

**Christian W. Dullo und Gerd F. Tietz****Die Zusammensetzung einiger Einschlüsse im Meteoriten von Unter-Mässing****Abstract**

A troilitic inclusion was found in a recently cut slab from the Unter-Mässing iron-meteorite. The chemical composition of this inclusion was analysed applying EDX-techniques combined with SEM observations. The reaction rim developed along the troilitic inclusion is made up by schreibersite (neither cohenite nor graphite could be analysed due to technical limitations) as reported also from other irons characterized by a more pronounced coarser internal structure. Within the reaction rim two contrasting types of fabric were observed: towards the interior of the meteorite body schreibersite is interfering with troilite, at the opposite side that is now directed to the surface of the meteorite an imbricated ridge separates troilite from schreibersite. This ridge is made up entirely from pentlandite that is suggested to represent the final reaction product when troilite became reabsorbed by the octaedrite probably in "the early days" of the meteorite.

**Einleitung**

Auf Initiative von Herrn R. Heißler wurde vom großen Block des Unter-Mässinger Meteoriten eine kleine, 96 g schwere Scheibe abgesägt. Hierbei durchschnitt man zufällig einen, von außen nicht sichtbaren, ca. 1 cm großen, runden Einschuß etwa 3 cm von der äußeren Schmelzkruste entfernt. Im Gegensatz zum mehr oder weniger homogenen silbrig-grauen Oktaedrit ist der Einschuß deutlich matt (= spröde) und von dunkelgrauer bis grau-grünlicher Farbe. Ein Einschuß dieser Größe ist eine Besonderheit unter den wenigen, dem „Unter-Mässinger“ ähnlichen Eisenmeteoriten. Der Einschuß weckt verständlicherweise Neugier auf seine Zusammensetzung. Wir wurden gebeten, mit äußerster Vorsicht und möglichst ohne nachhaltige Materialveränderungen den Chemismus des Einschlusses zu untersuchen. Als Untersuchungsgerät bot sich das neue Rastermikroskop (CamScan) mit angeflanschem EDS-Zusatz (EDS = energiedispersives Analysensystem, Ortec System 5000) des Paläontologischen Institutes der Universität Erlangen-Nürnberg an.

Durch das erneute Erscheinen des Halleyschen Kometen während der Wintermonate 1985/86 herrscht ganz allgemein gesteigertes Interesse an extraterrestischen Erscheinungen und deren Einflüssen auf die Erde. Einen besseren Zeitpunkt konnte die NHG nicht wählen, neuerlich auf „ihren“ besonderen Schatz, den Meteoriten von Unter-Mässing, hinzuweisen. Nachdem 1963 in den Jahresmitteilungen die alte Arbeit von HESS (1920) nachgedruckt wurde, folgte 1970 eine allgemeine Vorstellung und Würdigung des Meteoriten durch KIMBERGER. In einem nächsten Aufsatz stellte PREUSS (1976) Vergleiche zu ähnlichen Eisenmeteoriten an und konnte bereits die besondere Stellung des „Unter-Mässingers“ hervorheben. In der Arbeit von VOSHAGE (1979) stand dagegen die Ausdeutung spezieller Alters-

**Zusammenfassung**

Zufällig wurde in einer in jüngster Zeit abgesägten Scheibe des Meteoriten von Unter-Mässing ein ca. 1 cm großer Troilit-Einschuß durchschnitten. Energiedispersive Röntgenanalysen ausgesuchter Meßpunkte ergaben charakteristische Elementverteilungen für Troilit-Einschuß, den Reaktionssaum zum Oktaedrit und den Oktaedrit. Die Ergebnisse stimmen mit Literaturdaten überein: der Reaktionssaum besteht größtenteils aus Schreibersit. Auffällig ist eine gegensätzliche Ausbildung des Reaktionssaumes, der entlang einer Hälfte des Troilit-Einschlusses eine echte Übergangszone zwischen Troilit und Oktaedrit darstellt, während die andere Hälfte durch eine deutlich gegen den Troilit abgesetzte Grenzschrift, in der Pentlandit vorherrscht, gegen den eigentlichen Reaktionssaum abgegrenzt ist. Über den Zeitpunkt der Reaktion Troilit : Oktaedrit können keine konkreten Angaben gemacht werden. Es wird angenommen, daß es sich um eine teilweise Resorption ehemaligen Chalkosphärenmaterials des Mutterasteroiden handelt.

untersuchungen (Bestrahlungsalter) im Vordergrund. Diese Daten erlauben die Zuordnung „unseres“ Meteoriten zu einer kleinen Gruppe sehr alter, lange durch den Weltraum geflogener Himmelskörper. Der vorliegende Aufsatz zeigt die oft krassen Unterschiede im Chemos der Oktaedrit-Hauptmasse gegen einige Einschlüsse. Dabei wird deutlich, welche Möglichkeiten die moderne, computer-gestützte, zerstörungsfrei arbeitende Analysentechnik heute bietet, obwohl Elemente, die leichter als Fluor sind (z.B. C, N) genausowenig erfaßt werden können wie die sehr geringen Konzentrationen sogenannter Spurenelemente.

### **Einige Bemerkungen zur Analysenmethode**

Meteoreisen ist sehr leitfähig und kann daher im Rastermikroskop direkt betrachtet werden, ohne daß zusätzlich weitere Leitschichten (etwa aus Gold oder Kohlenstoff) auf die Oberfläche aufgebracht werden müssen. Den meisten NHG-Mitgliedern ist das Prinzip des Rastermikroskopes aus zahlreichen Artikeln bekannt; daher soll hier nur ganz kurz der EDS-Zusatz in seiner Arbeitsweise vorgestellt werden:

Trifft der Elektronenstrahl des Rastermikroskopes die Oberfläche der Probe, dann wird ein Teil der Elektronen infolge eines elastischen Stoßes an den Atomen der Probe „rückgestreut“, die Energie der anderer Elektronen vermag als Folge eines unelastischen Stoßes „Sekundärelektronen“ aus dem oberflächennahen Bereich herauszuschlagen. Diese Elektronen verursachen die Signale, die zur Herstellung des üblichen Rasterbildes verwendet werden. Gleichzeitig werden, abhängig von der Energie des auftreffenden Elektronenstrahles, Röntgenstrahlen erzeugt:

1: durch die schon erwähnten unelastischen Stöße an Atomen der Probe werden Röntgenstrahlen unterschiedlicher Energie kontinuierlich freigesetzt. Man nennt sie daher „Bremsstrahlung“ oder „Kontinuum“;

2: es können aber auch Elektronen aus ihren definierten Schalen um einzelne Atome herausgeschlagen werden. Beim direkt anschließenden automatischen Auffüllen dieser Lücken von äußeren Schalen aus wird Energie frei, die u.a. ebenfalls als Röntgenstrahlung abgegeben wird. Da diese freiwerdenden Energiebeträge für jede Schale und jedes Element festgelegt sind, nennt man diese Art Strahlung „charakteristische Röntgenstrahlung“.

Beide Arten Röntgenstrahlung können mit einem geeigneten Detektor erfaßt und auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werden. Die Bremsstrahlung liefert einen mehr oder weniger gleichmäßigen Buckel, während die charakteristische Strahlung element-spezifische Spitzen produziert, die dem Buckel an genau bestimmten Positionen aufsitzen. Diese Spitzen erlauben zunächst eine qualitative Aussage über das Vorhandensein einzelner Elemente. Da jedoch die elementspezifische Strahlung um so stärker ist (= höhere Spitzen ergibt), je konzentrierter das jeweilige Element in der Probe vorliegt, kann mit aufwendigen Rechnungen zusätzlich eine quantitative Analyse des betreffenden Elementes durchgeführt werden. Die Kombination Rasterbild und grafische Verteilung der Röntgenenergien ermöglichen die Bestimmung der quantitativen Zusammensetzung des oberflächennahen Probenmaterials an exakt zu lokalisierenden Punkten oder Meßbereichen.

Die Rückstreuelektronen können als zusätzliches Hilfsmittel dieser Analytik verwendet werden: ihre Signale sind um so energiereicher, je höher die Ordnungszahl des Elementes ist, an dem die Elektronen rückgestreut werden. Anschaulich kann man es sich so vorstellen: mit höherer Ordnungszahl der Elemente werden die Elektronenschalen „härter“ und die auftreffenden Elektronen verlieren weniger Energie als an „weicheren“ Schalen leichter Elemente. Werden nun die verschieden hohen Energiebeträge der Rückstreuelektronen als Grauwerte im Rasterbild sichtbar gemacht, so läßt sich die Verteilung schwerer (= heller) und leichter (= dunkler) Elemente auf Anhieb erkennen.

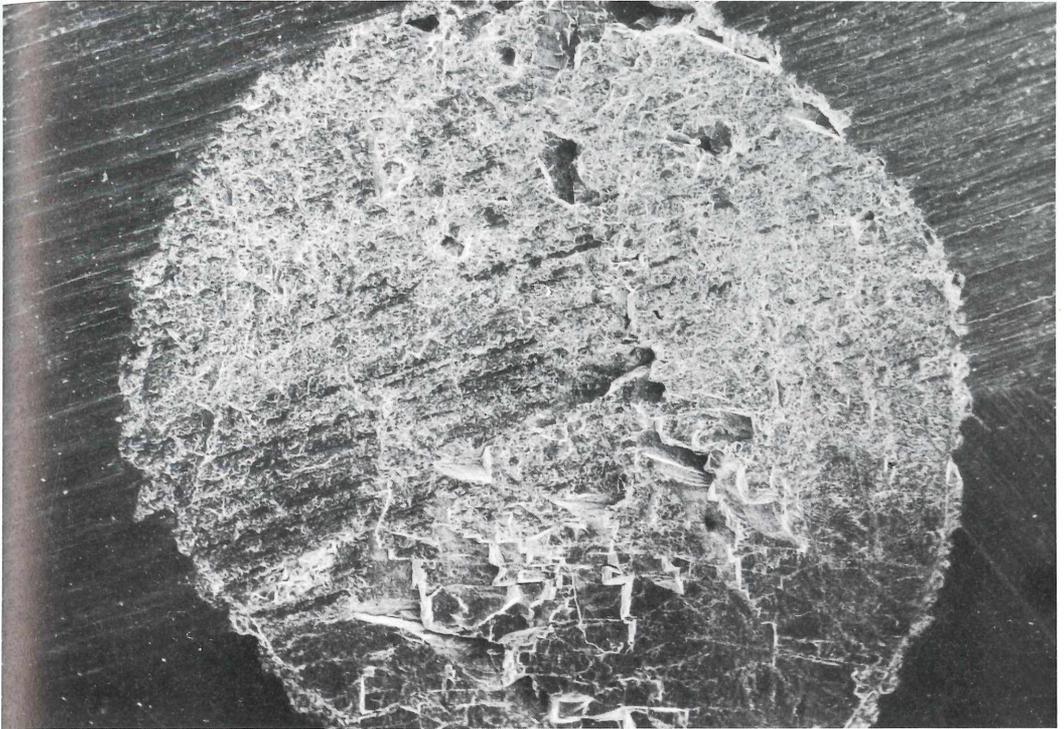


Abb. 1 Troilit-Einschluß, Durchmesser: 1,14 cm, im Oktaedrit.  
Im unteren Bild Drittel erkennbare Ausbrüche sind während des Sägens mechanisch durch Zerbrechen des Troilit entstanden. Dagegen darf angenommen werden, daß die – ebenfalls beim Zersägen – aufgerissenen Hohlräume des oberen Bildteils ursprünglich mit Graphit und/oder Cohenit ausgefüllt waren. Die Riefen im Oktaedrit sind Sägespuren, randlich geglättet durch Anfräsen für analytische Zwecke.

### Die Eigenarten des „Großen“ Einschlusses

Eine Reihe von Punktanalysen innerhalb des Einschlusses (Abb. 1) ergab, daß es sich um Troilit handelt. Dies ist ein in Meteoriten weit verbreitetes Eisensulfid (FeS), das auf der Erde auch vorkommt, hier jedoch Pyrrhotin heißt. Die beiden Namen lassen sich durch unterschiedliche Fe-Gehalte begründen: Troilit hat ein Fe/S-Verhältnis nahe 1,0, beim Pyrrhotin dagegen liegt das Verhältnis bei 0,8; dieses Mineral hat also ein deutliches Fe-Defizit verglichen mit Troilit. Von den vorgestellten Punktanalysen (Tab. 1) entsprechen 5 Analysen recht gut dem Troilit, nur 2 Proben (Nr. 33, 35) weisen ein merkliches Fe-Defizit auf, müßten also bereits als Pyrrhotin bezeichnet werden.

In der Literatur (vgl. WASSON, 1974, S. 158) sind Troilit-Einschlüsse in oktaedritischen Fe-Meteoriten (engl.: irons) durchaus bekannt, bleiben jedoch meistens auf grob- bis mittel-lamellige Oktaedrite beschränkt. Zur Erinnerung (vgl. PREUSS, 1976): Der Unter-Mässinger gehört in der Einteilung nach BUCHWALD (1974) zur sehr feinelamelligen Klasse Opl, das entspricht bei WASSON (1974) der Fe-Meteoritengruppe Ilc, die mit einer Häufigkeit von 1,5% (= 8 Exemplaren) eine exklusiv kleine Gruppe umfaßt.

Tab. 1: Elementverteilung im Troilit des „Großen“ Einschlusses (Angaben in Gew. %)

	Analysepunkte						
	31	32	33	35	36	37	11
Al	1,77	0,81	0,60	2,07	2,28	1,13	0,22
Cr	–	0,43	0,39	0,37	0,30	0,29	0,44
S	35,95	38,17	39,67	38,76	36,38	37,29	36,07
Fe	60,44	59,50	58,45	57,75	59,89	59,68	62,61
(Fe/S)	0,97	0,89	0,85	0,86	0,95	0,92	1,00
Ni	0,50	–	–	–	–	0,31	–
Co	1,34	1,09	0,89	1,04	1,14	1,30	0,66



Abb. 2 Bildbreite = 0,633 mm · Der Gegensatz Troilit : Reaktionssaum : Oktaedrit wird in der Vergrößerung besonders augenfällig. Entlang der Einschlusskante, die durch schuppenartig teilweise überlappende Leisten markiert ist, sind hauptsächlich xenomorphe (= fremdgestaltige) Schreibersitkristalle gewachsen. Dieses Bild ist typisch für den randnahen Bereich des Reaktionssaumes. Seine Breite liegt zwischen 0,1–0,2 mm.

Für Troilit-Einschlüsse ist ein randlicher Saum aus Schreibersit ( $\text{Fe, Ni, Co})_3\text{P}$ , Cohenit ( $\text{FeC}_3$ ) und manchmal Graphit (C) typisch. Genauere Untersuchungen scheitern meist daran, daß die Einschlüsse im Innern großer Meteorite konserviert wurden. Weitaus die größte Zahl randnaher Einschlüsse ist während des Eintauchens in die Erdatmosphäre ausgebrannt. Daher stellt der vorliegende Einschuß eine Ausnahme dar. Wegen seiner geringen Ausmaße konnte zudem die ganze Scheibe problemlos im Rasterelektronenmikroskop untersucht werden.

Ein auffälliger Gegensatz zeigt sich in der Abgrenzung des Troilit-Einschlusses zum umgebenden Oktaedrit: auf der randnahen Seite (Abb. 1: rechts) existiert eine scharfe Grenze; auf der randfernen Seite (Abb. 1: links) verzahnt sich der Einschuß mit dem Oktaedrit. Wegen der ungünstigen Geometrie dieser Seite (eine genaue geometrische Ausrichtung der Probe zum Rasterelektronenmikroskop-Elektronenstrahl und EDS-Detektor ist Voraussetzung für quantitative Analysen) wurden nahezu alle Analysen auf der rechten Seite des Troilit-Einschlusses durchgeführt. Hier konnte durch vorsichtiges Anfräsen eine definierte Fläche hergestellt werden.

Die randnahe Einschußseite (Abb. 2): Zwischen Einschuß und Oktaedrit hat sich ein Reaktionssaum entwickelt, der morphologisch und chemisch deutlich unterschieden werden kann. Eine leistenförmige Grenzschicht (s.u.), die aus einzelnen Schuppen aufgebaut ist, ist klar vom Troilit-Einschuß und dem Reaktionssaum abgesetzt. Der eigentliche Reaktionssaum weist ein unregelmäßiges Kristallgefüge auf, das in den Oktaedrit hineinreicht (Abb. 2).

In sogenannten Röntgenverteilungsbildern werden ausgewählte Elemente auf dem Raster-Bildschirm durch Punkte dargestellt. Punkthäufungen lassen die flächenhafte Verteilung einzelner Elemente erkennen (Abb. 3.1a–e für die rechte Einschlußhälfte, Abb. 3.2 a–c für die linke Einschlußhälfte). Die Flächenmuster der Elemente S-P-Ni-Fe zeigen klar die Eigenart des Reaktionssaumes: er ist durch hohe Phosphorgehalte gekennzeichnet. Da die erfaßbaren Minerale (Kohlenstoff wird vom EDS-Detektor nicht „gesehen“, daher ist eine Identifizierung von Cohenit nicht möglich) Troilit, Schreibersit und Nickeleisen (oder Oktaedrit) recht einfach zusammengesetzt sind, kann man versuchen, die Analysendaten der Tab. 2a auf den individuellen Bedarf dieser Minerale zu verteilen. Als ausgesprochene „Fremdstoffe“ sind dabei „lithophile“ Elemente (s.u.) aufzufassen, die mit teilweise hohen Konzentrationen vertreten sind.

Tab. 2a: Elementverteilung im Reaktionssaum Troilit: Oktaedrit (Angaben in Gew. %)

	Analysepunkte						
	30	34	38	39	40	41	17
Al	5,01	1,08	2,10	0,62	0,96	0,60	0,36
Si	0,76	–	–	–	–	–	0,44
Cl	0,11	–	–	–	–	–	–
Ca	0,14	–	–	–	–	–	–
Cr	0,27	–	0,13	–	–	0,10	–
P	2,03	–	–	–	17,29	2,15	3,74
S	23,36	11,13	15,49	6,77	0,93	17,33	1,54
Fe	63,54	75,03	69,09	87,82	62,30	73,36	84,13
Co	1,46	1,69	1,51	2,05	1,76	1,55	0,89
Ni	3,32	11,07	11,68	2,74	16,76	4,91	8,90
(Fe/S)	2	4	3	8	38	2	31
(Fe/Ni)	20	7	6	34	4	16	10
(Fe/P)	17				2	19	12

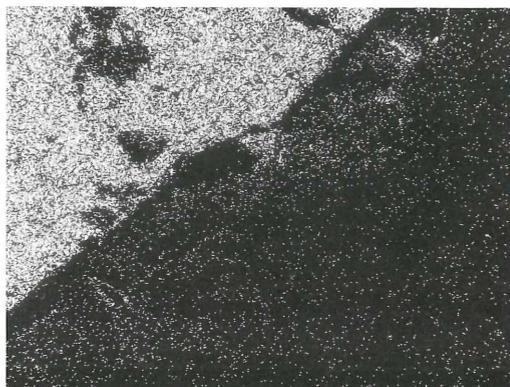
3.1c **Phosphor-Verteilung:** Phosphor ist das charakteristische Element des Reaktionssaumes und eines der Hauptelemente des Minerals Schreibersit. Generell wird sichtbar, daß der P-Gehalt im Oktaedrit höher als im Troilit ist, man beachte die einzelnen Flecke im Bild rechts unten.

Abb. 3 Übersicht und Elementverteilung von Schwefel (S) + Phosphor (P) + Nickel (Ni) und Eisen (Fe) im Reaktionssaum Troilit - Oktaedrit.

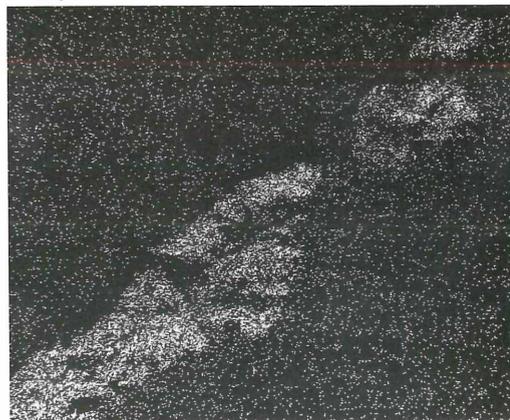
3.1 Beispiel vom rechten, randnahen Bereich des Troilit-Einschlusses



3.1a Sekundärelektronen-Bild; Bildbreite 1,614 mm

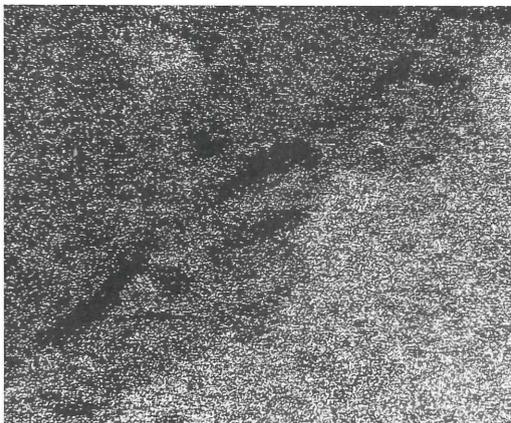


3.1b **Schwefel-Verteilung:** (Bildbreite b-e; 0,986 mm) Erwartungsgemäß kennzeichnet der Schwefelgehalt das Areal des Troilit. Die Grenze gegen den Reaktionssaum ist scharf und ± glatt ausgebildet. Im Reaktionssaum sind noch einzelne Troilit-Bereiche zu erkennen. Allgemein ist der S-Gehalt hier noch merklich höher als im angrenzenden Oktaedrit.





3.1d **Nickel-Verteilung:** Nickel ist kennzeichnender Bestandteil des Nickeleisens im Oktaedrit. Örtliche Anreicherungen im Reaktionssaum sind Schreibersit bzw. Pentlandit zuzuordnen.



3.1e **Eisen-Verteilung:** Man erkennt die allmähliche Eisenabnahme vom Oktaedrit in den Reaktionssaum hinein.

**Tab. 2b: Berechnete Mineralanteile (%) innerhalb des Reaktionssaumes Troilit : Oktaedrit.**

Mineral:	Analysepunkt:									
	9	10	17	18	30	34	38	39	40	
1 Troilit (Fe/S = 0,98)	-	1	4	2	59	30	41	18	3	
2 Schreibersit (s.u.)	19	6	24	2	12	-	-	-	96	
3 Nickeleisen	81	93	71	91	18	68	57	81	-	
4 Rest (Silikate)	-	-	1	5	11	2	2	1	1	
Ni (%) in 3:	7	6	7	1!	8	16	20	3	-	
Al/Si in 4:	-	-	1	1	7	-	-	-	-	

Schreibersit wurde berechnet als:  $(\text{Fe}_{34}\text{Ni}_{15}\text{Co}_{01})_3\text{P}$

(Die sehr niedrigen Ni-Gehalte in 18 u. 39 werden als indirekter Hinweis für das Vorkommen von Cohenit gewertet.)

**Tab. 3: Elementverteilung eines Partikels des Reaktionssaumes (Angaben in Gew. %)**

Oxide lithophiler Elemente		sidero-/chalkophile Elemente	
Na <sub>2</sub> O	1,79 Gew. %	P	0,34 Gew. %
MgO	0,75	S	4,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	Fe	8,70
SiO <sub>2</sub>	14,67	Co	0,22
CaO	0,13	Ni	0,64
TiO <sub>2</sub>	64,01		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31		

Daraus ließen sich nachstehende Mineralanteile berechnen:

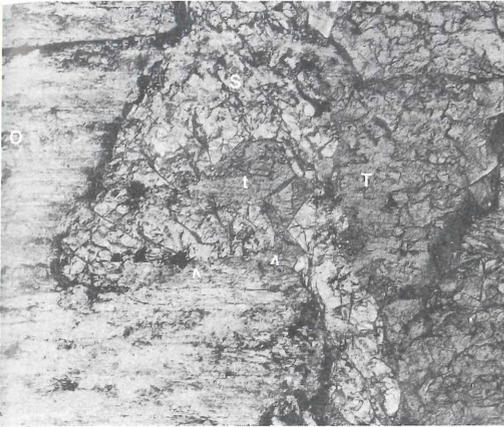
<b>Troilit</b> (Fe/S = 0,94)	12 %
<b>Schreibersit</b>	2 %
<b>Rutil</b>	64 %
<b>Albit</b>	21 % + Spuren von CHROMIT

Die Oxidform Rutil des Titans ist nicht gesichert, es könnte sich (theoretisch auch um Osbornit (TiN) handeln, da Stickstoff vom EDS-Detektor nicht gesehen wird.

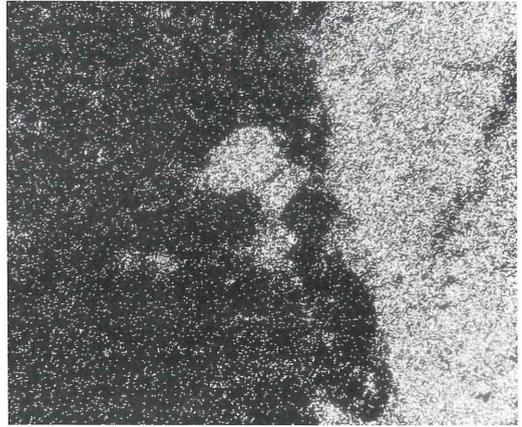
Aus diesen Ergebnissen darf man ableiten, daß innerhalb des Reaktionssaumes oktaedritisches Material mit Troilit reagierte und zwar zu einem Zeitpunkt als die Entmischung des Oktaedrit in Ni-armen Kamacit und Ni-reichen Taenit (s.u.) bereits abgeschlossen war. Schreibersit, der im Oktaedrit vorwiegend als  $\pm$  spindelartige Einschlüsse in Kamacit-Lamellen vorkommt (s.u.), bildet das Hauptmineral des Reaktionssaumes. Während des Umwandlungs- bzw. Mischungsvorganges konnten sich lithophile Elemente, die im Oktaedrit allgemein nur punktförmig als Verunreinigung verteilt sind, lokal in silikatischen Phasen (vgl. Tab. 3, Albit) anreichern. Ein  $\pm$  vollständiges Aufschmelzen innerhalb des Reaktionssaumes ist jedoch auszuschließen, da Ni-arme neben Ni-reichen Entmischungen zumindest teilweise erhalten blieben (vgl. Ni-Gehalte in Tab. 2b).

Die bisher beschriebenen Reaktionsprodukte lassen sich unschwer aus dem Oktaedrit-Material ableiten, doch zeigt die Schwefelverteilung (Abb. 3.1b, 3.2b) innerhalb des Reaktionssaumes, die deutlich höher ist als im Oktaedrit (Mittel: 0,06%), daß auch Troilit-Material an dem Umwandlungsvorgang beteiligt war. Im Gegensatz zu den Hauptelementen des Oktaedrit ist Schwefel leichter und in seinem chemischen Verhalten sehr mobil. Bei einer Reaktion Oktaedrit : Troilit ist es durchaus denkbar, daß Schwefel in den Reaktionssaum hineingewandert ist. Gegen diese Deutung sprechen aber zwei Tatsachen:

3.2 Beispiel vom linken, randfernen Bereich des Troilit Einschlusses. (Bildbreite a–c: 1,001 mm)



3.2a **Rückstreuelektronenbild:** Das dunkelgraue rechte Feld des Troilit (T) geht abrupt in das hellgraue Areal des Reaktionsssaumes (S) über, die Grenze ist nicht immer an sichtbare Kristall-/Korn-Grenzen gebunden. Innerhalb der hellgrauen Schreibersitzzone gibt es noch dunkelgraue Troilit-Bereiche (t). Der Reaktions-saum reicht mit tiefen Ausbuchtungen – teils scharf, teils undeutlich begrenzt – in den sehr hellen Oktaedrit (O) hinein.



3.2b **Schwefel-Verteilung:** Die erwähnte, unscharfe Grenze Troilit/Reaktionsraum ist jetzt sehr gut zu erkennen. Gleichzeitig sieht man, daß Troilit „reste“ noch bis in den Oktaedrit hineinreichen.



3.2c **Phosphor-Verteilung:** Der Schreibersit-beherrschte Reaktionsraum ist gegen den Troilit durchweg scharf, gegen den Oktaedrit zu verwaschen.

- 1: der „Rest“ troilit zeigt an keiner Stelle eine erkennbare Schwefelverarmung,
- 2: in Abb. 3.1, 3.2 ist zu erkennen, daß der Troilit von einer schwefelangereicherten Zone umgeben ist, die deutlich breiter ist als der eigentliche Reaktionsraum.

Diese Tatsachen lassen sich nur unter der Annahme erklären, daß der Troilit-Einschluß ursprünglich größer war als heute und vermutlich ein Stück Chalkosphäre des Meteorit-Mutterasteroiden repräsentiert. Während des Abspiegens vom Mutterasteroiden gelangte das Troilit-Bruchstück ins Nickeleisen, von dem es teilweise resorbiert wurde. Allerdings muß die Frage offen bleiben, warum auf der dem Meteoritrande zugewandten Seite des Troilit die bereits erwähnte Grenz-

Die Analyse eines Einzelpartikels innerhalb des Reaktionsraumes (Abb. 4) ergab extrem hohe Gehalte lithophiler Elemente. Als „lithophil“, „chalkophil“ und „siderophil“ werden Elemente bezeichnet, die sich vorzugsweise in Gesteinen der **Lithosphäre** (= Erdkruste mit vorwiegend silikatischen Gesteinen), der **Chalkosphäre** (= Erdmantel, oxidische Silikate und Sulfide) und der **Siderosphäre** (= Erdkern, entspricht den Meteoriten, Fe-Ni-Verbindungen herrschen vor) angereichert haben.



Abb. 4 Bildbreite: 0,051 mm Einzelpartikel innerhalb der Reaktionszone. Die Analyse ergab eine auffallend hohe Konzentration lithophiler Elemente innerhalb des markierten Rechtecks.

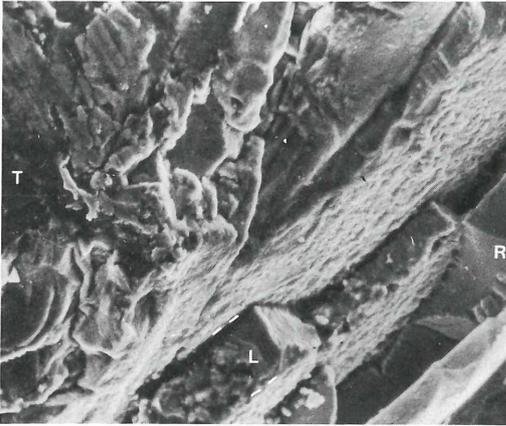


Abb. 5 Bildbreite: 0,064 mm  
Vergrößerung des Bereiches Troilit/Grenzschicht/Reaktionssaum. Der Troilit (T) ist durch eine 7–14 µm breite Leiste (L) vom eigentlichen Reaktionssaum getrennt.

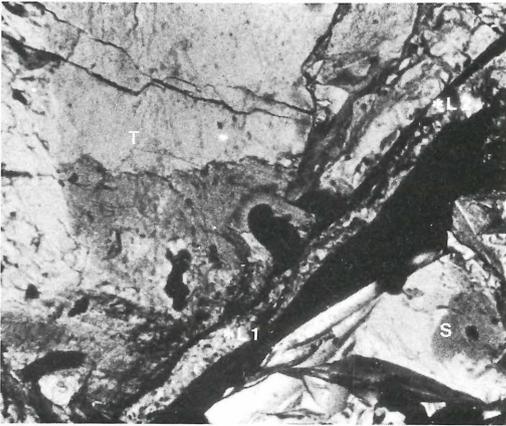


Abb. 6 Bildbreite: 0,185 mm  
Rückstreuerelektronen(BEI)-Bild der Grenzschicht (L in Abb. 5) mit den Analysenpunkten L1 und L2. Oberhalb L1 ist das typische Übergreifen der Grenzschicht-Schuppen erkennbar.

schicht ausgebildet ist, nicht aber auf der randfernen Seite. In der Literatur (siehe WASSON, 1974) werden Troilit-Einschlüsse beschrieben, die parallel zueinander liegen und einander entgegengesetzte Verteilungen von Metall (= schwer) und Schreibersit / Troilit (= leichter) zeigen. Man hat diese Anordnung durch Ausrichtung der Einschlüsse im Gravitationsfeld erklärt. Der Einschluß im Unter-Mässinger ist aber auf allen Seiten von einer mehr oder weniger dicken Schreibersitrinde umgeben, unabhängig davon, ob sich Einschluß und Oktaedrit miteinander verzahnen (= linke Seite in Abb. 1) oder scharf voneinander getrennt sind (= rechte Seite in Abb. 1). Diese Grenzschicht, die Reaktionssaum und Troilit voneinander abgrenzt, wird erst in der Vergrößerung deutlich sichtbar (Abb. 5, 6). Es ist eine markante, 7–14 µm breite, schuppenförmige Leiste (L). Zwei repräsentative Punktanalysen zeigen eine im Vergleich zu den anderen Analysen abweichende Zusammensetzung dieser Grenzschicht (vgl. Abb. 6).

Tab. 4: Elementverteilung in der Grenzschicht  
Troilit: Reaktionssaum (Angaben in Gew. %)

	L 1	L 2
Na	0,65	1,28
Mg	0,46	0,07
Al	1,36	0,62
Si	0,44	0,27
Cr	0,24	0,08
P	1,00	1,43
S	27,38	26,07
Fe	46,63	43,76
Ni	17,32	23,26
Co	3,85	3,78

Die drei Hauptelemente S-Fe-Ni lassen sich ohne Schwierigkeiten als Pentlandit  $(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$  identifizieren, etwa nachstehender Zusammensetzung:

L 1:  $(\text{Fe}_{74}\text{Ni}_{26})_9\text{S}_8$ , L 2:  $(\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34})_9\text{S}_8$ .

Die Nickelverteilung in Abb. 3.1 d zeigt eine gegenüber dem Oktaedrit nur geringfügig reduzierte Ni-Konzentration innerhalb des Reaktionssaumes. Nickel ist wesentlicher Bestandteil der Schreibersit. Eine erkennbare Trennung von Schreibersit-Nickel und Pentlandit-Nickel ist im Verteilungsbild nicht möglich. Geringe Nickelgehalte innerhalb des Troilit-Einschlusses sind auf nicht exakt definierbare Pentlandit„körner“ innerhalb von Troilitkristallen zurückzuführen. Es wird vermutet, daß die aus Pentlandit bestehende Grenzschicht durch rasche Abkühlung entstanden ist. Gleichzeitig wurden vorhandene Verzahnungen zwischen Troilit und Reaktionssaum im Gegensatz zur linken Seite zerstört oder verhindert. Mit den hier vorgestellten Analysen gelingt es zwar, Einschluß und Reaktionssaum zu charakterisieren, eine konkrete Aussage über den zeitlichen Reaktionsablauf kann jedoch nicht getroffen werden, da ein solcher Vorgang sicher längere Zeit beansprucht als etwa beim Durchfliegen der Erdatmosphäre zu Verfügung stand.

Wäre die Hitze, die die Außenteile des Meteoriten während dieses sehr kurzen Fluges verglühen ließ, bis zum Troilit-Einschluß vorgedrungen, wäre im umliegenden Oktaedrit das Gefüge aus Kamacit, Taenit, sowie feinstkristallinem Plessit sicherlich nachhaltig verändert worden. Auf der anderen Seite muß man auch annehmen, daß während des Weltraumfluges (ca. 1400 Mill. Jahre, VOSHAGE, 1979) der damalige Meteoritrand mit dem jetzigen nicht annähernd identisch war. Wahrscheinlicher ist der ganze Reaktions-/Umwandlungsprozeß sehr alt und die damals abgelaufenen, submikroskopischen Vorgänge lassen sich heute nicht mehr auflösen.

### Die silikatreichen Verunreinigungen im Oktaedrit

Nicht nur Museumsbesucher, sondern auch Geologen werden von der urtümlichen Grafik der „Widmanstättenschen Figuren“ (WF) beeindruckt. Der „Unter-Mässinger“ gehört zur Opl-Klasse der Eisenmeteoriten, die durch zarte Ausbildung sehr kleiner, spindelförmiger WF gekennzeichnet ist. Mit Hilfe des Rastermikroskopes ist es einfach, diesen Typ direkt zu fotografieren.

Die WF werden durch 3 Komponenten aufgebaut (vgl. PREUSS, 1976):

- 1: **Ni-arme Kamacit-Lamellen (K)** mit Ni-Gehalten von  $< 5\%$  (RAMDOHR, 1978), oder  $7,3-4,2\%$  (WASSON, 1974); (Kamacit enthält häufig Schreibersitspindeln)
- 2: **Ni-reicher Taenit (T)** als Außensaum um Kamacit. Der Ni-Gehalt ist nach RAMDOHR (1978)  $> 12\%$ , nach WASSON (1974)  $> 21\%$ ;
- 3: **Plessit (P)**, ein mikrokristallines Gemenge aus Kamacit und wenig Taenit (Abb. 7a/b).

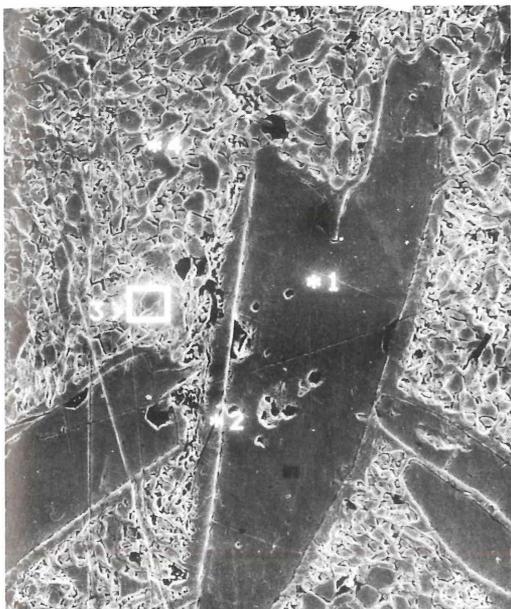
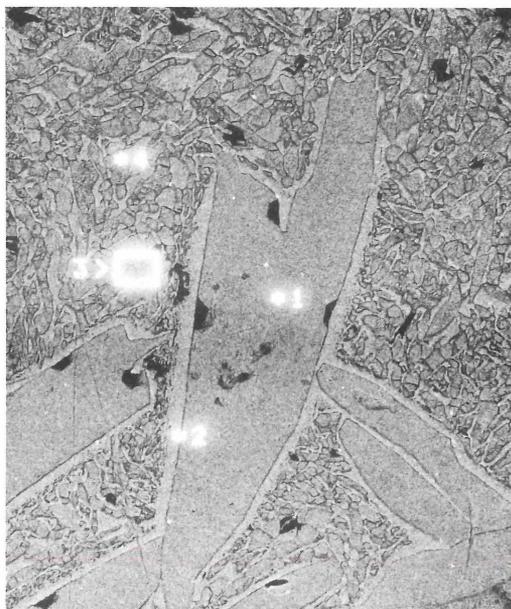


Abb. 7a Bildbreite: 0,285 mm  
Das Sekundärelektronenbild zeigt zwar die durch Ätzung sichtbar gewordenen Widmanstättenschen Figuren mit den drei Phasen Kamacit: \*1, Taenit: \*2, Plessit: \*4 + 3, doch läßt erst das folgende BEI-Bild den Materialkontrast deutlich werden.



7b Bildbreite: 0,328 mm  
Im BEI-Bild umgeben hellgraue (= schwerere) Taenitbänder die mittelgrauen Kamacit-Balken. Auch in der Plessit-Matrix können noch K- und T-Anteile unterschieden werden. Die schwarzen Flecken repräsentieren Löcher und/oder „sehr leichte“ Silikatverunreinigungen. Der erkennbare Einschluß im Kamacit der rechten unteren Bildecke ist Schreibersit.

Die nachstehenden Tabellen Tab. 5 + 6 zeigen den gegensätzlichen Chemismus von Kamacit (Balkeneisen) und Taenit (Bandeisen):

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung von Kamacit  
(Angaben in Gew. %)

	Analysenpunkte						
	29	43	45	48	83	86	92
Al	–	0,20	0,13	0,35	0,35	0,34	–
Si	–	–	–	–	0,34	0,27	–
Cl	–	–	–	1,32	–	–	–
P	–	0,7	0,04	–	0,25	0,20	–
S	–	–	–	0,41	0,11	0,12	–
Fe	91,85	90,58	91,00	91,88	90,69	91,33	92,15
Co	1,03	2,33	2,09	2,04	1,42	1,39	1,23
Ni	7,12	6,82	6,74	4,00	6,84	6,35	6,62
(Fe/Ni)	14	14	14	24	14	15	15

Tab. 6: Chemische Zusammensetzung von Taenit  
(Angaben in Gew. %)

	Analysenpunkte						
	44	46	47	84	87	91	95
Na	–	–	–	–	–	0,93	–
Mg	–	–	–	–	–	0,16	–
Al	0,10	0,16	0,28	0,13	0,33	0,02	–
Si	–	–	–	0,21	0,31	0,03	–
P	–	–	0,18	0,07	0,14	–	–
S	–	–	–	0,08	0,10	–	–
Fe	82,50	77,40	86,16	84,23	83,25	76,68	83,29
Co	1,37	1,24	1,35	1,14	1,08	0,96	1,16
Ni	16,03	21,20	12,03	14,14	14,79	21,22	15,55
(Fe/Ni)	5	4	8	6	6	4	6

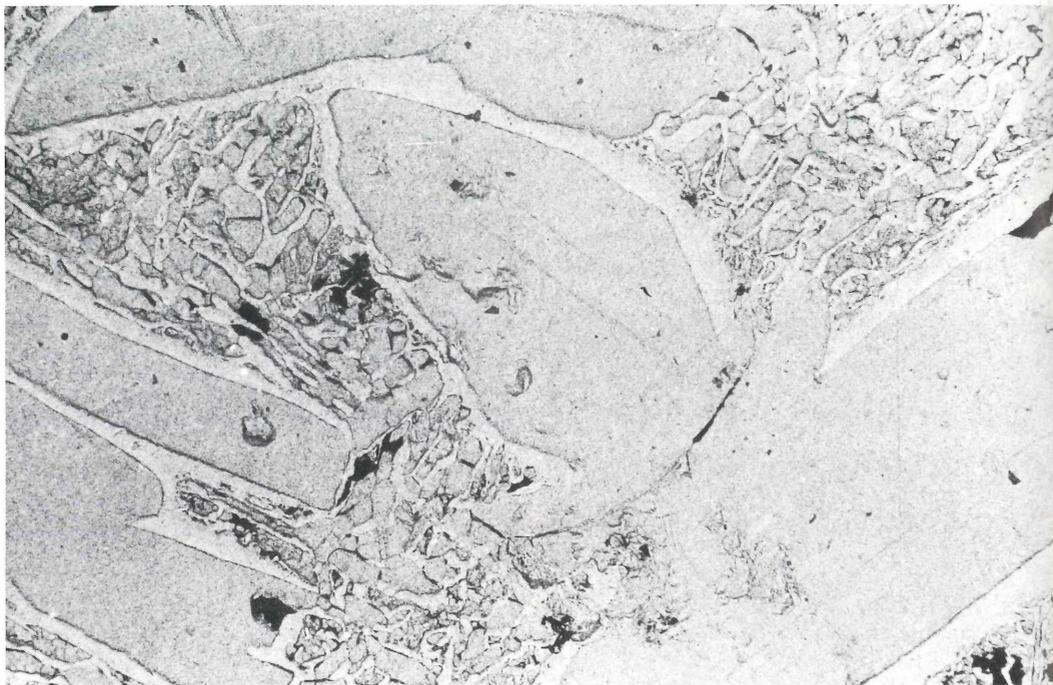


Abb. 8 Bildbreite: 0,210 mm

Im BEI-Bild wird bei höheren Vergrößerungen das Ätzrelief besonders betont. Die Ni-armen Kamacit-Balken wurden schneller/leichter gelöst als die Ni-reichen, widerstandsfähigen Taenitbänder.

Das Vorhandensein der WF beweist die Tatsache, daß der Unter-Mässinger Meteorit ursprünglich ein Einkristall gewesen ist. Während einer sehr langen Abkühlungsphase (Totalalter um 4,6 Milliarden Jahre, VOSHAGE, 1979) entmischte sich der Einkristall und Balken des  $\alpha$ -Eisens mit kubisch innenzentriertem Gitter trennten sich von bandartigem  $\gamma$ -Eisen mit kubisch flächenzentriertem Gitter. Dabei wurden Silikatreste des ehemaligen Mutterasteroiden von den entstehenden Balken und Bändern eingeschlossen, da sie nicht in die Gitterstruktur der entstehenden Mineralphasen eingebaut werden konnten. Da die Meteoritenscheibe unbehandelt, d.h. nicht durch Überzug leitfähig gemacht wurde, müssen sich im Rastermikroskop nicht-leitfähige Silikatschmitzen elektrisch aufladen. Benutzt man die Signale des Proben(oberflächen)stromes, so werden die aufgeladenen Silikatflecken als überstrahlte „Sterne“ sichtbar (Abb.10). Analysen der Silikatschmitzen (Abb. 9) enthüllen eine sehr komplexe Zusammensetzung, die in vielen Fällen nicht oder nur unter erheblichen Vorbehalten bestimmten Silikatmineralen zugeordnet werden kann. Hinzu kommt, daß die lithophilen Elemente nicht unbedingt definierten Mineralphasen entsprechen müssen, es können

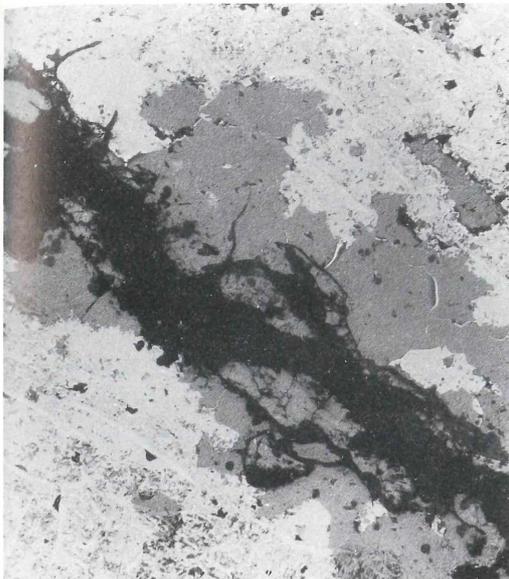


Abb.9 Bildbreite: 0,664 mm  
BEI-Bild eines silikatreichen Einschlusses im Oktaedrit als Beispiel für die zum Zentrum dunkler werdenden Signale, die leichtere Elemente anzeigen:  
hellgrau - Kamacit - Taenit - Plessit  
mittelgrau - Schreibersit  
schwarz - Silikate



Abb.10 Bildbreite: 5,50 mm  
Die statisch aufgeladenen, weil nicht leitfähigen Silikatverunreinigungen werden als überstrahlte Sterne betont.

auch Glas-Phasen vorhanden sein. Auffällig sind neben hohen Chlor-Gehalten extrem hohe Aluminium/Silizium-Verhältnisse, die das Vorhandensein von Korund andeuten. Genaue Mineralanalysen müssen jedoch speziellen Methoden wie der Röntgen-Diffraktometrie vorbehalten bleiben.

Als Anhang soll noch kurz auf die Schreibersitspindeln oder -flecken in den Kamacit-Lamellen eingegangen werden. Analysen dieser „Einschlüsse“ lieferten die Grundlage zur Berechnung der Schreibersitformeln, die bei der Abschätzung des entsprechenden Mineralanteils im Reaktionssaum des Troilit-Einschlusses verwendet wurden (Tab. 7):

Tab. 7: Chemische Zusammensetzung von Schreibersit (Angaben in Gew. %)

	Analysenpunkte				
	85	88	89	93	94
Al	0,74	0,75	0,87	0,63	0,76
Si	0,91	0,82	0,97	0,87	0,87
S	0,06	0,10	0,13	0,09	0,09
P	16,12	16,31	16,28	16,17	16,16
Fe	55,20	55,44	53,81	46,58	50,90
Co	1,66	1,74	1,80	1,63	1,69
Ni	25,31	24,84	26,14	34,03	29,53

daraus berechnete Formel:

**85/88:**  $(\text{Fe}_{34}\text{Ni}_{15}\text{Co}_{01})_3 \text{P}$  **vorherrschend**

**89:**  $(\text{Fe}_{33}\text{Ni}_{16}\text{Co}_{01})_3 \text{P}$

**93:**  $(\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{01})_3 \text{P}$

**94:**  $(\text{Fe}_{31}\text{Ni}_{18}\text{Co}_{01})_3 \text{P}$ .

Diesen kleinen, mitunter doch komplizierten Ausflug in die chemische Vielfalt kleinster und größerer Meteoriteinschlüsse sollen 2 Bilder grafisch besonders ansprechender Widmanstättenscher Figuren abschließen (Abb. 11/12).

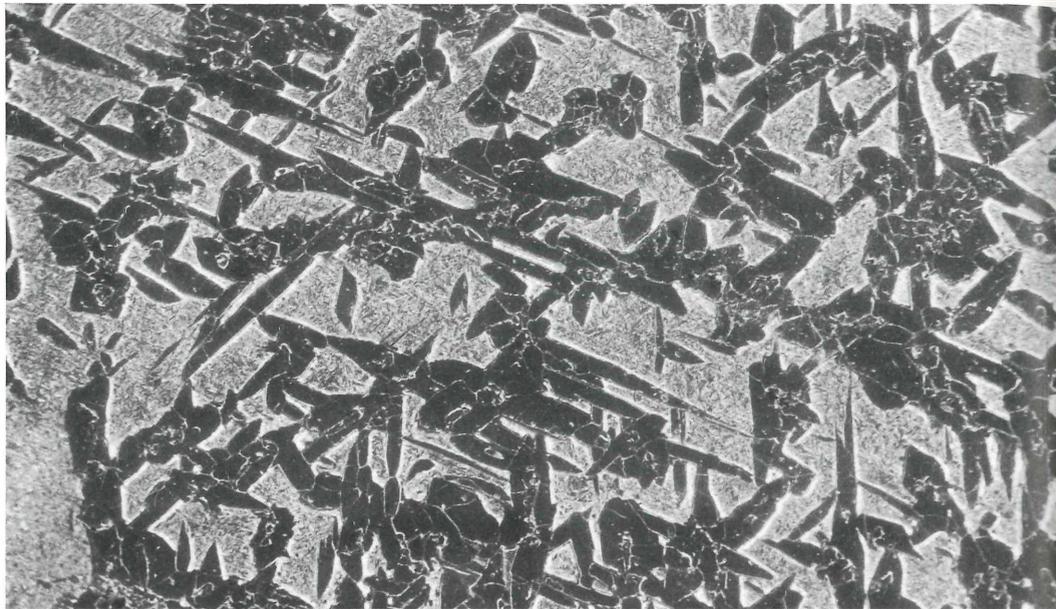


Abb. 11 Bildbreite: 4,84 mm  
Grafik der Widmanstättenschen Figuren mit deutlich geometrischer Anordnung der Kamacit-Balken im hellen Plessit.

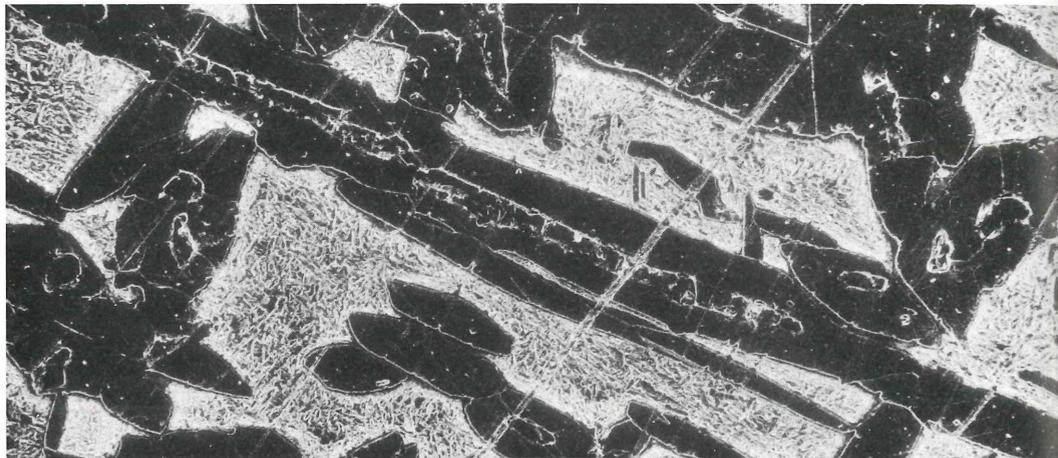


Abb. 12 Bildbreite: 2 mm  
Der dunkle Kern innerhalb des besonders breiten Kamacit-Balkens kennzeichnet eine Schreibersitzspindel.

### Literatur:

**BUCHWALD, V.F.** (1975): Handbook of Iron Meteorites. – Univ. of California Press, Berkeley

**HESS, H.** (1920): Der Meteorit von Unter-Mässing. – JMitt. 1920 Hist. Ges. Nürnberg, S. 13–15. (Nachdruck: Abh. Nat. Hist. Ges. Nürnberg, 1963, 32, S. 61–63.

**KIMBERGER, F.** (1970): Der Untermässinger Meteorit – Mittelpunkt einer Sonderausstellung. – Natur und Mensch, J.Mitt. Nat. Hist. Ges. Nürnberg, S. 96–99.

**PREUSS, E.** (1976): Der Meteorit von Unter-Mässing. – Natur und Mensch, J.Mitt. Nat. Hist. Ges. Nürnberg, S. 49–54.

**RAMDOHR, P.** (1978): Was sind Meteorite? Herkunft, Einteilung und Mineralien der Meteorite. – LAPIS, 3, 12, S. 8–11. Ch. Weise Verlag, München.

**VOSHAGE, H.** (1979): Neue Forschungsergebnisse über den Eisenmeteoriten Unter-Mässing. – Natur und Mensch, J.Mitt. Nat. Hist. Ges. Nürnberg, S. 97–105.

**WASSON, J.T.** (1974): Meteorites – Classification and properties, 316 p. Springer.

Anschrift der Autoren:

**Dr. Gerd F. Tietz**  
Ziegelwiesenstraße 12  
D-8524 Neunkirchen a.B.

**Dr. Wolf Christian Dullo**  
Institut für Paläontologie  
Loewenichstraße 28  
D-8520 Erlangen

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Natur und Mensch - Jahresmitteilungen der naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg e.V.](#)

Jahr/Year: 1985

Band/Volume: [1985](#)

Autor(en)/Author(s): Dullo Wolf-Christian, Tietz Gerd Friedrich

Artikel/Article: [Die Zusammensetzung einiger Einschlüsse im Meteoriten von Unter-Mässing 83-94](#)