

## Beitrag zum Verständnis von Solingenstahl des 19 Jahrhunderts

### A contribution to the understanding of Solingen steel in the 19th. century

Laura García Sánchez<sup>1</sup>, Alberto Azor Lafarga<sup>1</sup>, A. Javier Criado Martín<sup>1</sup>, Antonio J. Criado Portal<sup>1</sup> und Christian Dietz<sup>2</sup>

Eingegangen: 28. Januar 2010  
Angenommen: 01. März 2010

Received: January 28, 2010  
Accepted: March 1, 2010  
Translation: P.Tate

#### Kurzfassung

Zwei im späten 19. Jahrhundert in Solingen angefertigte Blankwaffen wurden einer eingehenden metallographischen und chemischen Untersuchung unterzogen, wobei die gemessenen mechanischen Eigenschaften einer Struktur von feinlamellaren Perlit zugeordnet werden konnten. Der Produktionsprozess wurde daraufhin unter Verwendung einer modernen Stahlsorte mit einer der bei der Herstellung der Blankwaffen möglichst ähnlichen Zusammensetzung nachvollzogen, wobei ein Material mit fast identischen Eigenschaften erhalten werden konnte.

#### Einleitung

Bereits seit dem Mittelalter bis hin in die Neuzeit gab es in Europa für die Fertigung von Blankwaffen wie Schwerter und Säbel berühmte Zentren für Metallverarbeitung. Zu den bekanntesten zählen Toledo in Spanien, Mailand und Venedig in Italien sowie Solingen in Deutschland, in dieser Richtung aktiv und international geachtet ist heute nur noch letzteres. Die Herstellung dieser Artefakte war je nach Standort höchst unterschiedlich [1,2]. Einzelheiten der Fertigung unterlagen strenger Geheimhaltung um die Anfertigung von Plagiaten zu erschweren. Zur Unterscheidung und aus Prestigezwecken waren die Werkstücke ausserdem mit einer Prägung versehen.

Die Firma WKC Stahl und Metallwarenfabrik wurde im Jahre 1883 durch den Zusammenschluss der Familien Weyersberg und Kirsch-

#### Abstract

Two weapons manufactured in Solingen during the 19th. century were examined metallographically and chemically whereby the mechanical properties were found to correspond with those of a fine lamellar Pearlite. The manufacturing process was then simulated using a modern type of steel with a chemical composition as close as possible to that used in the manufacture of the original two swords, whereby a material with almost the same properties was able to be produced.

#### Introduction

From the middle ages up until modern times there have been a number of metal-working centres in Europe well known for the manufacture of weapons such as swords and sabres. Amongst the most well known are Toledo in Spain, Milan and Venice in Italy and Solingen in Germany. Only the last of these however remains active and internationally renowned. The production of such articles was however, according to the place of manufacture, remarkably different [1,2]. The exact details of the processes used were strictly guarded in order to prevent them being copied elsewhere. In addition, in order to differentiate them and for prestige purposes, the weapons produced were also stamped with a makers mark.

The company WKC Stahl and Metallwarenfabrik was founded in the year 1883 jointly by the families Weyersberg and Kirschbaum, the former of

baum gegründet, erstere hatte kurz zuvor das Patent der englischen Klingenschmiedewalze [3] gekauft, was neben einer verbesserten Arbeitsteilung die Massenfertigung von Klingen ermöglichte. Letztere hatte sich durch den Handel mit Solinger Klingen bereits weltweit einen Namen gemacht. Zahlreiche historische Persönlichkeiten, unter anderen Hindenburg und Bismarck, trugen Paradewaffen aus Solinger Fabrikation. Neugegründet nach dem zweiten Weltkrieg ist WKC in Solingen heute der einzige überlebende und wachsende der genannten Standorte. Im Jahr 2005 wurde noch die traditionsreiche Firma Wilkinson zugekauft, wodurch die Produktpalette noch einmal erweitert werden konnte. Zur Zeit werden dort aus modernen und normierten Stahlsorten, welche wenig mit den in früheren Epochen verwendeten Materialien gemeinsam haben, Blankwaffen unterschiedlicher Art für Privatkunden oder militärische Verwendung hergestellt.

Gegenstand der vorliegenden Studie sind zwei Säbel welche von Weyersberg & Kirschbaum Cie im Jahre 1898 unter Verwendung der Klingenschmiedewalze für die argentinische Kavallerie hergestellt wurden und heute zur Sammlung von Alberto Azor Lafarga gehören. Die Stücke wurden einer eingehenden metallographischen Untersuchung unterzogen sowie die nachgewiesenen Strukturen im Labor reproduziert (Bilder 1 und 2).

Die abschliessende Wärmebehandlung von Solingenstahl ist recht ungewöhnlich. Bei den herkömmlichen Verfahren zur Härtung und zum Anlassen, wie sie bei der Herstellung legendärer Klingen wie der japanischen Katana, dem Toledostahl oder den Frankenschwertern zur Anwendung kamen, soll die Gitterstruktur des Stahls in Martensit umgewandelt werden. [4].

Im Fall der untersuchten Säbel war das Ziel des Härteverfahrens nie die Bildung von Martensit, trotzdem konnten Klingen mit einer Rockwell-Härte zwischen 44 und 45 HRC hergestellt werden, die zudem noch einen hervorragenden mechanischen Widerstand (> 1500 Mpa) sowie eine grosse Zähigkeit aufweisen. Diese Eigenschaften machen das Material zu einem ausserordentlich gut geeignetem Werkstoff zur Herstellung von Blankwaffen und er-

which had shortly beforehand purchased the patent for the English blade forging mill [3] which in addition to improving the conditions of manufacturing also made the mass production of blades possible. The latter, with the trade in Solingen blades, making the name Solingen well known world wide. Numerous historical personalities, amongst others, Hindenburg and Bismarck, wore parade weapons manufactured in Solingen. Re-founded after the second world war, WKC in Solingen today remains the only surviving and growing of the previously named centres of production. In 2005 the tradition-rich company Wilkinson was also bought which further expanded the pallet of products offered. Today, weapons of many different types are manufactured for private customers or for military use, from modern and standard types of steels which have little in common with those in use in earlier times.

The weapons investigated were two sabres made by Weyersberg & Kirschbaum Cie in 1898 for the Argentinian cavalry using the blade forging mill and which are today belong to the collection owned by Alberto Azor Lafarga. The pieces were subjected to a detailed metallographical examination and the structures observed reproduced in the laboratory (Figs. 1 and 2).

The final heat treatment of Solingen steel is particularly unconventional. In most processes used for hardening and tempering, such as in the manufacture of other legendary types of blades such as the Japanese Kata blades, Toledo steels or Frankish swords, the lattice structure of the steel is transformed into Martensite [4].

In the case of the sabres investigated, the aim of the hardening process was never to form Martensite, in spite of which blades with a hardness of 44 to 45 HRC were able to be produced which also had excellent mechanical strength (> 1500 MPa) and great toughness. These properties make the steel an extraordinarily good material for the manufacture of such weapons and explain the reputation these blades had in past times.



prozess konnte der Schwefelgehalt weitgehend reduziert werden, nicht jedoch Phosphor, was erst im weiterentwickelten und moderneren Siemens Umwandler gelang [ ].

Demzufolge kann man Stahl in vier Gruppen einteilen:

1. Bessemer: %S + %P < 0,12%
2. Siemens: %S + %P < 0,09%
3. LD mit Sauerstoffeinspeisung: %S + %P < 0,03%
4. Elektrischer Ofen (Recycling): %S + %P < 0,03%

In Europa und Nordamerika kam Bessemerstahl in den sechziger Jahren des XX Jahrhunderts ausser Mode, hauptsächlich zugunsten von Recycling von Stahl in elektrischen Öfen. [6]. Die bei der chemischen Analyse des Säbelstahls erhaltene Zusammensetzung (C: 0.8%, Si: 0.5%, Mn: 0.6%, S<0.05%, P<0.02%.) lässt eindeutig auf ein Produktionsverfahren unter Verwendung von Siemens Umwandlern schliessen.

Um die Prozesse, die bei der Herstellung der zwei Säbel zum Einsatz kamen und zu den beobachteten Mikrostrukturen führten, besser zu verstehen, wurden diese mit Versuchsreihen im Labor reproduziert.

### Experimentelles

Für die metallographische Untersuchung wurden von jedem Säbel mit Hilfe einer Fräse, aber ohne Rotation des Werkzeugs, zwei Proben entnommen, eine aus der griffnahen Zone und eine weitere in der Nähe der Klingenspitze (Bild 3 und 4).

Die ausgerichteten Proben wurden sodann in Epoxidharz eingegossen und nach herkömmlichen metallographischen Verfahren präpariert. Der Grobschliff erfolgte auf einem Bandschleifer (Buehler Metaserv 3000), danach wurde mit Rundscheifpapier mit feiner werdender Körnung (120, 320, 400, 600 und 2000; Buehler-Met Abrasive Discs), in Wasser nachgeschliffen. Poliert wurde mit Aluminiumoxidpulver mit

which was only made possible with the advent of the modern Siemens converter [5].

In accordance with this it is possible to classify such steels into the following four groups:

1. Bessemer: %S + %P < 0.12%
2. Siemens: %S + %P < 0.09%
3. LD with Oxygen injection: %S + %P < 0.03%
4. Electric furnace (Recycling): %S + %P < 0.03%

In Europe and North America the Bessemer process fell out of fashion in the 20th. century, during the 1960's, mainly being replaced by the recycling of steels in electric furnaces [6]. The chemical analysis of the sabre steels (C 0.8 %, Si 0.5 %, Mn 0.6 %, S < 0.05 %, P < 0.02 %) clearly reveals the production to have been using Siemens converters.

In order to gain a better understanding of the processes used to manufacture the two sabres and of the microstructures found, it was finally attempted to simulate the fabrication process in the laboratory.

### Experimental Details

For the metallographical investigation two small specimens were taken from each of the sabres, one from an area close to the handle and one from an area close to the tip of the blade (Figs. 3 and 4). The specimens were removed using a milling tool, but without rotating the tool.

The specimens were mounted in epoxy resin and prepared using conventional metallographic techniques. The coarse grinding was carried out on a belt grinder (Buehler Metaserv 3000), after which the specimens were wet ground on increasingly finer grade round grinding papers (Buehler-Met 120, 320, 400, 600 and 2000 abrasive discs). The specimens were then polished with Aluminium Oxide powder having a parti-



*Bild 3: Probennahme aus den Klingen in der mechanischen Werkstatt der Universität Complutense in Madrid.*

*Fig. 3: Specimen removal from the blades in the mechanical workshop of the University of Complutense in Madrid.*

einem Partikeldurchmesser von 0,3 µm (Buehler-Met Alumina Suspension, Alpha Micropolish Alumina-1). Danach wurde die Oberfläche mit einer 2%-igen Nitallösung 45 s lang angeätzt. Vor der Beobachtung unter dem Rasterelektronenmikroskop (JEOL, JM-6400) wurde eine Goldoberfläche auf die Probe aufgedampft.

Unter den modernen Stahlsorten ist wohl CK75 (DIN17200) der bei der Herstellung der Säbel aus Solingenstahl verwendeten am ähnlichsten und wurde daher für Vergleichsmessungen ausgewählt; sie weist folgende chemische Zusammensetzung auf:

C: 0,7-0,8%, Si: 0,15-0,25%, Mn: 0,6-0,75%, S<0,025%, P<0,05%.

Die Bestimmung des Kohlenstoff- und Schwefelgehalt der Stahlproben wurde auf einem CNS Analyser (Leco CNS-2000) durchgeführt, der Anteil an Mangan und Silizium wurde mit Hilfe der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (Optima 3300, Perkin Elmer) gemessen. Der Stahl war in Stangen mit einem Durchmesser von 19 mm verfügbar und wurde für die auszuführenden Untersuchungen in Zylinder passender Größe geschnitten (Bild 5).



*Bild 4: Photographie einiger der zur weiteren Behandlung schon in Harz gegossener Proben.*

*Fig. 4: Specimen removal from the blades in the mechanical workshop of the University of Complutense in Madrid.*

cle diameter of 0.3 µm (Buehler-Met Alumina Suspension, Alpha Micropolish Alumina-1). The surface of the specimens were then etched for 45 seconds with 2 % Nital. Prior to examination in the Scanning Electron Microscope (Jeol JM-6400) a Gold coating was vacuum deposited onto the surface of the specimens.

Amongst modern types of steel, CK75 (DIN17200) is the most similar to that used to make the Solingen steel sabres and was thus chosen for the comparative measurements and has the following chemical composition:

C: 0.7-0.8 %, Si: 0.15-0.25 %, Mn: 0.6-0.75 %, S < 0.025 %, P < 0.005 %.

The determination of the Carbon and Sulphur content of the steel specimens was carried out using a CNS analyser (Leco CNS-2000). The proportions of Manganese and Silicon were measured using plasma mass spectrometry (Optima 3300, Perkin Elmer). The steel was supplied in the form of 19 mm diameter bars and for the investigations to be carried out was cut into appropriately sized cylindrical specimens (Fig. 5).



*Bild 5: Photographie der für die Nachbehandlung im Labor präparierten modernen Stahlproben CK-75.*

*Fig. 5: Photograph of the modern CK-75 steel specimens ready for heat treatment in the laboratory.*



*Bild 6: Optische Mikroskopie der Säbelklinge, auf welcher die in Schmiederichtung verlängerten Körner zu erkennen sind.*

*Fig. 6: Optical microscopic photograph of one of the sabre blades in which the grains elongated in the direction of forging are clearly visible.*

Zur Härteprüfung sowie zur Messung der mechanischen Widerstandsfähigkeit des Säbelstahls sowie der im Labor behandelten Proben, wurde ein universelles Härtemessgerät (Galileo Ergotest) eingesetzt, mit welchem Brinell- (HB30), Rockwell- (HRC) und Vickershärte (HVP-30) bestimmt werden konnten.

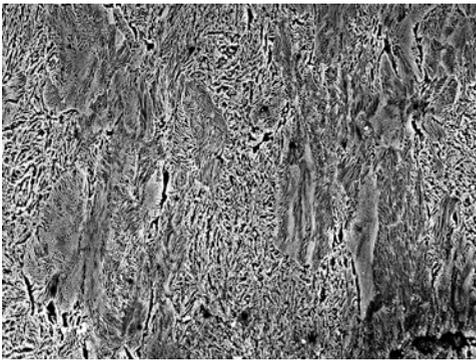
The hardness and mechanical strength of the sabre steel and of the specimens treated in the laboratory was tested using a universal hardness tester (Galileo Ergotest) capable of making Brinell- (HB30), Rockwell (HRC) and Vickers (HV 30) hardness measurements.

## **Resultate und Diskussion**

Die metallographische Untersuchung unter dem Rasterelektronenmikroskop erlaubte es die Feinstruktur des Stahls der vorliegenden Säbel zu beobachten. Diese ist auf der gesamten Klingenlänge ausgesprochen homogen. Es handelt sich um einen eutektoiden Stahl mit kleinen Kristallitkörnern, deren ursprüngliche Form in Schmiederichtung orientiert und verlängert ist (Bild 6). Die Perlitfeinstruktur weist einen mit einem Mittelwert unter 200 nm sehr geringen Lamellenabstand auf (Bilder 7 und 8). Dies verbunden mit dem Vorhandensein sehr dünner und verlängerter Kristallite erklärt die erhöhte Härte und mechanische Widerstandsfähigkeit der Klingen, wobei gleichzeitig die für die perlitische Feinstruktur charakteristische Zähigkeit erhalten blieb.

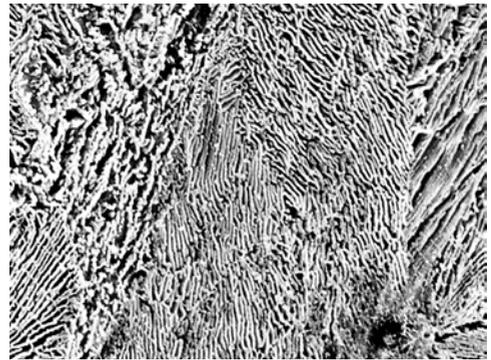
## **Results and Discussion**

The metallographical investigation under the Scanning Electron Microscope allowed the fine structure of the sabre steel to be observed. The structure appeared to be homogeneous along the entire length of the blade. The structure proved to be that of a eutectoidal steel with small crystallite grains, the original shape of which were elongated and orientated longitudinally in the direction of forging (Fig. 6). The fine Pearlitic structure exhibited a very small lamellar separation with a mean value of under 200 nm (Figs. 7 and 8). This, together with the presence of the very thin and elongated crystallites explains the high hardness and mechanical strength of the blades whilst retaining the characteristic toughness of the fine Pearlitic microstructure.



*Bild 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, auf der die Mikrostruktur von feinverteiltem Perlit der Säbel zu sehen ist.*

*Fig. 7: Scanning Electron Microscopic photograph in which the finely distributed Pearlite of the sabre is clearly visible.*



*Bild 8: Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 7, hier werden der geringe interlaminare Abstand der Perlitstruktur sowie deren beim Schmieden ausgerichtetes Wachstum deutlich.*

*Fig. 8: A section of Fig. 7 at higher magnification, in which the small interlamellar separation of the Pearlitic microstructure and their elongated shape as a result of the forging operation is clearly visible.*

Die gemessene Härte betrug im Mittel 44 HRC, 422 HB (30) und 439 HV (P.30), Werte die mit bekannten Literaturangaben übereinstimmen [7,8], was eine mechanische Widerstandsfähigkeit von 150 kg/mm<sup>2</sup> (1500 MPa) ergibt. Dies, vereint mit der hervorstehenden Versteifungsrippe, eine Formgestaltung welche das Trägheitsmoment sowie die Starrheit der Stahlklinge erhöht, sind für einen Säbel höchster Qualität und Wirksamkeit hervorragende mechanische Eigenschaften.

Die Temperatur spielt, sowohl beim Schmieden als auch beim anschließenden Glühen (Austenitbildung) vor dem isothermen Halten der Werkstücke im Bezug auf die Ausbildung einer feinen Perlitstruktur eine wichtige Rolle. Um die erwähnte feine Körnung sowie den sich daraus ergebenden geringen interlaminaren Abstand und die damit verbundenen mechanischen Eigenschaften zu erhalten müssen durch plastische Verformung beim Schmieden die sich zuerst bildenden austenitischen Kristalle zertört werden. Hierbei ist es unabdingbar dass die Temperatur einen

The mean hardness measured was 44 HRC, 422 HB (30) and 439 HV (30), values which agree well with those quoted in the literature [7,8], which corresponds to a mechanical strength of 150 kg/mm<sup>2</sup> (1500 MPa). This, coupled with the projecting stiffening ribs, a shape which increases both the moment of inertia and stiffness of the steel blades, are excellent mechanical properties for a sabre of the highest quality and effectiveness.

Temperature, both during forging and during the subsequent annealing operation (Austenitising) when the workpiece is held isothermally, both play an important roll in the formation of the fine Pearlitic structure. In order to retain the fine grained structure mentioned and the resulting extremely small interlamellar separation and thus the desired mechanical properties, during the forging operation it is necessary to break up the first Austenite grains formed. To achieve this it is critical to ensure that the temperature of the steel is not allowed to exceed 800 °C as otherwise recrystallisation will take place.

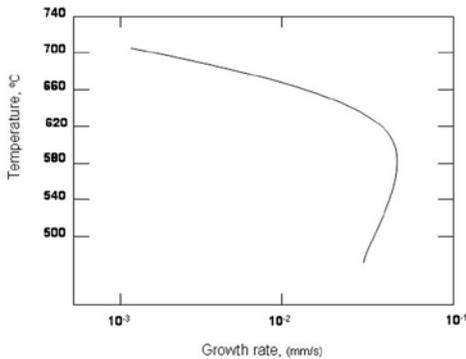


Bild 9: Wachstumsgeschwindigkeit für Perlit in Funktion der Umwandlungstemperatur in hochreinem Kohlenstoffstahl eutektoider Zusammensetzung.

Fig. 9: The rate of growth of Pearlite as a function of the transformation temperature of high purity Carbon steels of eutectoidal composition.

Wert von circa 800 °C nicht übersteigt, da sonst Rekristallisation stattfindet.

Eine exakte Kontrolle der Temperatur muss auch bei der abschließenden thermischen Behandlung beachtet werden, die zudem sehr schnell zu erfolgen hat, da sonst wieder ein Wachstum der Kristallite begünstigt wird. Da sich die Perlitkristalle (Troostite) an den austenitischen Korngrenzen bilden, kann auf diese Weise die Anzahl der Kristallkeime und damit auch die Umwandlungsgeschwindigkeit von  $\gamma$ -Austenit in feinkörniges Perlit erhöht werden [9,10]. Wird für einen Stahl eutektoider oder sehr ähnlicher Zusammensetzung eine Perlitstruktur mit feiner Körnung erwünscht, muss daher entweder in einem Bad mit flüssigem Blei oder aber in einer Salzschmelze abgekühlt werden, wobei die isotherme Umwandlung von Austenit in feinkörnigen Perlit bei Temperaturen zwischen 580 °C und 600 °C erreicht werden kann. Dieser Sachverhalt wird auch aus dem Bild 9 [8] deutlich, hier kann die Wachstumsgeschwindigkeit für feinkörniges Perlit als Funktion des Unterkühlungsgrades, das heisst im Bezug auf die Temperatur bei welcher das Kristallwachstum nur isotherm stattfinden kann, abgelesen werden. Bild 10 [11] repräsentiert den zu erwartenden

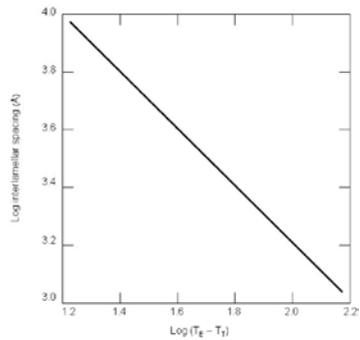


Bild 10: Logarithmische Darstellung des interlaminalen Abstands gegen die Differenz aus Umwandlungs- und eutektoider Temperatur.

Fig. 10: Logarithmic representation of the interlamellar separation as a function of the difference between the transformation and eutectoidal temperatures.

An exact control of the temperature must also be ensured during the subsequent final heat treatment, which must be carried rapidly after forging to prevent any further growth of the crystallites from being promoted. Because the Pearlite crystals (Troostite) form at the Austenitic grain boundaries, it is possible in this way to increase the number of crystal nuclei and thus the rate of transformation of  $\gamma$ -Austenite into fine grained Pearlite [9,10]. If a fine grained Pearlitic structure is required in a steel of eutectoidal or very similar composition, cooling must be carried out in a bath of molten Lead or molten salts, whereby the isothermal transformation of Austenite into fine grained Pearlite can be achieved at temperatures between 580 °C and 600 °C. This fact is also clear from Fig. 9 [8], which shows the rate of growth of fine grained Pearlite as a function of the undercooling, that is relative to the temperature at which crystal growth can only take place isothermally. Figure 10 [11] shows the expected interlamellar separation as a function of the degree of undercooling, which is defined as the difference between the eutectoidal temperature  $T_E$  and the temper-

interlaminaeren Abstand in Funktion des Unterkühlungsgrades, welcher als die Differenz zwischen der eutektoidischen Temperatur TE und der während des isothermen Haltens angewendeten Temperatur TT definiert ist. Je höher diese Differenz, je schneller ist das Kristallwachstum und damit geringer der interlaminaere Abstand. Unterhalb des genannten Temperaturbereichs kann sich kein Perlit mehr bilden und es würden andere Strukturen wie Bainit oder Martensit entstehen [8,11].

Nach der metallographischen Untersuchung und der Härtemessung der untersuchten Klingen wurde anschließend versucht, den Fabrikationsprozess im Labor zu simulieren. Dazu wurden Materialproben der Stahlsorte CK-75 (DIN 17200), welche trotz vergleichbarer Zusammensetzung, Heisschmieden und Normalisierung eine wesentlich gröbere Perlitstruktur als der Solinger Säbelstahl aufwiesen, unter verschiedenen Bedingungen nachbehandelt.

Die Proben wurden zuerst auf 790 °C erwärmt und sodann in einem Ofen mit Siliziumkarbidwiderständen (Carbolite RHF 1400-1600 °C 14/3) während 10 min auf 1600 °C aufgeheizt, um die Umwandlung zu Austenit fast ohne Kornbildung abzuschliessen. Danach wurden sie in einem Salzbad (Emison SAL 10, 4000w: NaCl 20%, BaCl<sub>2</sub> 30%, CaCl<sub>2</sub> 50%) bis zur völligen Umwandlung zu Perlit während 2 – 5 min isotherm auf 590 °C abgekühlt

Die Mikrostruktur der so erhaltenen Werkstücke weist in allen Bereichen feinlamellaren Perlit auf (Bilder 11 und 12), der Lamellenabstand beträgt unter 200 nm. Wie beim Vergleich mit der Abbildung 8 deutlich wird, ist die Feinstruktur der erhaltenen Materialien analog zu der des Solingenstahls, wie er für die Herstellung der untersuchten Säbel zum Einsatz kam. Dies belegt dass letzterer bei der Herstellung von Temperaturen unter 800 °C in einer Salzschnmelze oder in einem Bad aus geschmolzenem Blei auf Temperaturen zwischen 580 °C und 600 °C abgekühlt wurde.

Die bei der Behandlung der Materialproben CK-75 erreichten Härtegrade liegen leicht (2-3 HRC) unter denen des Solingenstahls, was sich mit den intensiven Verformungen des

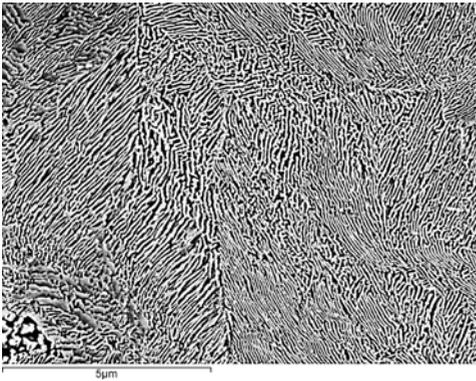
ature used TT at which the isothermal holding was carried out. The higher this difference, the faster is the crystal growth and thus the smaller is the interlamellar separation. Below the stated temperature range Pearlite is no longer able to form and other microstructures such as Bainite and Martensite occur [8.11].

Following the metallographical investigation and hardness testing of the blades it was finally attempted to simulate the fabrication process in the laboratory. To do this a series of different heat treatments were carried out on specimens of the steel CK-75 (DIN17200), which in spite of it's similar chemical composition, hot forging and normalising characteristic normally exhibits a significantly coarser Pearlitic structure than that exhibited by the Solingen sabre steel.

The specimens were first heated to 790 °C and then heated in a Silicon resistance furnace (Carbolite RHF 1400 – 1600 °C 14/3) for 10 min. at 1600 °C in order to complete the transformation to Austenite almost entirely without the formation of grains. Thereafter the specimens were cooled isothermally in a salt bath (Emison SAL 10, 4000W: NaCl 20 %, BaCl<sub>2</sub> 30 %, CaCl<sub>2</sub> 50 %) at 590 °C for 2 – 5 min. until their complete transformation to Pearlite.

The microstructure of the specimens thus treated exhibited in all areas a microstructure of fine lamellar Pearlite (Figs. 11 and 12) with a lamellar separation of less than 200 nm. As can be seen quite clearly by comparison with Fig. 8, the fine structure of the materials thus produced is similar to that of the Solingen steel used for the manufacture of the two sabres investigated. This supports the belief that the two sabres were finally heat treated at temperatures below 800 °C being cooled either in a salt bath or in a bath of molten Lead to temperatures of between 580 °C and 600 °C.

The hardness achieved as a result of the heat treatment of the CK-75 specimens was found to be slightly less (2–3 HRC) than that of the Solingen steel, which can probably be explained by



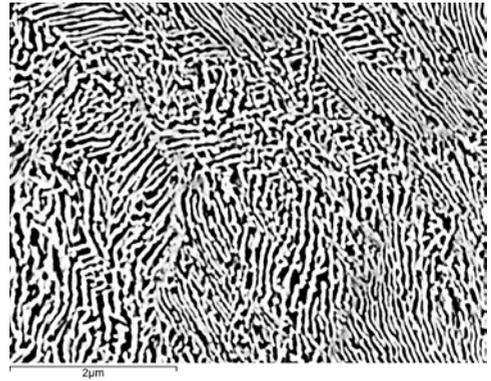
*Bild 11: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des im Labor behandelten (Abkühlen von 780 °C auf 580 bis 600 °C im Salzbad) CK-75 Stahls, die Perlitfeinstruktur ist über den gesamten untersuchten Bereich ausgebildet.*

*Fig. 11: Scanning Electron Microscopic photograph of the CK-75 steel specimens heat treated in the laboratory (Cooled from 780 °C down to 580 to 600 °C in a salt bath), the fine Pearlitic structure is present across the entire region investigated.*

letzteren während der industriellen Produktion unter Zuhilfenahme der Klingenschmiedewalze erklären lässt, zudem wurde dort als Ausgangsmaterial ein Stahl feinerer Körnung verwendet [12].

### Schlussfolgerungen

Über eine metallographische Untersuchung im Verbund mit Materialtests war es möglich, den Fabrikationsprozess zweier Säbel aus Solingenstahl nachzuvollziehen, welche im Jahr 1898 von der F<sup>a</sup> Weyersberg Kirschbaum & Cie hergestellt wurden. Der für Schwerter des Mittelalters bis in die Neuzeit traditionelle Härtingsprozess mit Salmuera und darauf folgendem Anlassen wurde im Fall der vorliegenden Klingen des 19. Jahrhunderts durch einen moderneren ersetzt, welcher im wesentlichen aus einem isothermen Abkühlen in einer Salzschnmelze bei Temperaturen um 580 bis 600 °C besteht. Die bei der Anwendung der Klingen schmiedewalze und



*Bild 12: Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 12, der geringe interlaminare Abstand der Perlitstruktur ist zu sehen.*

*Fig. 12: A section of Fig. 12 at higher magnification showing the small interlamellar separation of the Pearlitic microstructure.*

the heavy deformation of the blades as a result of the industrial method of production using the blade forging mill, and in addition by the use of a finer grained steel as the starting material [12].

### Conclusions

Through a metallographic investigation in conjunction with chemical analysis and hardness testing it was possible to reproduce the fabrication process used to manufacture two sabres made of Solingen steel made in 1898 by the company Weyerberg Kirschbaum & Cie. The traditional hardening process using Salmuera followed by annealing used from the middle ages until industrial times was in the case of the 19th. century blades investigated here replaced by a more modern process consisting essentially of cooling the blades isothermally in a salt bath at temperatures of from 580 °C to 600 °C. The fine metallic microstructure achieved using

dem erwähnten Härtungsprozess erhaltene metallische Feinstruktur besteht aus feinverteilttem Perlit kleiner Körnung, was dem Stahl beträchtliche Härte, eine grosse mechanische Widerstandsfähigkeit sowie eine ausserordentliche Zähigkeit verleiht.

Der zur Herstellung der Säbelklingen verwendete Stahl besteht aus einem in zeitgenössischen Siemens-Martin Öfen gewonnenen eutektoiden Stahl höchster Qualität, mit einem sehr geringen Gehalt an Schwefel und Phosphor ( $\% P + \% S < 0,09 \%$ ). Die Simulation des Herstellungsprozesses der Säbel unter Verwendung der Stahlsorte CK-75 als Ausgangsmaterial führte zu einem Metall mit analoger Feinstruktur und erlaubte es die Art des Schmiedevorgangs sowie die dabei verwendeten Temperaturen zu verifizieren.

### **Danksagungen**

Die Autoren danken Alfonso Rodríguez und Alfredo Fernández, vom Zentrum für Elektronenmikroskopie „Luis Bru“ der Universität Complutense in Madrid, für Hilfe und Anregungen bei der Anfertigung der REM/EDX – Daten. Des Weiteren danken wir Florentino Zapatera, Leiter der universitätseigenen Werkstätten, für die sorgfältige Manipulation der Säbelklingen.

the blade forging mill and the subsequent hardening process described, consisting of finely distributed, fine grained Pearlite, resulted in a steel of considerable hardness, high mechanical strength and extreme toughness.

The steel used to make the sabre blades was a eutectoidal steel of the highest quality, produced at the time in a Siemens–Martin furnace, with a very low Sulphur and Phosphorus content ( $\% P + \% S < 0.09 \%$ ). The simulation of the manufacturing process used to make the sabres using the modern steel CK-75 as the starting material resulted in a metal having a similarly fine microstructure and permitted the type of forging process and temperatures originally used to be verified.

### **Acknowledgements**

The authors would like to thank Alfonso Rodríguez and Alfredo Fernández of the “Luis Bru” Centre of Electron Microscopy at the University of Complutense in Madrid for their help and support in producing the SEM/EDX data. Further thanks go to Florentino Zapatera, Head of the university’s workshops for his careful handling of the sabre blades.

## Literatur/References

- [1] Calabrés, R.; Mota, J.M.; Criado, A.J.; Martínez, J.A.; Martínez, M.A.; Jiménez, J.M.: *Praktische Metallographie*. 38 (2001) 2, 325-337.
- [2] Salinas, M.D.; Criado, A. Javier; Ramos, V.; Arévalo, R.; Chamón, J.; Dietz, C.; Martínez, J. A.; Criado, A. J.: *Praktische Metallographie*. 44 (2007) 4, 172-181.
- [3] Kalpakjian, S.; Smith, S.R.: *Manufacturing engineering and technology*, Fifth Edition, Pearson Education, Inc, USA, 2006, S. 360ff.
- [4] Smith, C.S.: *A history of metallography*, University of Chicago Press, Chicago, USA, 1960, S. 3ff.
- [5] Ballester, A.; Verdeja, J.; Sancho, L.F.: *Metallurgia Extractiva: procesos de obtención*, Vol. II, Editorial Síntesis, S.A., Madrid, Spanien, 1998.
- [6] Paráís, J.: *Aceros especiales y otras aleaciones*, Editorial Dossat S.A., Madrid, Spanien, 1982, S. 9ff.
- [7] Apraiz, J.: *Tratamientos térmicos de los aceros*, Editorial Dossat, S.A., Madrid, Spanien, 1982, S. 120ff.
- [8] Reed-Hill, R.E.: *Physical Metallurgy Principles*, Second Edition, D. Van Nostrand Company, New Cork, USA, 1973.
- [9] Porter, D.A.; Easterling, K.E.: *Phase Transformations in metals and alloys*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1981, 326ff.
- [10] Martin, J.W.; Doherty, R.D.; Cantor, B.: *Stability of microstructure in metallic systems*, second edition, Cambridge University Press, England, 1997, 183ff.
- [11] Chadwick, G.A.: *Metallography of phase transformations*, Butterworth & Co. Ltd, London, England, 1972.
- [12] Wegst, C.W.: *Key to steel*, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 22nd edition, Marbach, Deutschland, 2010.

### Korrespondenzanschrift / Correspondence address

- <sup>1</sup> Dpt. of Material Science and Metallurgic Engineering, Faculty of Chemistry, Complutense University of Madrid, Spain (U.C.M.).
- <sup>2</sup> Centre for Archaeometry and Archaeological Analysis (C.A.I. AAA), Faculty of History and Geography, U.C.M., 28040 Madrid (Spain).

### Laura García Sánchez



studied Chemistry at the Complutense University of Madrid. Actually, she is doing her PhD at the department for Material Science and Metallurgical Engineering, belonging to D. Antonio J. Criado Portals group, which is dedicated to mechanical engineering and archaeometallurgy. Her scientific work is intimately related to archaeological materials.

### Christian Dietz



works at the Centre for Archaeometry and Archaeological Analysis at the Complutense University of Madrid. With a strong background in Analytical Chemistry he is currently dedicated to method development in analysis, geophysical prospection and dating of a wide range of archaeological artefacts.



Den Beitrag als PDF finden Sie unter:  
PDF of this article:

[www.practical-metallography.com](http://www.practical-metallography.com)  
Dokumenten-Nummer: PM110093