

4. Gläser verschiedener Farbe (regelmäßig geformte Glaskörper, eckige Bruchstücke, glasige Überzüge auf Gesteinen).
5. Fragmente von nickelreichem Eisen.

Daß bei der Bildung des Mondbodens und der Breccien zerstörende Prozesse hoher Energie gewirkt haben, lehrt die Beschaffenheit vieler Gesteinsfragmente, in denen die einzelnen Mineralkörner von zahlreichen Sprüngen durchsetzt und, wie die optische Untersuchung zeigt, innerlich verbogen oder zu kleinen Bereichen voneinander etwas abweichender Orientierung zerfallen sind. Durch die Untersuchung mit Röntgenstrahlen kann man nachweisen, daß diese Lockerung und Auflösung des Kristallverbandes vielfach bis in die Größenordnung atomarer Abstände reicht: Die durch Beugung der Röntgenstrahlung am Kristallgitter der mechanisch besonders stark zerrütteten Mineralkörner entstehenden Figuren sind in charakteristischer Weise verzerrt, da der einheitliche Kristallverband in sehr kleine, gegeneinander verstellte Bereiche aufgelöst ist.

Außer diesen Erscheinungen intensiver Zertrümmerung von Mineralien und Gesteinen, die auch durch heftige vulkanische Explosionen oder durch tektonische, das heißt gebirgsbildende Vorgänge hervorgebracht sein könnten, beobachtet man aber in den Mineralien der Breccien und des Mondbodens Deformationen und Umwandlungen besonderer Art, von denen man weiß, daß zu ihrer Erzeugung Druckstöße von vielen hundert Kilobar (1 kbar: 1000 at) erforderlich sind. Derartige hohe und plötzliche Druckstöße, sogenannte Stoßwellen, können nicht durch vulkanische Eruptionen oder tektonische Vorgänge erzeugt werden, das heißt, man kann sie auf keine Weise aus dem Inneren des Mondes ableiten. Stöße so hoher Energie können den Mond nur von außen her getroffen haben. Sie sind auf die Einschläge von Meteoriten und wohl auch von Kometen zurückzuführen, welche im Laufe der Zeit vom Mond eingefangen wurden. Diese Körper des Planetensystems aller Größenklassen können die Mondoberfläche, je nach ihrer Eigengeschwindigkeit, mit Geschwindig-

keiten zwischen 2,4 und 70 km/sec treffen, ohne, wie auf der Erde, durch eine schützende Atmosphäre abgebremst zu werden.

Trifft ein derart schnelles Projektil auf einen festen Körper, so entsteht eine Stoßwelle, das heißt ein plötzlicher Druckstoß, der sich mit Überschallgeschwindigkeit fortpflanzt. Die Höhe des Druckes hängt sowohl vom Material des Projektils als auch von dem des getroffenen Objektes ab. Durch meteoritische Projektile werden schon bei Geschwindigkeiten von einigen km/sec in silikatischen Gesteinen Druckstöße von mehreren hundert Kilobar erzeugt. Mit der durch die Stoßwelle erzeugten starken Kompression geht auch eine Erwärmung einher. Bei Gesteinen, wie sie auf dem Mond vorkommen, ist die durch Stoßwellendrucke von 600 bis 700 Kilobar erzeugte Temperatur so hoch, daß das Gestein nach dem Durchgang der Stoßwelle vollkommen geschmolzen ist. Stoßwellendrucke über 1000 kilobar bringen ein silikatisches Gestein zum Verdampfen.

Die plötzliche Kompression bei gleichzeitiger Erwärmung ruft in Mineralien typische Umwandlungen der Kristallstruktur und bestimmter Deformationen hervor, die als Spuren der Stoßwelle nach dem Abklingen des Druckstoßes erhalten bleiben und als solche erkannt werden können. Seit einigen Jahren ist es möglich, Stoßwellen im Laboratorium zu erzeugen und ihre Wirkungen auf bestimmte Mineralien zu untersuchen. Außerdem kann man die Effekte der durch Meteoriteneinschlag erzeugten Stoßwellen auf Gesteine auch direkt in großen irdischen Meteoritenkratern beobachten. Mehrere solche Krater sind zum Beispiel in Canada bekannt. In Deutschland ist das vor 15 Millionen Jahren entstandene Nördlinger Ries (Durchmesser 20 km) ein geologisch relativ junger und daher noch recht gut erhaltener Meteoritenkrater.

Auf Grund der Laboratoriumsversuche mit Stoßwellen und an Hand der an irdischen Meteoritenkratern gewonnenen Erfahrungen war es möglich festzustellen, daß es in den Mineralien des Mondbodens unzweideutige Spuren der Einwirkung von Stoßwellen hoher Energie gibt, die allein auf die Wirkung des Aufpralls von Meteoriten zurückgeführt werden können. Derartige Erscheinungen sind an allen drei Hauptmineralien der Mondgesteine zu beobachten:

Die Abbildung 5 zeigt ein Plagioklas-korn mit feinen Lamellen, die sich durch eine geringere Licht- und Doppelbrechung vom Mutterkristall unterscheiden. Solche Lamellen entstehen durch einen partiellen Zerfall des Plagioklaskristalls unter dem Einfluß von Stoßwellen genügend hoher Energie. Sie sind von irdischen Meteoritenkratern wohl bekannt und man kann sie experimentell durch Stoßwellen mit Spitzendrücken zwischen 250 und 300 kbar erzeugen. Durch Stoßwellendrucke über 300 kbar wird der Plagioklas vollständig in eine glasige Substanz umgewandelt. Dies geschieht im festen Zustand, ohne daß der Kristall schmilzt, so daß die äußeren

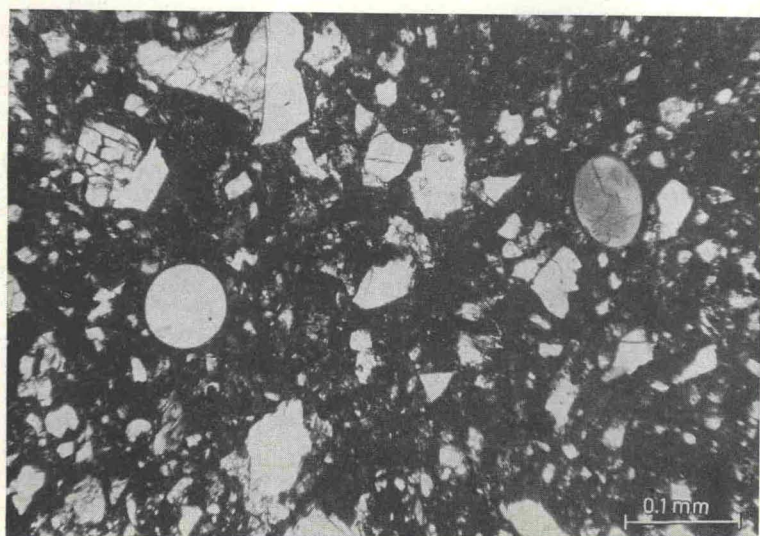


Abb. 4. Mond-Breccie, mikroskopisches Dünnschliffbild. In einer dunklen Grundmasse sind Fragmente von Gläsern, Plagioklas, Pyroxen (Spaltrisse!), Ilmenit und rotationssymmetrische Glaskörper eingebettet.

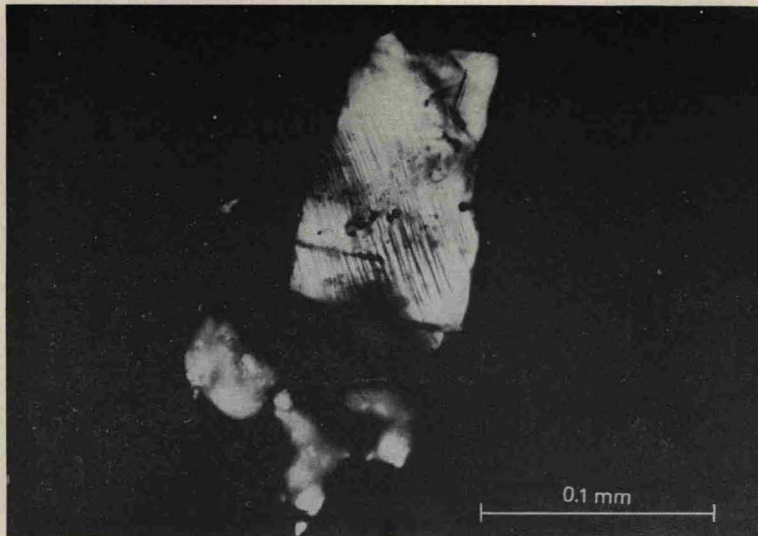


Abb. 5. Plagioklas mit feinen durch Stoßwellen erzeugten Deformationslamellen. Mikroskopisches Bild eines Kornes aus dem Mondboden, gekreuzte Polarisatoren. Die dünnen Lamellen haben keine oder eine nur geringe Doppelbrechung.

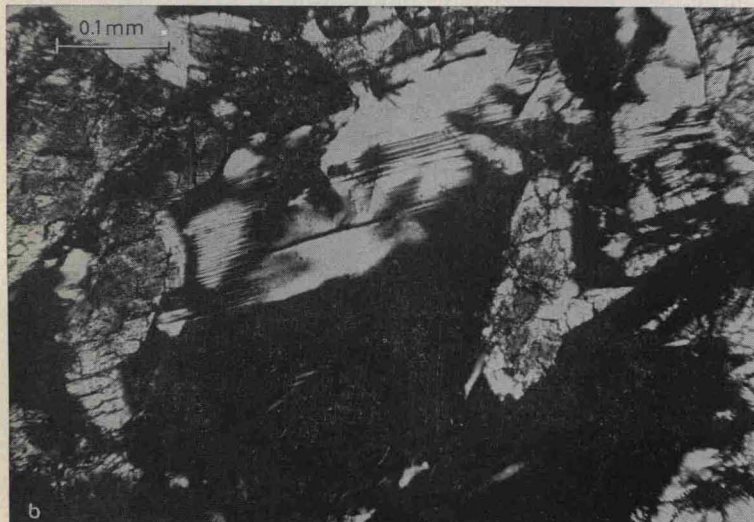


Abb. 6. Umwandlung von Plagioklas in isotropes Glas durch die Einwirkung von Stoßwellen, welche von einem Meteoriteneinschlag herrührten. Mikroskopisches Dünnschliffbild. — a: gewöhnliches Licht: Das große, farblose Plagioklaskorn ist von Pyroxen und Ilmenit umgeben. Deformationslamellen sind schwach erkennbar. — b: gekreuzte Polarisatoren: Die Hauptmasse des Plagioklaskorns ist im festen Zustand in ein optisch isotropes Glas (diaplektisches Glas) umgewandelt und erscheint daher unter gekreuzten Polarisatoren dunkel. Im oberen Teil des Kornes beginnende Isotropisierung in unregelmäßigen Flecken und dünnen Lamellen. Der Pyroxen ist unversehrt.

Formen der Körner erhalten bleiben. Lichtbrechung und Dichte dieses durch Stoßwellen erzeugten sogenannten diaplektischen Glases sind höher als die eines normalen Glases, das durch Schmelzung von Plagioklas entsteht. Die Abbildungen 6a und 6b zeigen Dünnschliffbilder stoßwellenbeanspruchter Gesteinsfragmente aus dem Mondboden von Apollo 11 und 12, in denen der Plagioklas ganz oder zum größten Teil in diaplektisches Glas umgewandelt ist. Einzelne Körner von diaplektischem Plagioklasglas sind im Mondboden und in den Breccien häufig.

Stoßwellenbeanspruchte Pyroxene enthalten charakteristische Lamellensysteme, die im Polarisationsmikroskop deutlich hervortreten (Abb. 7, 8). Derartige Lamellen bestimmter kristallographischer Orientierung sind Spuren innerkristalliner Gleitvorgänge, die nur durch Stoßwellen in Gang gesetzt werden und bei langsamen Verformungsvorgängen bei niedrigeren Drücken nicht entstehen können.

Auch in Olivinkörnern des Mondbodens kommen ebene Deformationsstrukturen vor, die als Spuren von Gleitvorgängen aufzufassen sind, die, wie man aus Stoßwellenexperimenten weiß, nur durch Stoßwellen erzeugt werden können. Feine Lamellensysteme in Ilmenitkristallen des Mondbodens sind vermutlich ebenfalls durch Stoßwellendeformation entstanden.

Charakteristische Bestandteile des Mondbodens und der Breccien sind verschieden gefärbte und geformte Gläser, die etwa 50% des lockeren Bodens ausmachen. Man kann verschiedene Arten von Gläsern unterscheiden:

Nicht durch Schmelzung, sondern im festen Zustand entstanden sind die bereits erwähnten im Mondboden und in den Breccien häufigen farblosen Fragmente von diaplektischem Plagioklasglas. Durch Schmelzung gebildete Gläser verschiedener Farbe kommen entweder als regelmäßig geformte Körper oder als eckige Bruchstücke vor. Die meisten regelmäßigen Glaskörper sind Kugeln mit Durchmessern zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und 2 mm. Neben den Kugeln gibt es längliche Körper, solche, die in der Mitte eine Einschnürung haben sowie hantelförmige und tränenförmige Gebilde (Abb. 9, 10, 11). Die nicht-kugeligen Körper sind rotationssymmetrisch, die Symmetrieachse ist die längste Achse. Sie sind offenbar aus flüssigen Schmelztropfen entstanden, die durch das Vakuum der Mondoberfläche geschleudert wurden. Unter dem Einfluß der Oberflächenspannung allein müssen die Schmelztropfen Kugelgestalt