteinen mit erzwungener passiver Gefügeregelung (Gleitminerale oder nicht —!) mehr und mehr geregelte Metalle an die Seite stellen. Man muß also bei Beurteilung der Eigenschaftsänderungen kaltbearbeiteter Metalle ebenso auf deren mögliche, ja wahrscheinliche Anisotropie durch Kaltreckung Bedacht nehmen wie bei den Gesteinen.

Von Interesse ist ferner ein Hinblick auf die drei Hypothesen für die Eigenschaftsänderungen deformierter Metalle (vgl. Tammann l. c., p. 58) vom petrographischen Standpunkt aus.

a) Zunehmende Bildung neuer Modifikationen bei Durchbewegung. Bildung amorpher Modifikationen durch mechanische Zerstörung der Raumgitter.

Diese Hypothese wird von Tammann für Metalle abgelehnt. Für durchbewegte Gesteine ist soviel sicher, daß sich unmittelbar (vgl. mechanisch-chemische Deformation) und mittelbar neue Minerale bilden, welche die Gesteinseigenschaften vollständig ändern können; mittelbar z. B. durch die Umrührwirkung der Durchbewegung, welche keineswegs nur die Oberfläche vergrößert, sondern auch Körner aneinander bringt welche entweder chemisch aufeinander reagieren, während sie vorher mit den Nachbarn im Gleichgewicht waren, oder Körner eines Minerals in heteroachser Stellung. Ob durch letzteren Umstand eine Anregung zur Kristallitenbildung in vermittelnder Stellung gegeben ist, wie dies Tammann für Metalle annimmt, bedarf erst darauf gerichteter Untersuchungen, ebenso die Frage, ob sich intergranular in Tektoniten echte, röntgenographischer Untersuchung standhaltende Kolloide bilden können, nicht nur die bekannten feinsten, z. B. tonigen Zerreibsel.

Daß Eigenschaftsänderungen nach a) eine sehr große Rolle in Tektoniten spielen, und zwar für die geologischen und technischen Reaktionen des Gesteins entscheidende Eigenschaftsänderungen, ist durch viele tektonische Fazies veranschaulicht, so wenn z. B. aus einem sauren Granit ein Serizitgneis wird.

b) Eine zweite Hypothese bedenkt, daß Druck- und Temperaturänderungen während der Deformation neue irreversible Verbindungen schaffen können, welche bei Wiederherstellung der Anfangswerte bleiben. Auch diese Hypothese wird von Tammann für Metalle abgelehnt, weil schon die Änderung der Temperatur um einige Grade dieselben Veränderungen bedingt wie Druckänderung um einige tausend Atmosphären und Druck ohne Formänderung überhaupt keine Eigenschaftsänderungen bringt.

Vielleicht weist gerade letztere Feststellung darauf hin, daß für die Eigenschaftsänderungen (Nichtskalare) von kaltbearbeiteten Metallen die Möglichkeit von Regelungsphänomenen bei Versuchsanordnungen mit in kritischen Betracht zu ziehen ist.

Die zahllosen Beispiele für die Anpassung der Mineralfazies an Druck und Temperatur machen bekanntlich einen wesentlichen Teil der

Petrographie erstarrter Schmelzen, chemischer Sedimente und metamorpher Gesteine aus. Die innere Reibungswärme bei mylonitischer Durchbewegung von Gesteinen scheint von keinem entscheidenden Einfluß auf die Mineralbildung in Tektoniten. Wenigstens gilt dies für große Gruppen ruptuell durchbewegter Tektonite. Doch werden vielleicht sorgfältig auf diese Frage gerichtete Untersuchungen solche Einflüsse erkennen lassen, wenn hierfür Tektonite herangezogen werden, in welchen auf Zeiten stärkster Kaltbearbeitung und rupturreller Durchbewegung Zeiten mit lebhafter Kristallisation und „Erstarrung“ des Gefüges folgten, wie in manchen Blastomyloniten.

c) Die dritte Erklärung, deren ausführliche Vertretung durch Tammann (Metallographie p. 59—144) eine außerordentliche Anregung zu lehrreichen petrographischen Parallelen bedeutet, versteht die „Änderung der Eigenschaften bei der Kaltbearbeitung in ihren Hauptzügen als eine Folge der Strukturänderung“. Wir sind in vielen Fällen noch nicht so weit, die erwähnten Parallelen an Gesteinen durchführen zu können, auch nicht an monomykten Gesteinen translatierbarer Minerale. Andererseits möchte ich, wie bereits früher erwähnt, auf die schon ziemlich eingehende petrographische Behandlung der Regelungsfrage und auf die große grundsätzliche Bedeutung der passiven Gefügeregelung für Eigenschaftsänderungen (Vektoren) noch einmal hinweisen, welche in dieser Arbeit so oft erwähnt ist und bei Tammann als Möglichkeit der Gleichorientierung elektrischer Widerstandsvektoren schon etwas zu Worte kommt. Tammanns Theorie der intergranularen Neubildungen (vorhandener oder neuer Art) zwischen heteroachsen Körnern im Sinne einer Vermittlung zwischen dem Ungleichgewicht durch die Berührung stark verschiedener Netzebenen ist hinwieder als Anregung für petrographische Studien zu begrüßen.

Mit Ausnahme der Gefügeregelung, welche in dieser Arbeit eingehend für sich behandelt ist, seien hier folgende Hinweise vorläufig angemerkt.

Die von mir grundsätzlich (z. B. Tsch. M. M., 1915, V. R. A. 1916, Nr. 2) für deformierte Gesteine gemachte Unterscheidung intergranularer und intragranularer Teilbewegung läßt sich leider bei Gesteinen nicht so einfach an ein Trennungsexperiment mit einem polierten Versuchskörper anschließen wie bei Metallen und sind auch für monomykte prägbare Gesteine anscheinend nicht durchgeführt (Marmor z. B.) und nicht so einfach wie bei Metallen durchführbar. Es lassen sich also vorläufig nur in Umrissen die kristallographischen Grundlagen für die Metalldeformation nach Tammann mit denen der Gesteinsdeformation vergleichen.

Als eine Vorbedingung für plastische Kristalldeformation nennt Tammann das Bestehen von wenigstens drei Gleitflächen, welche den Raum für beliebig gerichtete Beanspruchung beherrschen. Die Erfüllung dieser Bedingung durch gleichwertige Netzebenen ist bei den meist kubischen Metallen von vornherein wahrscheinlich; auch bei rhomboedrischem Feinbau (Kalzit).

Die anderen Systeme werden die Ungleichwertigkeit der Gleitebenen hervortreten lassen. Ungleichwertigkeit der heterozonalen Gleitebenen vollkommenes Vorwalten singulärer Gleitebenen bei der Deformation

und ein hoher Grad von mechanischer Anisotropie hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften, namentlich die entscheidende große Differenz zwischen Bruchfestigkeit und Gleitfestigkeit kennzeichnen unter den Gesteinsbildnern namentlich die „Gleitminerale“. Die Gleitflächen sind dabei (z. B. Glimmer) zugleich die besten Spaltflächen, was mit der Starkschen Auffassung von Gleit- und Spaltflächen (vgl. Tammann l. c., p. 67) noch nicht ins Einvernehmen gesetzt ist. Wir finden, daß eine für die optische Betrachtung stetige Deformation — wie ich an Stelle von „plastisch“ genauer sagen möchte — mit Benutzung einer singulären Gleitfläche in Gleitmineralien (Glimmer-„Geflechte“, gebogene Glimmer) bei fast beliebiger Beanspruchung des Gesteins eine bedeutende Rolle spielt.

Dieser für die stetige Deformation des Gesteins wichtige Fall fällt nicht unter die Translation oder einfache Schiebung mit Zwillingsbildung, da in einem optisch stetig gebogenen Glimmer die Netzebenen alle Verstellungen gegenüber einer Bezugsfläche zeigen können. Mit dieser Ungleichwertigkeit der funktionierenden Gleitebenen — im Extrem singuläre Gleitebenen — mit der mechanischen Anisotropie in diesem Sinne hängt, wie früher erörtert wurde, das Regelungsphänomen bei nicht kubischen Kristallen bei passiver Regelung (nach meiner Auffassung) zusammen. Und obwohl ich versucht habe zu zeigen, daß sich das Regelungsphänomen unter gewissen Bedingungen durch Translation und rotierendes Nachrücken der Körner verstehen läßt, möchte ich darauf hinweisen, daß die Versuche Polanyis und die auffälligen Anklänge seiner Feststellungen an die Quarzgefügeregel auch eine direkte Einstellung der Raumgitter gegenüber der Beanspruchungsrichtung ins Auge fassen heißen. Polanyi hat (Naturwissenschaften, 1922, 16, zitierte Literatur) festgestellt, daß sich dichtest besetzte Netzebenen quer zur Streckachse (bei Metallen) einstellen und setzt hiefür Drehbewegungen voraus, meines Erachtens für Kristallitenaggregate allerdings nicht zwingenderweise, wohl aber zwingenderweise bei Dehnung eines Einzelkristalles.

Wenn wir in gestreckten Gesteinen die Quarze mit $c \perp$ zur Streckachse finden, in gepreßten Gesteinen die Quarze mit $c \perp$ zur Druckrichtung, so ist das Resultat nicht unvereinbar mit Polanyis: Es hätten sich hiebei ebenfalls dichter besetzte Ebenen quer zum Zug und parallel zum Druck gestellt, also die größten Netzebenenabstände im Sinne der Beanspruchung in die Ausweichrichtung eingestellt, wenn wir, gemäß der so häufigen stengeligen Zerpressung der Gesteinsquarze subparallel c , die dichtesten Netzebenen ungefähr in der c -Zone annehmen dürfen.

Es stellen sich also auch bei der Reckung von Kristallen die Netzebenen zur Beanspruchung ein, ob dies nun kontinuierlich oder durch Umklappen in Zwillingslagen geschieht. Auch an die Fälle von Regelung schief zu s ist angesichts dieser Unruhe zu erinnern, welche bereits weit mehr besagen, als daß es mechanisch erzwungene Gefügeregelung gibt, eine durch Lehmann, Spring, Cesaro und an Gesteinen länger bekannte Tatsache. Eine Drehung der Netzebenen gegenüber einer Bezugsfläche erfolgt bei der einfachen Schiebung als diskontinuierliche Verstellung des Raumgitters ohne sonstige Änderung. Diskontinuierliche

oder kontinuierliche Verstellung des Raumgitters bei Kaltreckung muß also als Möglichkeit für das Studium der Tektonite mit in Betracht gezogen werden; ebenso die oben erörterte mechanische Anisotropie zahlreicher Gesteinsbildner.

Ein dritter Hinweis Tammanns geht dahin, daß die Zahl der funktionierenden Translationsflächen einer Schar geringer ist, als die Zahl der Netzebenen dieser Schar und daß mit der Zahl der Translations-ebenen die Plastizität steigt. Vielleicht handelt es sich übrigens hierbei nicht um gleichzeitiges Auftreten, sondern um ein rhythmisches Weiterschreiten des Impulses zur Translation, wobei das Intervall, die Periode der funktionierenden Gleitflächen vom hydrostatischen Druck und der Temperatur abhängen kann, was für Gesteinsbildner weder verfolgt noch theoretisch erörtert ist.

Es ist eine Frage, bis zu welchem Grade das optische Kriterium verläßlich ist, wenn stetiges Wandern der Auslöschung eine stetige kontinuierliche Verstellung des Raumgitters anzuzeigen scheint, so z. B. im Falle der undulösen Quarze und gebogenen Glimmer. Im ersteren Falle habe ich mehrfach darauf hingewiesen, daß schon durch starke Objektive die Auflösung der Erscheinung in eine unstetige durch diskontinuierliche Verstellung anscheinend mit Rupturen gelingt.

Im Falle des gebogenen Glimmers erfolgen wie bei Biegung eines Papierpakets sichere Gleitungen in 001, welche optisch wirkungslos sind. Auch die Teilbewegungen im Raumgitter der einzelnen Lamellen zwischen den Gleitflächen (001) sind optisch wirkungslos: Allenthalben sind die Radien und Tangenten der Bogen Schwingungsrichtungen so wie $\parallel$ 001 und $\perp$ 001 im ungebogenen Glimmer. Es ist nichts, was immer die Dicke der Lamellen sein mag, optisch nichts von einer intralamellaren Gitterstörung zu bemerken, sondern lediglich die zur Biegung radiale und tangential, also bei Drehung des Tisches stetig wandernde Auslöschung.

Je größer die Lamellendicke, also der Abstand der benutzten Gleitflächen ist, desto eher wäre zu erwarten, daß die Biegebeanspruchung der Lamelle optisch oder röntgenographisch wahrnehmbar wäre. Die Wirkung elastischer Deformation auf die Optik kann bekanntlich eine sehr deutliche sein.

Wenn man nun annimmt, daß die Entfernung der benutzten Gleitflächen so gering wird, daß die intralamellaren Teilbewegungen keine optische Wirkung mehr haben, so wäre die Erscheinung verständlich. Und wir hätten in diesen und ähnlichen Fällen zu schließen, daß der Gleitflächenabstand eine überaus geringe, künftig wohl errechenbare Größe, vielleicht von der Größenordnung der Netzebenenabstände besitzt.

Aus diesen Andeutungen ergibt sich, daß die metallographischen Betrachtungen Tammanns über Kristalldeformation zwar für die Betrachtung der Tektonite heranzuziehen, aber zu modifizieren sind. Ebenso gilt dies hinsichtlich der Plastizität eines kaltbearbeiteten Kristallitenkonglomerats (Tammann l. c., p. 65 ff.). Diese erscheint für Gesteine durch die fünf Bestimmungsstücke Tammanns (1. Zahl der Gleitflächen-scharen, 2. deren Orientierung zur Beanspruchung, 3. Orientierung der

Richtung leichtester Schiebung in den Gleitflächen, 4. Zahl der Gleitflächen gleicher Schar, 5. Reibung der Gleitebenen) nicht bestimmt. Außer diesen lediglich intergranulare Translation berücksichtigenden Bestimmungsstücken wäre selbst bei schärfster Fassung des Begriffes Kaltbearbeitung und demgemäßer Ausschließung aller Kristallisation, welche für die Plastizität der Gesteine eine sehr große Rolle spielt, doch noch die intergranulare Reibung der Körner anzufügen.

Die genannten Deformationselemente Tammanns sind, wie Tammann bemerkt, im günstigsten Falle für den einzelnen Kristall bekannt, nicht aber für Konglomerate.

Auch hierin scheint mir das Regelungsphänomen zu beachten. Für regellose „Konglomerate“ ergeben sich eben statistische Mittelwerte, für gradweise Regelung aber eben gradweise Regelung aller gerichteten Eigenschaften. Mithin wird die Plastizität des Konglomerats (des Metalls, Gesteins) auch noch von der Regelung mitbestimmt. Es hängt seine Fähigkeit zu stetiger Deformation auch von der Gefügeregelung (Grad, Genauigkeit und Orientierung zur Beanspruchung) mit ab. Denn mit der Regelung übertragen sich sämtliche von Tammann aufgezählte Bestimmungsstücke der Plastizität gradweise auf das Konglomerat (Metall, Gestein) als Ganzes und bestimmen seine plastische oder spröde Reaktion gegenüber gegebener Beanspruchung.

Eine dauernde Änderung der Eigenschaften durch Kaltbearbeitung ist (s. Tammann l. c. 96) nur möglich, wenn die Temperatur zur Zeit der Bearbeitung eine gewisse Distanz zum Schmelzpunkt hat, so daß nicht gleich Rekristallisation eintritt. Hiemit würde die passive Gefügeregelung bei Kaltbearbeitung übereinstimmen, wenn man sie als eine derartige Eigenschaftsänderung durch Kaltbearbeitung auffaßt. Da sich nun aus petrographischen Beispielen ergibt, daß Regelungen bei Rekristallisation durch „Abbildungskristallisation“ übernommen werden können, so wäre es bezüglich der Metalle naheliegend, zu untersuchen, ob nicht irgendwelche durch Kaltbearbeitung geänderten Eigenschaften nachheriges Rekristallisieren überdauern und derart ihre Auffassung als Regelungen nahelegen können.

Auf andere Wechselbeziehungen zwischen metallographischen und petrographischen Gesichtspunkten sei hier nicht eingegangen, jedoch abermals auf die Fruchtbarkeit solcher Betrachtungen hingewiesen. Eine Beachtung der metallographischen Literatur ist für den Petrographen heute unerläßlich; daß die Petrographie manche Priorität da und dort besitzt, geht wohl aus dieser Studie und ihren Hinweisen hervor. Wenn Tammann (Aggregatzustände p. 216) bemerkt, daß kristalline Schiefer zuerst sozusagen Kaltbearbeitung, dann Rekristallisation erfahren, so deckt sich dies ganz mit den eingehenden Darstellungen, welche ich von zahlreichen Tektoniten gegeben habe, gilt aber nicht etwa von allen kristallinen Schiefen. Es geht übrigens sozusagen wohl in jeder „Warmreckung“ eine „Kaltbearbeitung“ voraus, welche nur beim Gießen von flüssigen Schmelzen, nicht aber bei „Bearbeitung“ von Festem gleich 0 wird. Wir sind im Begriffsinventar hier bereits lange ebensoweit und in der Untersuchung bis zur Darstellung aller ungleichen Fälle, was das zeitliche Verhältnis zwischen Deformation und Kristallisation

der einzelnen Minerale des Gesteins angeht, gelangt. Es würde also einen Rückschritt und Verzicht auf bereits gewonnene und begründete petrographische Einsichten bedeuten, wenn man z. B. annehmen wollte, daß es nur „kaltgereckte“ Tektonite mit Translation und „warmgereckte“ Tektonite mit Rekristallisation gebe. Eine derartige Teilung mag deformierte Metalle mehr oder weniger gut umfassen, birgt aber, auf Tektonite angewendet, die Gefahr, daß dabei die Rolle der un stetigen Korndeformation, der intergranularen Gleitung in nachkristallin deformierten Tektoniten, ferner der Holoblastenbildung (mit interner Reliktstruktur) sowie anderer Anzeichen der Teilbewegung in Lösung und der bedeutenden Mobilisation einzelner Minerale in Tektoniten mit überdauernder Kristallisation nicht richtig eingeschätzt würde.

Schließlich möge es auch dem Vergleich der Verhältnisse in deformierten Metallen und Gesteinen dienen, wenn ich zwei auf Grund der vorstehenden Erörterungen erweiterte Übersichten über kristalline Tektonite und Arten der Teilbewegung hinzufüge.

Kristalline Tektonite (Gesteine mit summierbarer Teilbewegung im Gefüge) zeigen in bezug auf ein Mineral, mehrere oder alle Minerale:

1. Mechanisch unversehrtes Gefüge; „vorkristalline Deformation“. Gleichviel, ob die Deformation schnell oder langsam erfolgte, jedenfalls erfolgte nach Deformation noch Kristallisation. Hieher „parakristalline“ Deformation; Abbildungskristallisation deformierter Gefüge; echte Deformationskristalloblastese (z. B. auch kristalline Schieferung nach Becke-Riecke); mechanisch-chemische Deformation, wofern man diese überhaupt als Kristallisationsakt auffaßt. Bei Metallen warmgereckte oder später geglähte.

2. Für die Deformation als Teilbewegung zulängliche mechanische Störung; nachkristalline Deformation.

NB. Mischtypen mit unzulänglicher mechanischer Störung sind häufig.

Die Arten der Teilbewegung im Gefüge, in Gesteinen oft nebeneinander und auf die betreffenden Minerale ausdrücklich zu beziehen:

I. Intergranulare Gleitung.

II. Korndeformation.

A. Vorkristalline.

1. Teilbewegung in Lösung: unmittelbare oder mittelbare (z. B. zeitlich getrennte nach der Deformation.)

2. Teilbewegung in Magmen; Analoga und Übergänge zu 1.

3. Fraglich: Kristallisationen ohne Lösung oder Schmelzung. („Mech.-chem. Deformation“) Rekristallisation bei Glühwirkung oder Warmreckung.

B. Nachkristalline.

1. Stetige (in bezug auf die Optik).

a) homogene (Translationen, Zwillinge durch Schiebung).

b) Bildung von inhomogenen Kristallen bis „Gitteraggregaten.“

2. Unstetige (rupturelle).

Innsbruck, Ende Juni 1923.

Sachverzeichnis.

(Abgesehen vom Inhaltsverzeichnis.)

	Seite
Bedingungen der Deformation	200 ff, 209, 210, 212, 251, 252
Durchbewegung, Bedeutung der	195 ff, 199, 201, 205, 247 ff
Ellipsoidsymmetrie der Gesteine	203, 206, 230
Entmischung, tektonische, der Silikate	208, 211
Faltung	189
Festigkeitsverhalten	191, 198
Generationen, zeitliche der Minerale in metamorphen Gesteinen	192, 195, 212
Gleichgewicht erster und zweiter Art	195, 196
Interim, geologisches	197, 201, 202, 212
Kontrollmaßstäbe bei Streckung	213
Mineralfazies	192 ff
Mobilisation	218
Optisch korrelierte Aggregate	223 ff, 244, 245
Petrotektonik, Aufgaben derselben	183, 192, 198, 205
Quarzgefügeregel	216 ff, 219, 249
Rekristallisation	209, 210, 251
Schiebung der Gesteine	202
Stetigkeit, räumliche, der Deformation	199, 200, 205, 249
Teilbewegung, mittelbare	204, 210
Tektonische Fazies und Mineralfazies	192 ff, 206 ff
Ungleichgewicht	194, 197, 198
Volumenvermehrung bei Durchbewegung	246, 211

Inhalt.

	Seite
I. Richtung und Stoffe petrotektonischer Analysen	183
II. Tektonite und Klassifikation metamorpher Gesteine	192
III. Durchbewegung und Mineralfazies; Symmetrie der Tektonite	198
IV. Mechanisch-chemische Deformation der Minerale	206
V. Sekundäre und mittelbare Teilbewegungen; tektonische Entmischung	208
VI. Streckung an Gesteinsgrenzen	212
VII. Zur Deutung geregelter Gefüge	215
VIII. Erörterung einer Hypothese über die passive Regelung von Gefügen translatierbarer Kristalle	237
IX. Einige Beziehungen zur Metallographie	246

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt](#)

Jahr/Year: 1923

Band/Volume: [73](#)

Autor(en)/Author(s): Sander Bruno, Pernt M.

Artikel/Article: [Zur petrographisch-tektionischen Analyse 183-253](#)