

W. Scheiblechner, W. D. Schubert, S. Strobl, R. Haubner

# A heavenly sword – forging a Campo del Cielo meteorite

## Ein himmlisches Schwert – Schmieden eines Campo del Cielo Meteoriten

Received: 28.06.2022  
Accepted: 07.07.2022  
Translation: Edda Engert

Eingegangen: 28.06.2022  
Angenommen: 07.07.2022

### Abstract

After a thorough structural examination, a “Campo del Cielo” iron meteorite found in Argentina was forged at temperatures of about 1100°C. This meteorite is classified as an IA group coarse octahedrite. Besides Fe, it also contains about 7 wt.% Ni and 1.5 wt.% Co, as well as small amounts of Mg, Si, Al, S, and P.

Heat treatments above the eutectoid temperature induce a  $\alpha$ - $\gamma$  transformation of the present (Fe,Ni) solid solution. Owing to the retransformation that takes place upon cooling, the typical microstructure of the meteorite vanishes and a mainly ferritic polycrystalline microstructure forms (kamacite  $\alpha$ -(Fe,Ni)). Only minor changes

### Kurzfassung

Ein „Campo del Cielo“-Eisenmeteorit aus Argentinien wurde nach einer eingehenden Gefügeuntersuchung bei Temperaturen von etwa 1100°C geschmiedet. Dieser Meteorit ist als grober Oktaedrit der Gruppe IA klassifiziert und enthält neben Fe auch etwa 7 Gew.% Ni und 1,5 Gew.% Co sowie geringe Mengen an Mg, Si, Al, S und P.

Durch Wärmebehandlungen über der eutektoiden Temperatur kommt es zur  $\alpha$ - $\gamma$ -Umwandlung des vorliegenden (Fe,Ni)-Mischkristalls. Aufgrund der Rückumwandlung beim Abkühlen geht auch die typische Mikrostruktur des Meteoriten verloren und es bildet sich ein polykristallines, überwiegend ferritisches Gefüge (Kamacit  $\alpha$ -(Fe,Ni)). Der ursprünglich

### Authors:

**Wolf Dieter Schubert, Susanne Strobl, Roland Haubner** Technische Universität Wien, Institut für Chemische Technologien und Analytik, Getreidemarkt 9/164-CT, A-1060 Wien, Österreich; E-Mail: susanne.strobl@tuwien.ac.at, roland.haubner@tuwien.ac.at  
**Wolfgang Scheiblechner** Kunstschmied, Palfau, Österreich

Open Access. © 2022 the author(s), published by De Gruyter. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

could be observed for the initially present taenite  $\gamma$ -(Fe,Ni). Schreibersite, also referred to as rhabdite  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , melts and dissolves into the surrounding matrix. At high temperatures, locally present graphite likewise dissolves and cementite or martensite are formed upon cooling.

Changes of other phases such as troilit  $(\text{FeS})$  or lawrencite  $(\text{Fe,Ni})\text{Cl}_2$  could not be detected.

Given an initial weight of the meteorite fragment of approx. 1.5 kg, the intention was to manufacture a sword. However, since the meteorite broke apart during forging, only a knife could be manufactured.

**Keywords:** Meteorite, forging, microstructure changes

## 1 Introduction and motivation

Fragments of the Campo del Cielo ("field of heaven") meteorite were first discovered by conquistadors in 1576. Indigenous people noted that "metal fell from the sky" [1]. So far, more than 100 t of meteorite material, spread over a total of 26 craters, was found. In 1992, a 37 t fragment were discovered and seized by the Argentinian authorities [2].

The Campo del Cielo meteorite is classified as an IA group coarse octahedrite. It belongs to the class of iron meteorites, but also contains various inclusions [3–5].

The iron meteorite can be roughly classified based on its nickel content. With a content of less than 6 wt.% Ni, the totality of Ni present in the kamacite,  $\alpha$ -(Fe,Ni), can dissolve and hexahedrites form. Given a Ni content of between 6 and 20 wt.%, kamacite bars and taenite lamellae,  $\gamma$ -(Fe,Ni), form and establish the typical Widmanstätten pattern. They are referred to as octahedrites. At a nickel content of more than 20 wt.%, only a small

vorhandene Taenit  $\gamma$ -(Fe,Ni) zeigt nur geringe Veränderungen. Schreibersit, auch als Rhabdit bezeichnet  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , schmilzt auf und löst sich in der umliegenden Matrix. Lokal vorhandener Graphit löst sich ebenfalls bei hohen Temperaturen und bei der Abkühlung entstehen Zementit oder Martensit.

Die Veränderungen anderer Phasen wie z. B. Troilit  $(\text{FeS})$  oder Lawrencit  $(\text{Fe,Ni})\text{Cl}_2$  konnten nicht erfasst werden.

Bei einem Anfangsgewicht des Meteoritenstücks von ca. 1,5 kg hätte ein Schwert entstehen sollen. Da der Meteorit beim Schmieden zerfiel, konnte nur ein Messer hergestellt werden.

**Schlagwörter:** Meteorit, Schmieden, Gefügeänderungen

## 1 Einleitung und Motivation

1576 wurden erstmals Teile des Campo del Cielo (Himmelsfeld) Meteoriten von Konquistadores entdeckt. Einheimische Indianer gaben den Hinweis, dass Metall vom Himmel gefallen sei [1]. Bisher wurden mehr als 100 t Meteoritenmaterial, verteilt auf 26 Krater, gefunden. 1992 wurde ein Fragment mit 37 t entdeckt und von den argentinischen Behörden sichergestellt [2].

Der Meteorit Campo del Cielo wird als grober Oktaedrit der Gruppe IA klassifiziert und gehört zu den Eisenmeteoriten, enthält aber auch verschiedene Einschlüsse [3–5].

Die grobe Klassifizierung der Eisenmeteorite erfolgt über den Nickelgehalt. Unter 6 Gew.% Ni kann sich beim Abkühlen das gesamte Ni im Kamacit  $\alpha$ -(Fe,Ni) lösen und es entstehen Hexahedriten. Zwischen 6 und 20 Gew.% Ni bilden sich Kamacit-Balken und Taenitlamellen  $\gamma$ -(Fe,Ni) aus, welche die typische Widmanstättenische Struktur ausbilden und als Oktahedriten bezeichnet werden. Bei Nickelgehalt über 20 Gew.% liegt nur noch wenig Ka-

amount of kamacite is present so that a Widmanstätten structure is no more formed. These meteorites are called ataxites [6, 7].

The Campo del Cielo meteorite is a coarse octahedrite. It thus mainly consists of kamacite corresponding to  $\alpha$ -Fe (ferrite). The occurrence of so-called Neumann lines is typical for kamacite areas [8]. They represent twin bands which are formed by deformation at low temperatures and high pressure [9]. The amount of Neumann lines is a function of the number of collisions the meteorite was subjected to [10]. Neumann lines are only rarely found in ferritic steels [11].

Iron usually does not occur in metallic form in nature. It was therefore only in the Iron Age, when the reduction of ores became known, that it could be exploited. As per archaeological literature reports, iron artifacts were clearly manufactured before the Iron Age. It can thus be assumed that the used iron is obtained from meteorites. However, there are only few confirmed meteorite iron objects. This can probably be attributed to the fact that smaller objects corroded over the centuries and can therefore no longer be found. The most well-known object is a dagger from Tutankhamun's tomb which has already been subjected to extensive non-destructive examinations [12, 13].

It is not known that the indigenous Argentinians Indians, who knew of the existence of the Campo del Cielo meteorite, processed the meteoritic iron into objects. However, the use of meteorite iron for the manufacture of hunting weapons by the Inuit in North America is confirmed [14].

## 2 Experimental procedure

A 1.8 kg fragment of the Campo del Cielo iron meteorite was acquired at low cost (Figure 1a). First, the sample was taken in

macit vor, wodurch keine Widmanstättensche Struktur mehr ausgebildet wird. Diese Meteoriten werden als Ataxite bezeichnet [6, 7].

Als grober Oktaedrit enthält der Campo del Cielo-Meteorit hauptsächlich Kamacit, welcher dem Ferrit  $\alpha$ -Fe entspricht. Typisch für Kamacitbereiche ist das Auftreten der sogenannten Neumann-Linien [8], welche Zwillingbänder darstellen, die bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck durch Verformung gebildet werden [9]. Die Menge an Neumann-Linien ist von der Anzahl an Kollisionen abhängig, denen der Meteorit ausgesetzt war [10]. In ferritischen Stählen werden Neumann-Linien nur selten gefunden [11].

Da Eisen in der Natur üblicherweise nicht metallisch vorliegt, war dessen Verwendung erst in der Eisenzeit möglich, nachdem die Reduktion von Erzen bekannt war. Da die archäologische Literatur von Eisenartefakten berichtet, die eindeutig vor der Eisenzeit hergestellt wurden, liegt die Vermutung nahe, dass das verwendete Eisen von Meteoriten stammt. Es finden sich aber nur wenige bestätigte Teile aus Meteoriteneisen, da wahrscheinlich kleinere Stücke während der Jahrtausende korrodiert und daher nicht mehr auffindbar sind. Am bekanntesten ist ein Dolch aus dem Grab von Tutanchamun, der auch bereits umfangreich zerstörungsfrei untersucht wurde [12, 13].

Von den argentinischen Indianern, die von der Existenz des Meteoriten Campo del Cielo wussten, ist nicht bekannt, dass sie das meteoritische Eisen zu Gegenständen verarbeiteten. Jedoch ist von den Inuit in Nordamerika die Nutzung von Meteoriteneisen für die Herstellung von Jagdwaffen belegt [14].

## 2 Experimentelles

Ein etwa 1,8 kg schweres Stück des „Campo del Cielo“-Eisenmeteoriten wurde kostengünstig erworben (Bild 1a). Zuerst wurde eine Probe



**Figures 1a to c:** Forging a Campo del Cielo meteorite. a) Meteorite in its initial state, b) red-hot meteorite in the electric furnace, c) meteorite during the forging process. It can already be recognized that the meteorite starts to break apart.

**Bilder 1a bis c:** Schmieden eines Campo del Cielo-Meteoriten. a) Meteorit im Ausgangszustand, b) glühender Meteorit im Elektroofen, c) Meteorit beim Schmieden. Man erkennt bereits den beginnenden Zerfall.

order to investigate the meteorite's structure and assess its suitability for a forging attempt [15].

## 2.1 Heat treatment of a section

In order to examine the microstructural changes of the meteorite induced by mere heating, a meteorite fragment was heat treated at 1000 °C in granular carbon for one hour.

## 2.2 Forging the meteorite

Given its size, the meteorite was heated to approx. 1100 °C in an electric furnace. It was heated and forged in several cycles. It is assumed that, due to the atmospheric oxygen, various meteorite areas were preferably oxidized inducing cracks and resulting in several fragments (Figure 1b, c).

The larger fragment was subsequently encapsulated with steel sheet and further forged in the absence of air. A knife blade could thus be manufactured. End pieces of the forged knife were metallographically examined.

## 2.3 Metallography

The different samples were cut into smaller pieces using a metallographic cutting ma-

entnommen, um das Gefüge dieses Meteoriten zu untersuchen und dessen Eignung für einen Schmiedeversuch abzuschätzen [15].

## 2.1 Wärmebehandlung eines Teilstücks

Um die Gefügeveränderungen des Meteoriten bei bloßem Aufheizen zu untersuchen, wurde ein Meteoritenstück bei 1000 °C in Kohlegrieß für eine Stunde wärmebehandelt.

## 2.2 Schmieden des Meteoriten

Aufgrund seiner Größe wurde der Meteorit in einem Elektroofen auf etwa 1100 °C erhitzt. In mehreren Zyklen wurde aufgeheizt und geschmiedet. Durch den Luftsauerstoff dürften verschiedene Bereiche des Meteoriten bevorzugt oxidiert worden sein, wodurch Risse auftraten und mehrere Bruchstücke entstanden (Bild 1b, c).

In weiterer Folge wurde das größere Teilstück mit Stahlblech gekapselt und so unter Luftabschluss weitergeschmiedet. So konnte eine entsprechende Messerklinge gefertigt werden. Endstücke des geschmiedeten Messers wurden metallographisch untersucht.

## 2.3 Metallographie

Die verschiedenen Proben wurden mit einer metallographischen Trennmaschine zerklie-



chines, cold-embedded, and metallographically prepared. 3% Nital and Klemm 1 solutions were used as etchants. A light optical microscope (LOM) and a scanning electron microscope (SEM) equipped with an EDS analysis unit (Energy Dispersive X-ray) were used for the examinations. Vickers microhardness measurements (HV0.01) were also carried out at selected locations.

### 3 Results and discussion

The initial state of the Campo del Cielo meteorite has already been described [15]. Figure 2 shows several structures for comparison.

#### 3.1 Meteorite microstructure after annealing at 1000 °C

As can be seen in the comparison images in Figure 2, the annealing process induced major microstructural changes.

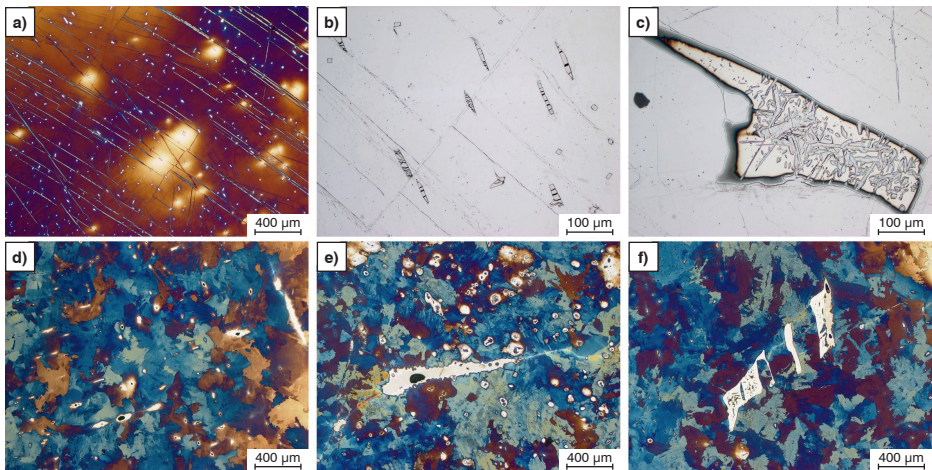
ner, kalt eingebettet und metallographisch präpariert. Als Ätzmittel wurden 3%-Nital- und Klemm 1-Lösungen verwendet. Die Untersuchungen erfolgten mittels Lichtmikroskop (LOM) und Rasterelektronenmikroskop (REM) mit einer energiedispersiven Röntgenanalyse-einheit (EDX). An ausgewählten Stellen wurden auch Mikrohärtemessungen nach Vickers HV0,01 durchgeführt.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Der Ausgangszustand des Campo del Cielo-Meteoriten wurde bereits beschrieben [15]. In Bild 2 werden für Vergleichszwecke noch einige Gefüge gezeigt.

#### 3.1 Gefüge des Meteoriten nach dem Glühen bei 1000 °C

Wie die vergleichenden Abbildungen in Bild 2 zeigen, kam es durch das Glühen zu gravierenden Gefügeänderungen.



**Figures 2a to f:** Changes in the meteorite structure induced by annealing at 1000 °C. a–c) Meteorite microstructure, d–f) microstructure after annealing, a, d) kamacite matrix, b, e) schreibersite in kamacite, c, f) plessite in kamacite a, d, e, f) Klemm etching, b, c) Nital etching.

**Bilder 2a bis f:** Veränderungen im Meteoritengefüge durch Glühen bei 1000 °C. a–c) Meteoritengefüge, d–f) Gefüge nach der Glühung, a, d) Matrix aus Kamacit, b, e) Schreibersit in Kamacit, c, f) Plessit in Kamacit. a, d, e, f) Klemm Ätzung, b, c) Nital Ätzung.

After annealing and subsequent cooling, the kamacite crystallites of an initial size of several mm have a diameter of about 0.5 mm. As can be expected, no Neumann lines are present anymore (Figure 2a, d).

The schreibersite  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , initially present in the kamacite in the form of angular crystals, melted and the elements Ni and P diffused into the surrounding kamacite. This can be recognized by the bright spots that appear after Klemm etching (Figure 2b, e). An eutectic exists in the Ni-P phase diagram at 870 °C and in the Fe-P phase diagram at 1048 °C [16]. No values are available for the Fe-Ni-P ternary system. The figures, however, clearly show that a melt has formed.

Taenite, commonly present in the form of a mixture with kamacite called plessite, is characterized by only minor changes. This can be attributed to the fact that it does not undergo a phase transformation during the annealing process. It can, however, be seen that the kamacite needles embedded in the plessite are recrystallized (Figure 2c, f).

It is known from preliminary examinations of the meteorite that not only the already described phases are inhomogeneously distributed in the meteorite, but also, for example, graphite (C), clinoenstatite  $\text{MgSiO}_3$ , troilite FeS, and lawrencite  $(\text{Fe,Ni})\text{Cl}_2$ . It is therefore difficult to trace back the origins of all observed microstructural changes [15].

Figure 3 shows some structures which will be interpreted in the following.

The large inclusion in the middle of the image is a mixture of mainly iron oxide and metallic iron with some Ni and P (Figure 3a). The dark gray fringe surrounding this inclusion visible in the SEM has a similar composition, but contains more P and some Cl (Figure 3b). Here, an initial microstructure

Aus den ursprünglich einige mm großen Kamacit-Kristalliten sind durch die Glühung und anschließende Abkühlung Kristallite mit etwa 0,5 mm Durchmesser entstanden. Die Neumann-Linien liegen erwartungsgemäß nicht mehr vor (Bild 2a, d).

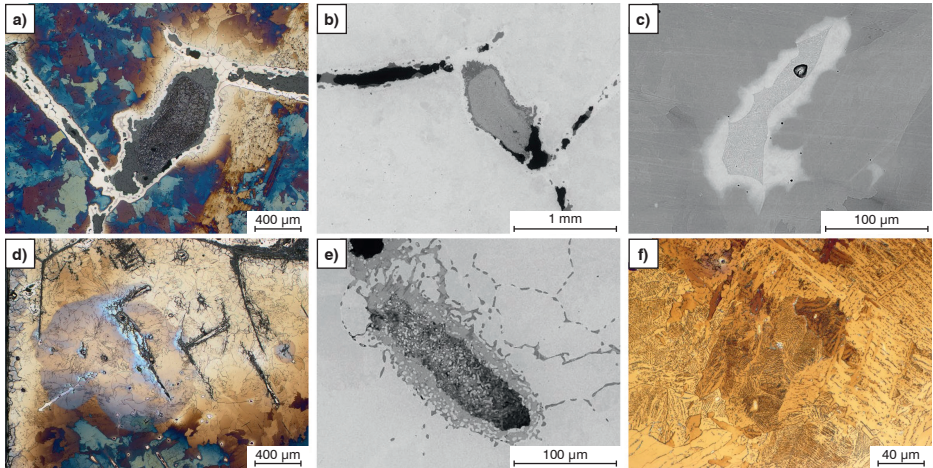
Der Schreibersit  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , welcher ursprünglich in Form von kantigen Kristallen im Kamacit vorlag, ist geschmolzen und die Elemente Ni und P sind in den umliegenden Kamacit diffundiert, was an den hellen Flecken nach der Klemm-Ätzung erkennbar ist (Bild 2b, e). Im Ni-P Phasendiagramm existiert ein Eutektikum bei 870 °C und im Fe-P Phasendiagramm bei 1048 °C [16]. Werte für das Fe-Ni-P Dreistoffsystem liegen nicht vor, aber die Bilder zeigen eindeutig, dass eine Schmelze gebildet wurde.

Taenit, der oft als Gemisch mit Kamacit vorliegt, welches als Plessit bezeichnet wird, zeigt nur geringe Änderungen, denn er durchläuft keine Phasenumwandlung während der Glühung. Es ist aber erkennbar, dass die im Plessit eingebetteten Kamacit-Nadeln umkristallisiert sind (Bild 2c, f).

Da aus den Voruntersuchungen des Meteoriten bekannt ist, dass auch andere als die bereits beschriebenen Phasen im Meteoriten inhomogen verteilt vorliegen, z. B. Graphit (C), Clinoenstatit  $\text{MgSiO}_3$ , Troilit FeS und Lawrencit  $(\text{Fe,Ni})\text{Cl}_2$ , ist es schwierig, alle beobachteten Gefügeveränderungen ihrem Ursprung zuzuordnen [15].

In Bild 3 sind einige Gefüge zu sehen, welche in der Folge interpretiert werden.

Der große Einschluss in der Bildmitte ist eine Mischung aus überwiegend Eisenoxid und metallischen Eisen mit etwas Ni und P (Bild 3a). Der im REM dunkelgraue Saum um diesen Einschluss ist ähnlich zusammengesetzt, jedoch enthält er mehr P und auch etwas Cl (Bild 3b). Hier könnte sich somit ein Aus-



**Figures 3a to f:** Microstructure after annealing at 1000°C. a, b) Complex distribution of inclusions in the LOM a) and SEM b); c) schreibersite with fringe; d, e) complex microstructure in the edge area of the sample; f) hypoeutectoid Fe-C structure, mainly bainite; a, e, f) Klemm etching, LOM; b–d) SEM.

**Bilder 3a bis f:** Gefüge nach Glühung bei 1000°C. a, b) komplexe Verteilung von Einschlüssen im LOM a) und REM b); c) Schreibersit mit Saum; d, e) komplexe Gefüge im Randbereich der Probe; f) untereutektoides Fe-C Gefüge, überwiegend Zwischenstufe; a, e, f) Klemm Ätzung, LOM, b–d) REM.

consisting of schreibersite, troilite, and lawrencite could have newly formed.

The areas not colored by Klemm etching also appear as bright strips in the SEM. Originally, they were schreibersite and contain P and Ni. SEM-EDS element distribution images (Figure 4) were acquired in the area of a schreibersite inclusion (Figure 3c). It is clearly recognizable that the concentrations of P and Ni are still high inside the inclusion. However, as early as upon the heat treatment, both elements diffused into the surrounding matrix, which is particularly true for Ni. Another SEM-EDS element distribution image was acquired in the edge area. Here, the phosphide melt apparently escaped and the remaining phosphide oxidized (Figure 5).

Figures 3d and e, in turn, show complex microstructures, though their composition was not further analyzed. Figure 3f shows a hy-

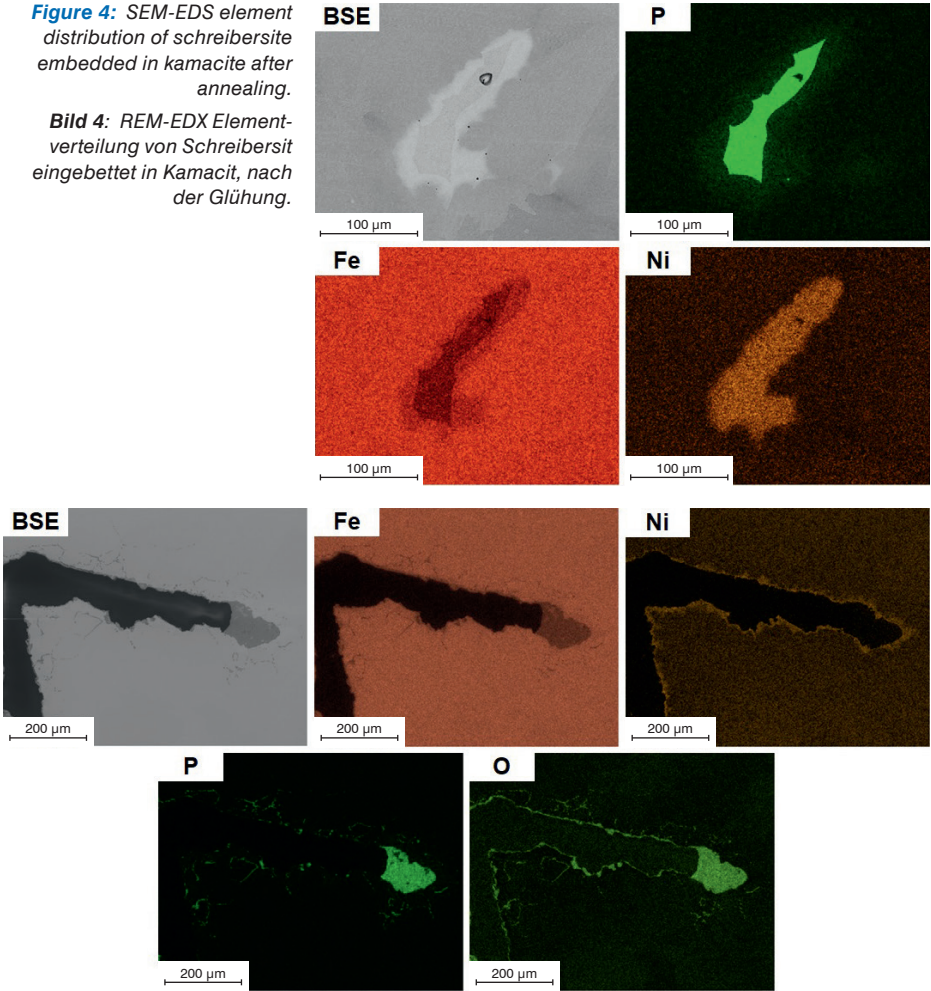
gangsgefüge von Schreibersit, Troilit und Lawrencit neu ausgebildet haben.

Die mittels Klemm-Ätzung nicht eingefärbten Bereiche sind auch im REM als helle Streifen erkennbar, waren ursprünglich Schreibersit und enthalten P sowie Ni. Im Bereich eines Schreibersiteinschlusses (Bild 3c) wurde ein REM-EDX-Elementverteilung angefertigt (Bild 4) und es ist deutlich zu sehen, dass im Inneren noch hohe P und Ni Konzentrationen vorliegen, jedoch bereits durch die Temperaturbehandlung eine Diffusion beider Elemente in die umliegende Matrix stattgefunden hat, was vor allem für Ni gilt. Eine weitere REM-EDX-Elementverteilung wurde im Randbereich der Probe angefertigt, wobei hier die Phosphidschmelze anscheinend ausgetreten ist und das verbliebene Phosphid oxidiert wurde (Bild 5).

Bild 3d und e zeigen wiederum komplexe Gefüge, deren Zusammensetzung jedoch nicht näher untersucht wurde. In Bild 3f ist ein un-

**Figure 4:** SEM-EDS element distribution of schreibersite embedded in kamacite after annealing.

**Bild 4:** REM-EDX Elementverteilung von Schreibersit eingebettet in Kamacit, nach der Glühung.



**Figure 5:** SEM-EDS element distribution of an area near the surface where the schreibersite oxidized.

**Bild 5:** REM-EDX Elementverteilung eines Bereichs nahe der Oberfläche, in dem Oxidation des Schreibersit stattfand.

poeutectoid Fe-C structure. It can mainly be referred to as bainite. The carbon could originate from dissolved graphite which was detected in the original meteorite. However, it cannot be ruled out that some carbon diffused into the meteorite during the annealing process in the carbon granule bed.

tereutektoides Fe-C Gefüge zu sehen, welches überwiegend als Zwischenstufengefüge bezeichnet werden kann. Der Kohlenstoff könnte aus aufgelöstem Graphit stammen, welcher im Ausgangsmeteoriten nachgewiesen wurde, aber, dass durch die Glühung im Kohlegrieß etwas Kohlenstoff in den Meteori-



The kamacite matrix had a micro hardness of about 150 HV0.01. Due to phosphor that dissolved in the iron, areas surrounding the molten schreibersite show increased hardness values of 300 to 500 HV0.01. Residues can often still be observed in the center of the molten schreibersite, where values of around 1100 HV0.01 were measured.

### 3.2 Meteorite microstructure after the forging process

Heating to a forging temperature of 1100 °C induces the aforementioned microstructural changes. As the first forging steps were carried out in air, oxidation likely took place at the grain boundaries and caused the meteorite to embrittle and break apart in smaller pieces. This oxygen is even retained during the subsequent forging steps carried out in the absence of air.

Figure 6 is a juxtaposition of several structures. Figure 6a is an overview image. The deformations of the different inclusions are easily recognizable. The kamacite matrix is uniformly recrystallized and has a homogeneous grain size of between 100 and 200 µm.

Owing to the fact that it only forms below the eutectoid temperature (approx. 720 °C), i. e., below the forging temperature, the kamacite shows no deformations (Figure 6b).

The large inclusion in the middle of the image is predominantly oxidic and mainly contains Fe. Apart from that, small amounts of Ni, Si, Al, P, Ca, and K were also detected by EDS.

The elongated etching pattern in Figure 6c can be attributed to transformed schreibersite which was deformed after melting. The bright strips visible in Figures 6d and 6e contain higher concentrations of nickel and

ten diffundiert ist, kann nicht ausgeschlossen werden.

Mikrohärtemessungen ergaben für die Kamacitmatrix Werte von ca. 150 HV0,01. In Bereichen um den aufgeschmolzenen Schreibersit steigen die Härtewerte, durch den im Eisen gelösten Phosphor, auf 300 bis 500 HV0,01. Im Zentrum des geschmolzenen Schreibersit sind oft noch Reste zu erkennen, an denen Werte um 1100 HV0,01 gemessen wurden.

### 3.2 Gefüge des Meteoriten nach dem Schmieden

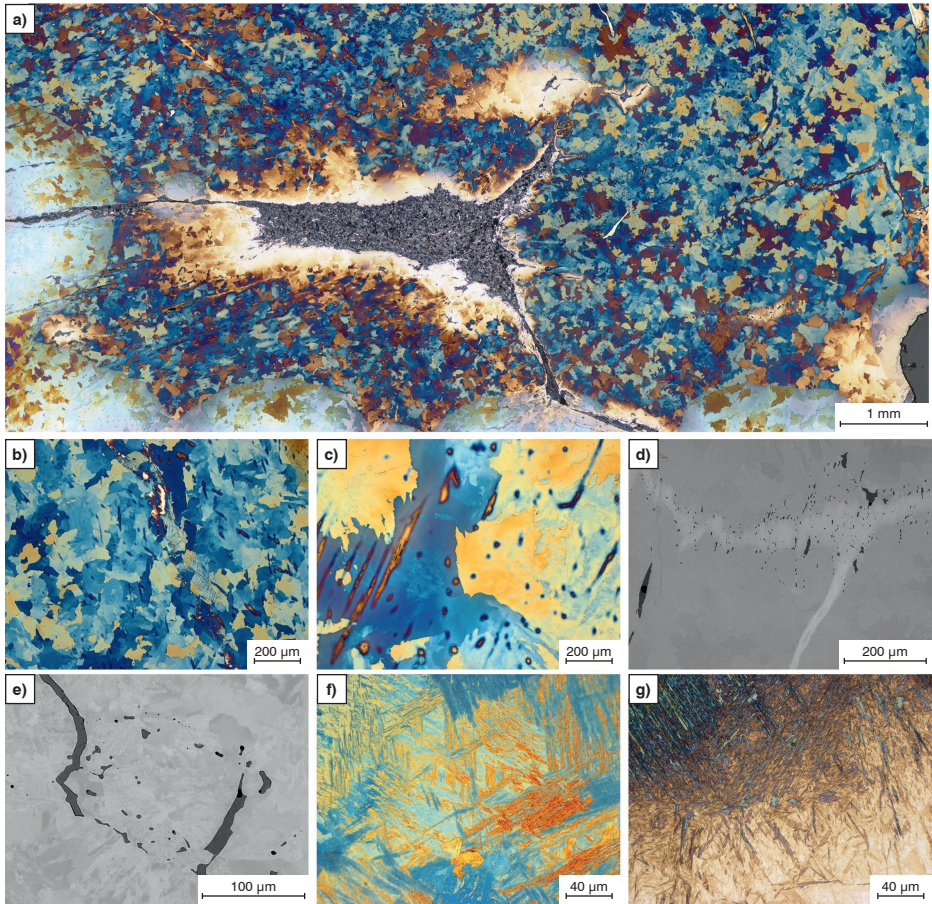
Durch die Erwärmung auf eine Schmiedetemperatur von 1100 °C, kommt es zu den bereits erwähnten Gefügeänderungen. Da die ersten Schmiedeschritte an Luft durchgeführt wurden, dürfte Oxidation an den Korngrenzen stattgefunden haben, wodurch der Meteorit versprödete und in kleinere Teile zerfiel. Dieser Sauerstoff bleibt auch während der weiteren Schmiedestufen unter Luftausschluss erhalten.

In Bild 6 sind einige Gefüge zusammengestellt. Bild 6a zeigt eine Überblicksaufnahme, in der die Verformungen der verschiedenen Einschlüsse gut zu erkennen sind. Die Matrix aus Kamacit ist gleichmäßig rekristallisiert und hat eine gleichmäßige Korngröße zwischen 100 und 200 µm.

Im Kamacit sind keine Verformungen zu sehen (Bild 6b), denn er entsteht erst unterhalb der eutektoiden Temperatur (ca. 720 °C), bei welcher nicht mehr geschmiedet wird.

Der große Einschluss in der Bildmitte ist weitgehend oxidisch und enthält überwiegend Fe. Daneben wurden auch geringe Mengen an Ni, Si, Al, P, Ca und K mittels EDX gemessen.

Die länglichen Ätzmuster in Bild 6c sind auf umgewandelten Schreibersit zurückzuführen, welcher nach dem Aufschmelzen verformt wurde. Die in Bild 6d und Bild 6e sichtbaren hellen Streifen enthalten höhere Konzentrationen



**Figures 6a to g:** Microstructure of the forged meteorite. a) Overview; b) kamacite matrix; c) deformed schreibersite; d, e) deformed schreibersite and taenite; f) bainite; g) mainly martensitic microstructure with some bainite; a, b, c, f, g) Klemm etching, LOM; d, e) SEM.

**Bilder 6a bis g:** Gefüge im geschmiedeten Meteoriten. a) Übersicht; b) Kamacit Matrix; c) Schreibersit verformt; d, e) Schreibersit und Taenit, verformt; f) Zwischenstufengefüge; g) überwiegend martensitisches Gefüge mit etwas Zwischenstufe; a, b, c, f, g) Klemm Ätzung, LOM; d, e) REM.

may have formed from taenite by deformation and diffusion. The dark gray areas contain P, so they are transformed schreibersite.

Fe-C microstructures could also be found in the forged sample. Here, the carbon may

nen an Nickel und könnten aus Taenit, durch Verformung und Diffusion, entstanden sein. Die dunkelgrauen Bereiche enthalten P und sind daher umgeformter Schreibersit.

Auch in der geschmiedeten Probe wurden Fe-C Gefüge gefunden, wobei der Kohlenstoff



**Figure 7:** Knife blade forged from the Campo del Cielo meteorite.

**Bild 7:** Messerklinge, geschmiedet aus dem Campo del Cielo Meteoriten.

have been introduced into the microstructure either by the dissolution of graphite or by carburization. Figure 6f shows a typical bainite structure, while Figure 6e shows a mainly martensitic microstructure with some bainite. In the martensitic areas, particularly at the edge, hardness values of around 1000 HV<sub>0.01</sub> were measured. This can be attributed to a faster cooling process at the surface.

Figure 7 shows the final knife blade – unfortunately not a sword. However, we are very satisfied with this first attempt and we intend to give it another try if we can find another suitable meteorite.

## 4 Conclusions

A fragment of the meteorite “Campo del Cielo” from Argentina was heat-treated and/or forged. The microstructural changes were metallographically examined.

After a one-time temperature increase and  $\alpha$ - $\gamma$  phase transformation, the typical coarse-grained meteorite structure characterized by Neumann lines can no longer be observed, but fine-grained kamacite. At 1000 °C, the schreibersite  $(\text{Ni,Fe})_3\text{P}$  likewise melts and P and Ni start to diffuse into the kamacite. Furthermore, the graphite is dissolved in the  $\gamma$ -Fe. Bainite as well as martensite could be observed. Upon a simple

durch die Auflösung von Graphit oder aber durch Aufkohlung in das Gefüge gelangt sein kann. In Bild 6f ist ein typisches Zwischenstufengefüge und in Bild 6e ein überwiegend martensitisches Gefüge mit etwas Zwischenstufe zu sehen. In den martensitischen Bereichen wurden vor allem am Rand Härtewerte um 1000 HV<sub>0,01</sub> gemessen, was auf die raschere Abkühlung an der Oberfläche zurückgeführt werden kann.

Die finale Messerklinge, leider kein Schwert, ist in Bild 7 abgebildet. Mit diesem ersten Versuch sind wir jedoch sehr zufrieden und haben vor, diesen zu wiederholen, falls wir einen geeigneten Meteoriten finden.

## 4 Schlussfolgerungen

Ein Teilstück des Meteoriten „Campo del Cielo“ aus Argentinien wurde wärmebehandelt, beziehungsweise geschmiedet und die Gefügeänderungen metallographisch untersucht.

Nach einer einmaligen Temperaturerhöhung und  $\alpha$ - $\gamma$  Phasenumwandlung liegt nach der Abkühlung ein feinkörniger Kamazit vor und nicht mehr das typische, grobkörnige Meteoritengefüge mit den Neumannbändern. Bei 1000 °C schmilzt auch der Schreibersit  $(\text{Ni,Fe})_3\text{P}$  und es beginnen P und Ni in den Kamazit zu diffundieren. Ebenso wird der Graphit im  $\gamma$ -Fe gelöst und es wurden Zwischenstufengefüge sowie Martensit beobachtet. Taenit



heat treatment, taenite  $\gamma$ -(Fe,Ni) only presents minor changes. It, however, manifests a strong tendency to homogenize during the forging induced deformations. The behavior of the other phases present in the meteorite could not be retraced.

It could be observed that the forging process not only induced microstructural changes, but also deformations of the impurities. Due to oxidation along the grain boundaries, the meteorite embrittled and the phosphides oxidized, causing the forging to break apart into smaller pieces.

The question arises of which temperature was applied for the prehistoric processing of meteorite iron. Meteorite iron should be relatively easily identified by the presence of Ni, perhaps also of P. Normally, metallographic microstructural examinations are not possible because artifacts such as, for example, Tutankhamun's dagger [13], are too unique and precious. If it would be possible to find out whether they are characterized by the original meteorite structure or a recrystallized one, the processing temperature during the manufacture of the artifacts could be deduced.

As we did not succeed in manufacturing a sword, we will search for a new, suitable meteorite and will possibly report about it again.

## Acknowledgement

We would like to thank Mr Nico Neubauer for his support as part of his bachelor thesis at the TU Wien and Mr Johannes Zbiral (TU Wien) for the XRF measurements. The authors acknowledge TU Wien Bibliothek for financial support through its Open Access Funding Program.

$\gamma$ -(Fe,Ni) zeigt bei einer einfachen Temperaturbehandlung geringe Veränderungen, dafür aber starke Tendenz zur Homogenisierung während des Verformens beim Schmieden. Die Reaktionen der weiteren im Meteoriten vorliegenden Phasen konnten nicht nachverfolgt werden.

Durch den Schmiedevorgang wurden zusätzlich zu den Gefügeveränderungen noch Verformungen der Verunreinigungen hervorgerufen. Aufgrund von Oxidation entlang von Korngrenzen, kam es zur Versprödung des Meteoriten und auch zur Oxidation der Phosphide, wodurch das Schmiedestück in kleinere Teile zerbrach.

Für die urgeschichtliche Verarbeitung von Meteoriteneisen stellt sich die Frage nach der Verarbeitungstemperatur. Dass ein Meteoriteneisen vorliegt, sollte relativ einfach durch den Nachweis von Ni und vielleicht auch P geklärt werden können. Eine metallographische Gefügeuntersuchung ist üblicherweise nicht möglich, da derartige Artefakte, wie z. B. der Dolch von Tutanchamun [13], zu einzigartig und wertvoll sind. Falls es möglich wäre, festzustellen ob das originale Meteoritengefüge vorliegt oder ein rekristallisiertes, könnte auf die Verarbeitungstemperatur bei der Herstellung des Artefakts geschlossen werden.

Da der Versuch ein Schwert herzustellen nicht geglückt ist, werden wir uns auf die Suche nach einem neuen, geeigneten Meteoriten machen und gegebenenfalls wieder darüber berichten.

## Danksagung

Unser Dank geht an Herrn Nico Neubauer, für seine Mithilfe im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der TU Wien. Herrn Johannes Zbiral (TU Wien) möchten wir für die RFA Messungen danken. Die Autoren danken der TU Wien Bibliothek für die finanzielle Unterstützung durch ihr Open-Access-Förderprogramm.

## References / Literatur

- [1] Rubin de Celis, M.: *Philosophical Transactions of The Royal Society of London* 78 (1788), pp. 37–37.
- [2] Bunch, T. E.; Cassidy, W. A.: Impact-induced deformation in Campo del Cielo meteorite. in: *Shock Metamorphism of Natural Materials*, B. M. French, N. M. Short (Eds.), Mono Book Corp., Baltimore, MD (1968), pp. 601–601.
- [3] Cabanillas, E. D.; Palacios, T. A.: *SEM Studies of a Campo del Cielo Meteorite Fall*, *Microsc Microanal* 9 (2003), pp. 632–632.  
DOI: 10.1017/S143192760344316X
- [4] Axon, H. J.; Smith, P. L.: A metallographic study of some iron meteorites of high nickel content, *Mineralogical Magazine* 38 (1972), pp. 736–736.  
DOI: 10.1180/minmag.1972.038.298.10
- [5] Vander Voort, G. F.: *Metallography of Iron Meteorites*, *Advanced Materials & Processes* 159 (2001), pp. 37–37.
- [6] Heide, F.: *Kleine Meteoritenkunde*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988
- [7] Wasson, J. T.: *Meteorites: Classification and Properties*, Springer-Verlag, 1974
- [8] Mitt. von Freunden der Naturwissenschaften in Wien IV (1848) 86
- [9] Reynolds, M.: *Classifications of Meteorites*, *J. of the Association of Lunar & Planetary Observers* 46 (2004), pp. 13–13.
- [10] Vander Voort, G. F.: A Note on Metallographic Techniques for Iron Meteorites, *Materials Characterization* 29 (1992), pp. 223–223.  
DOI: 10.1016/1044-5803(92)90117-Z
- [11] Strobl, S.; Haubner, R.: Investigation of “Neumann lines” in powder metallurgical samples and meteorites, *Acta Metallurgica Slovaca* 13 (2007), pp. 795–795.  
DOI: 10.1111/maps.12664
- [12] Comelli, D.; et al.: The meteoritic origin of Tutankhamun’s iron dagger blade, *Meteoritics & Planetary Science* 51 (2016), pp. 1301–1301.  
DOI: 10.1111/maps.12664
- [13] Matsui, T.; Moriwaki, R.; Zidan, E.; Arai, T.: The manufacture and origin of the Tutankhamen meteoritic iron dagger, *Meteoritics & Planetary Science* 57 (2022), pp. 747–747.  
DOI: 10.1111/maps.13787
- [14] McCartney, A. P.; Mack, D. J.: Source Iron Utilization by Thule Eskimos of Central Canada, *American Antiquity* 38 (1973), pp. 328–328.  
DOI: 10.1515/pm-2021-0047
- [15] Haubner, R.; Strobl, S.: Campo del Cielo – an Iron Meteorite found in Argentina, *Practical Metallography* 58 (2021), pp. 570–570.  
DOI: 10.1515/pm-2021-0047
- [16] Massalski, T. B.: *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Metals Park OH, 1990

### Bibliography

DOI 10.1515/pm-2022-1016

*Pract. Metallogr.* 59 (2022) 8-9; page 445-458

© 2022 Walter de Gruyter GmbH,

Berlin/Boston, Germany

ISSN 0032–678X · e-ISSN 2195–8599

### Wolfgang Scheiblechner



is a master locksmith and has been self-employed as a blacksmith in Palfau since 1978. He is involved in the preservation of monuments, in restorations and has already reforged some historical swords or tools. Challenges are his specialty and so he has dealt a lot with the

Damascene technique. However, he has created unusual composite materials which contain not only carbon steel but also cast iron, chromium-nickel steels, various copper alloys or gold.

### Wolf-Dieter Schubert



was born in 1951. He is retired professor at the Institute of Chemical Technologies and Analytics at TU Wien. His main expertise is on refractory metals and cemented carbides. He has more than 100 publications in refereed journals, several book contribu-

tions, and he is co-author of the monography on TUNGSTEN: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys and Chemical Compounds (ISBN 0-306-45053-4).